

УДК 551.581

БАЛАНС ТРАНЗИТНОГО ОБЛУЧЕНИЯ ОКРУЖАЮЩЕГО ЗЕМЛЮ ПРОСТРАНСТВА

© 2022 г. В. М. Федоров¹, *, А. А. Костин¹, Д. М. Фролов¹

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

*fedorov.msu@mail.ru

Поступила в редакцию 17.01.2021 г.

После доработки 29.06.2021 г.

Принята к публикации 25.08.2021 г.

Рассматривается облучение поверхностей высотных уровней от верхней тропосферы до нижней мезосферы. Выполнены ранее не проводившиеся расчеты характеристик транзитного облучения широтных зон поверхностей в тропических годах и их частях с 3000 г. до н.э. по 2999 год н. э. Энергетические характеристики (Дж) вычислены во всех годах, удельные энергетические характеристики (Дж/м²) – средние многолетние и в отдельных годах. Для каждой пары (широтная зона, часть тропического года) вычислены удельная входящая (через эту зону в тело, ограниченное поверхностью) транзитная энергия, удельная выходящая (из тела, ограниченного поверхностью) транзитная энергия и их разность (баланс). Для целой поверхности баланс за любой промежуток времени равен нулю (при отсутствии атмосферы), для полуповерхности и 5-градусной широтной зоны при наличии транзитного облучения баланс отличен от нуля. На поверхностях всех высотных уровней наиболее значительный разброс между балансами для 5-градусных зон отмечается среди полугодовых балансов в полярных районах. Для 5-градусных зон каждой полуповерхности от экватора к полюсу в летнем полугодии полугодовой баланс до 65-й параллели отрицателен, затем положителен, в зимнем полугодии наоборот. Полугодовой баланс для полуповерхности в летнем полугодии положителен, в зимнем отрицателен на всех высотных уровнях. В рассматриваемом диапазоне лет модуль полугодового баланса для полуповерхности уменьшается как по летним, так и по зимним полугодиям.

DOI: 10.31857/S0023420622020030

ВВЕДЕНИЕ

Под солярным климатом Земли понимаются теоретически рассчитываемые характеристики облучения земной поверхности и окружающего пространства без учета поглощения и рассеяния солнечных лучей в атмосфере, изменений солнечной активности, рельефа, приливных деформаций Земли. Выполненные М. Миланковичем и его последователями расчеты позволили определить основные тенденции в пространственном и временном изменении инсоляции на уровне поверхности Земли [3–6, 9–17, 22–24]. Расчеты солнечной энергии, приходящей на поверхности различных высотных уровней, ранее не выполнялись. Проводились только измерения мощности солнечной радиации в окружающем Землю пространстве (с использованием аэростатов, самолетов и космических аппаратов), выяснение потерь мощности в атмосфере и выявление вариаций солнечной постоянной, связанных с изменением активности Солнца [1, 2, 7, 18–20, 25].

Таким образом, полученные ранее представления о солярном климате Земли не являются полными, поскольку они не содержат информацию о солярном климате окружающего Землю простран-

ства. Наиболее важна информация о солярном климате плотных слоев атмосферы – той части окружающего Землю пространства, с которой Земля материально и энергетически тесно связана. Для получения этой информации нами были рассчитаны характеристики облучения широтных зон поверхностей различных высотных уровней от верхней тропосферы до нижней мезосферы.

В расчетах различались падающее (лучи направлены к Земле) и транзитное (лучи направлены мимо Земли) облучение ячеек широтных зон поверхностей. Транзитное облучение подразделялось на входящее в тело, ограниченное поверхностью, и выходящее из этого тела. Три указанных вида облучения представлены на рис. 1, где DWI (Downward Irradiation) – падающее облучение, ITI (Incoming Transit Irradiation) – входящее транзитное облучение, OTI (Outgoing Transit Irradiation) – выходящее транзитное облучение. В каждый момент времени поверхность можно разбить на ячейки таким образом, что для каждой ячейки будет реализован один из трех видов облучения либо ячейка будет в тени.

Трем видам облучения ячеек поверхностей соответствуют три энергетические характеристики

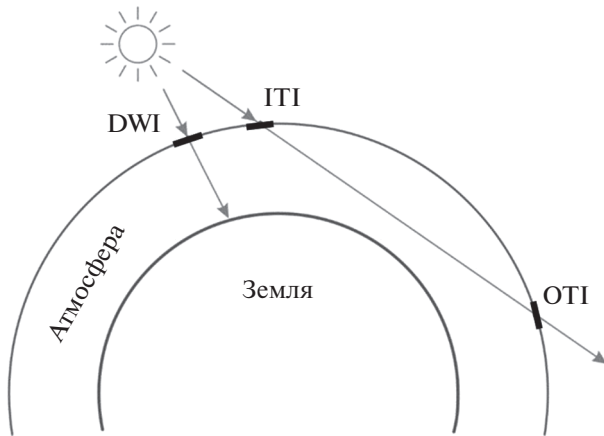


Рис. 1. Виды облучения ячеек поверхности высотного уровня: DWI, INI, OTI.

(Дж) облучения широтной зоны в каждой части тропических года: E_{DW} – падающая энергия, E_{IT} – входящая транзитная энергия, E_{OT} – выходящая транзитная энергия. Эти характеристики были вычислены с 3000 года до н. э. по 2999 г. н. э.

Для дальнейшего анализа вычислялись удельные энергетические характеристики (Дж/м²): DW – удельная падающая энергия, IT – удельная входящая транзитная энергия, OT – удельная выходящая транзитная энергия, $B = IT - OT$ – баланс удельных транзитных энергий. Для указания высотных уровней обозначения могут дополняться нижним индексом, указывающим высотный уровень в километрах, например, DW_{10} , IT_{10} , OT_{10} , B_{10} . Для указания средних многолетних значений обозначения дополняются буквами СМ в скобках: $DW(СМ)$, $IT(СМ)$, $OT(СМ)$, $B(СМ)$.

Основной целью настоящей работы было исследование пространственных и временных особенностей удельных характеристик транзитного облучения поверхностей высотных уровней, полуповерхностей и 5-градусных широтных зон в интервале с 3000 г. до н. э. по 2999 г. н. э.

МЕТОДИКА РАСЧЕТОВ

Рассматриваются поверхности и ограничиваемые ими тела на высотных уровнях 10, 20, 30, 40, 50, 60 км. Земная поверхность аппроксимируется эллипсоидом MRS80 с полуосями $A = 6378137$ м (две большие полуоси) и $B = 6356752$ м (малая полуось). Малая полуось этого эллипсоида совмещается с осью вращения Земли, вследствие чего он испытывает колебания относительно геоида (циклы Чандлера). Полуоси A и B с точностью до метра совпадают с полуосями общеземного эллипсоида GRS80 (Geodetic Reference System, 1980). Поверхности разделяются на северную и южную полуповерхности и на 5-градусные широтные зоны (используется геодезическая широта).

Рассматриваются тропические года, полугодия и месяцы с 3000 г. до н. э. по 2999 г. н. э. Для этих промежутков по аналогии с вычислением полной энергии $E_{DW} + E_{IT} + E_{OT}$ облучения каждой широтной зоны [8] вычисляются ее слагаемые E_{DW} , E_{IT} и E_{OT} (Дж) и по ним удельные энергии DW , IT , OT (Дж/м²), а также балансы $B = IT - OT$, средние многолетние (СМ) и для граничных лет (3000 до н. э. и 2999 н. э.).

Расчет E_{DW} , E_{IT} , E_{OT} (Дж) для широтной зоны (φ_1, φ_2) поверхности L -го высотного уровня (L – высота в км, $H = 1000L$ – высота в м) в интервале (t_1, t_2), выбранном на шкале равномерно текущего времени, выполняется по формулам:

$$E_{DW}(H, \varphi_1, \varphi_2, t_1, t_2) = 2 \int_{t_1}^{t_2} \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \sigma(H, \varphi) \int_{\alpha_1(H,t,\varphi)}^{\alpha_2(H,t,\varphi)} \Lambda(H, t, \varphi, \alpha) d\alpha d\varphi dt, \quad (1)$$

$$E_{IT}(H, \varphi_1, \varphi_2, t_1, t_2) = 2 \int_{t_1}^{t_2} \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \sigma(H, \varphi) \int_{\alpha_1(H,t,\varphi)}^{\alpha_m(H,t,\varphi)} \Lambda(H, t, \varphi, \alpha) d\alpha d\varphi dt, \quad (2)$$

$$E_{OT}(H, \varphi_1, \varphi_2, t_1, t_2) = -2 \int_{t_1}^{t_2} \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \sigma(H, \varphi) \int_{\alpha_m(H,t,\varphi)}^{\alpha_2(H,t,\varphi)} \Lambda(H, t, \varphi, \alpha) d\alpha d\varphi dt, \quad (3)$$

где α – часовой угол Солнца (в радианах) в момент t (измеряется в секундах) в точке Р с геодезической широтой φ (в радианах), находящейся на поверхности; $\sigma(H, \varphi)$ – площадной множитель в точке Р; $\sigma(H, \varphi) d\alpha d\varphi$ – площадь (м²) бесконечно малой трапеции с центром в точке Р (трапеция является ячейкой поверхности); $\Lambda(H, t, \varphi, \alpha)$ – интенсивность облучения (Вт/м²) этой трапеции в малой окрестности момента t , взятая со знаком плюс при направлении лучей внутрь тела, ограниченного поверхностью, и со знаком минус при направлении лучей из этого тела; $\alpha_1(H, t, \varphi)$, $\alpha_m(H, t, \varphi)$, $\alpha_2(H, t, \varphi)$ – пределы интегрирования по α . Величины вычисляются с долями единиц измерения.

Неравенство $\alpha_1(H, t, \varphi) < |\alpha| < \alpha_m(H, t, \varphi)$ определяет множество значений α , при которых в малой окрестности точки Р имеет место входящее транзитное облучение ячейки поверхности, неравенство $\alpha_m(H, t, \varphi) < |\alpha| < \alpha_2(H, t, \varphi)$ – множество значений α , при которых имеет место выходящее транзитное облучение. Каждое из указанных множеств может быть пустым.

Величины $\sigma(H, \varphi)$, $\Lambda(H, t, \varphi, \alpha)$, $\alpha_1(H, t, \varphi)$, $\alpha_m(H, t, \varphi)$, $\alpha_2(H, t, \varphi)$ и моменты $\{t_{nm}\}$, соответствующие началам тропических суток (n – номер тропического года, m – номер суток в году), используемые для формирования границ интегри-

Таблица 1. Полугодовые $IT(СМ)$, $OT(СМ)$ и $B(СМ)$ при $L = 10$ и 60 км

L , км	Летнее полугодие			Зимнее полугодие		
	$IT(СМ)$, МДж/м ²	$OT(СМ)$, МДж/м ²	$B(СМ)$, МДж/м ²	$IT(СМ)$, МДж/м ²	$OT(СМ)$, МДж/м ²	$B(СМ)$, МДж/м ²
10	16.91774	16.70080	+0.21694	16.70056	16.91750	-0.21694
60	101.2567	98.10920	+3.14750	98.10770	101.2552	-3.14750

рования по t в формулах (1)–(3), вычисляются аналогично тому, как это сделано в работе [8], на основании высокоточных астрономических эфемерид DE406. Исходными данными для расчетов служат склонение и эклиптическая долгота Солнца, расстояние от Земли до Солнца, разность хода равномерно текущего (СТ – Coordinate Time) и всемирного корректируемого времени (УТ – Universal Time). Солнечная постоянная (среднее многолетнее значение TSI) принимается равной 1361 Вт/м^2 [21].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

1. Характеристики транзитного облучения целых поверхностей

Для целой поверхности каждого высотного уровня в любом промежутке времени входящая транзитная энергия равна выходящей, из чего следует равенство удельных транзитных энергий $IT = OT$ и нулевой баланс $B = 0$. Равенство транзитных энергий при отсутствии поглощения и рассеяния солнечных лучей в атмосфере объясняется тем, что каждый малый конус транзитных лучей в каждый момент пересекает целую поверхность дважды, а энергия, проходящая через поперечное сечение конуса, не зависит от дальности до вершины конуса и от наклона сечения.

Годовая $IT(СМ)$ возрастает от 3.362 МДж/м^2 на высотном уровне $L = 10$ км до 19.936 МДж/м^2 на уровне $L = 60$ км. Процентное отношение годовой $IT(СМ)$ к годовой удельной падающей энергии $DW(СМ)$ возрастает от 0.304% при $L = 10$ км до 1.893% при $L = 60$ км (рост практически линейный). Область поверхности высотного уровня, где ячейки подвергаются транзитному облучению, в каждый момент намного меньше области, где ячейки подвергаются падающему облучению, но с высотой относительная площадь области транзитного облучения увеличивается.

Полугодовая $IT(СМ)$ для целой поверхности, совпадая с полугодовой $OT(СМ)$, равна $1/2$ годовой $IT(СМ)$ и в первом, и во втором полугодии. Среднемесячная $IT(СМ)$, совпадая со среднемесячной $OT(СМ)$, равна $1/12$ годовой $IT(СМ)$. При этом на каждом высотном уровне месячная $IT(СМ)$ отклоняется от среднемесячной в диапазоне от -0.01% вблизи равноденствий до $+0.01\%$ вблизи солнцестояний.

2. Характеристики транзитного облучения полу-поверхностей

Для полуповерхностей каждого уровня годовые $IT(СМ)$ и $OT(СМ)$ совпадают с годовыми $IT(СМ)$ и $OT(СМ)$ для целой поверхности и поэтому годовой баланс $B(СМ) = 0$. Полугодовые $IT(СМ)$, $OT(СМ)$ и $B(СМ)$ возрастают по модулю при изменении высотного уровня от $L = 10$ км к $L = 60$ км. Данные для этих уровней представлены в табл. 1.

Полугодовой баланс для каждой полуповерхности положителен в летнем полугодии (для северной полуповерхности это первое астрономическое полугодие, для южной – второе) и отрицателен в зимнем (для северной полуповерхности это второе астрономическое полугодие, для южной – первое), причем модули полугодовых балансов одинаковы. Модуль полугодового баланса в процентах от среднего значения между полугодовой $IT(СМ)$ и полугодовой $OT(СМ)$ изменяется от 1.29% при $L = 10$ до 3.16% при $L = 60$. То есть контраст между полугодовыми транзитными энергиями для каждой полуповерхности в каждом полугодии с высотой увеличивается.

Годовой ход месячных $IT(СМ)$, $OT(СМ)$ и $B(СМ)$ для северной полу-поверхности представлен на рис. 2 и 3. Графики для южной полу-поверхности зеркальны относительно середины года с соответствующими графиками для северной полуповерхности.

Максимумы $IT(СМ)$ и минимумы $OT(СМ)$ отмечаются вблизи летнего солнцестояния (для северной полу-поверхности это 3-й и 4-й астрономические месяцы, для южной – месяцы 9 и 10), минимумы $IT(СМ)$ и максимумы $OT(СМ)$ – вблизи зимнего солнцестояния (для северной полуповерхности это месяцы 9 и 10, для южной – 3-й и 4-й астрономические месяцы). Процентное отклонение экстремумов от среднего значения, которое и для месячных $IT(СМ)$, и для месячных $OT(СМ)$ равно $1/12$ годовой $IT(СМ)$ целой поверхности, возрастает от 0.98 – 1.00% на высотном уровне $L = 10$ км до 2.41 – 2.43% на уровне $L = 60$ км.

Месячный $B(СМ)$ для каждой полуповерхности максимален и положителен вблизи летнего солнцестояния, минимален и отрицателен, с тем же модулем, вблизи зимнего солнцестояния. Максимальное процентное отклонение модуля месячного $B(СМ)$ от среднего значения между месяч-

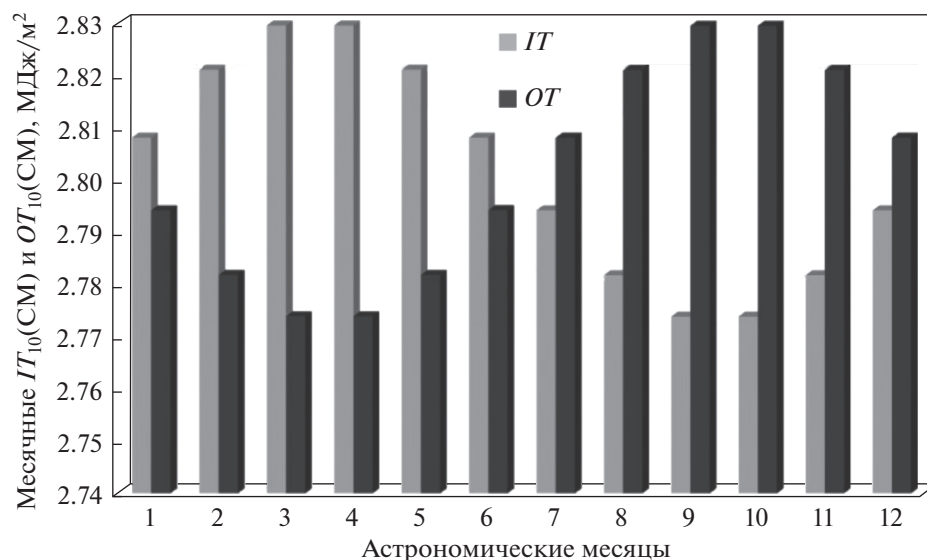


Рис. 2. Месячные $IT(СМ)$ и $OT(СМ)$ для северной полу-поверхности на высотном уровне 10 км.

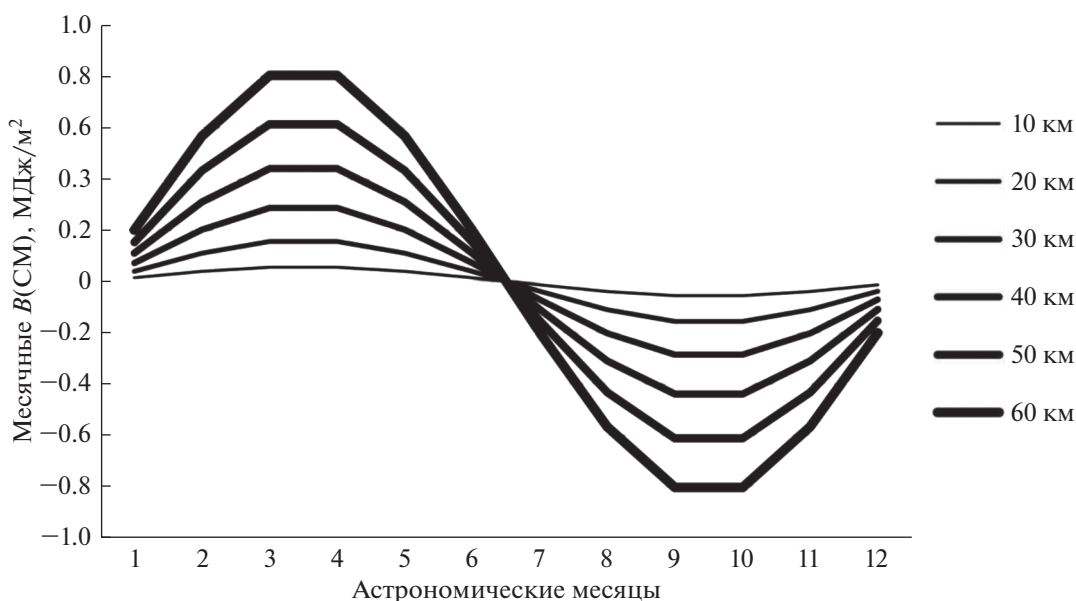


Рис. 3. Месячные $B(СМ)$ для северной полу-поверхности на разных высотных уровнях.

ной $IT(СМ)$ и месячной $OT(СМ)$ увеличивается от 1.98% на уровне $L = 10$ км до 4.84% на уровне $L = 60$ км. Таким образом, контраст между месячными транзитными энергиями вблизи солнцестояний для каждой полуповерхности значительно выше (по указанным процентам в полтора раза на каждом высотном уровне), чем контраст между полугодовыми транзитными энергиями.

3. Характеристики транзитного облучения 5-градусных широтных зон

3.1. Годовые характеристики. Для 5-градусных широтных зон поверхности высотного уровня среднее по этим зонам процентное отношение годовой

$IT(СМ)$ к годовой $DW(СМ)$ возрастает от 0.546% на уровне $L = 10$ км до 3.379% на уровне $L = 60$ км.

График годовых $IT(СМ)$ симметричен относительно экватора (рис. 4). Минимумы располагаются возле экватора, максимумы в зонах $65^{\circ}-70^{\circ}$ ($10 \leq L \leq 30$) либо $70^{\circ}-75^{\circ}$ ($40 \leq L \leq 60$). С ростом высотного уровня годовая $IT(СМ)$ для каждой зоны линейно растет. Минимумы, максимумы и значения у полюсов возрастают от 22.40, 82.21 и 53.66 МДж/м² на уровне $L = 10$ км до 133.4, 439.5 и 326.7 МДж/м² на уровне $L = 60$ км.

Графики годовых $OT(СМ)$ практически повторяют графики годовых $IT(СМ)$: отклонение не превышает 0.04% для каждой 5-градусной зоны.

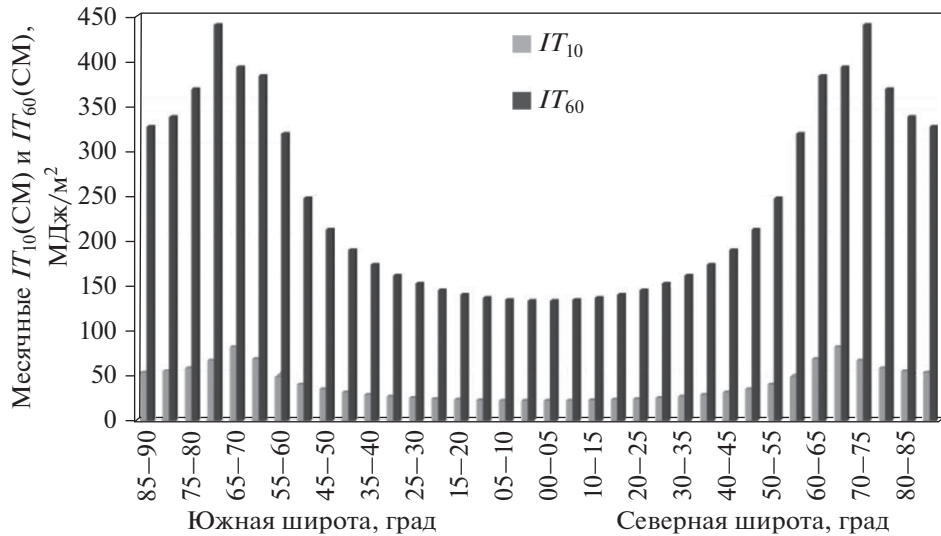


Рис. 4. Годовые $IT(SM)$ для 5-градусных зон на уровнях 10 и 60 км.

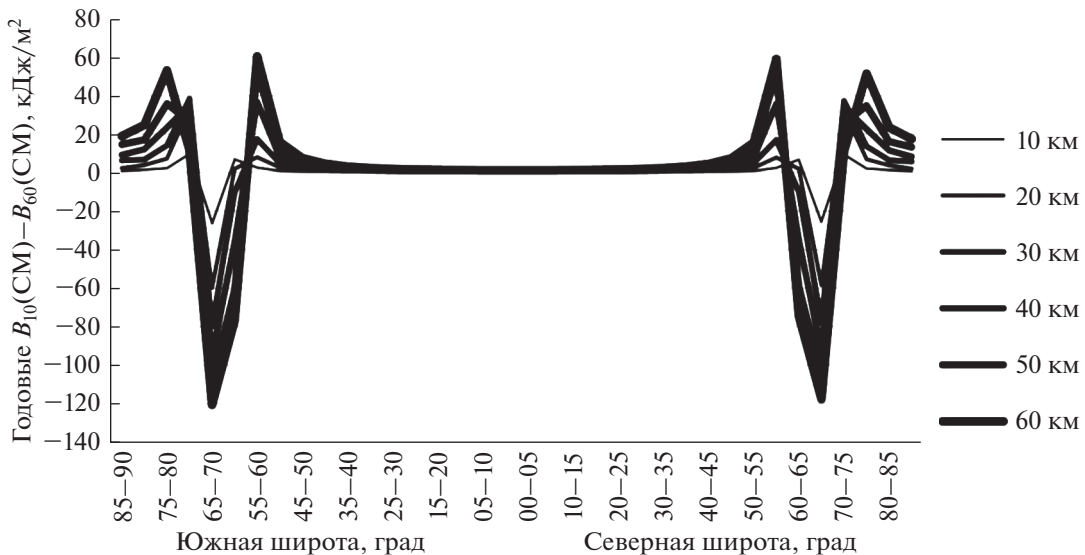


Рис. 5. Годовые $B(SM)$ для 5-градусных зон на разных высотных уровнях.

График годовых $B(SM)$ симметричен относительно экватора и отличается значительными колебаниями в высоких широтах (рис. 5).

От экватора к полюсу наблюдаются: локальный минимум в зоне $0^{\circ}-5^{\circ}$, локальный максимум в зоне $60^{\circ}-65^{\circ}$ ($L = 10$) либо $55^{\circ}-60^{\circ}$ ($20 \leq L \leq 60$), глобальный минимум в зоне $65^{\circ}-70^{\circ}$, локальный максимум в зоне $70^{\circ}-75^{\circ}$ ($10 \leq L \leq 40$) либо $75^{\circ}-80^{\circ}$ ($50 \leq L \leq 60$) и локальный минимум в зоне $85^{\circ}-90^{\circ}$. Перечисленные величины равны 0.08, 6.84, -26.33, 9.78 и 6.32 кДж/м² на уровне $L = 10$ км; 1.15, 60.33, -120.6, 53.2 и 19.0 кДж/м² на уровне $L = 60$ км.

При возрастании высотного уровня годовые $B(SM)$ большинства зон каждой полу-поверхно-

сти положительны и монотонно растут, за исключением трех зон. В зоне $60^{\circ}-65^{\circ}$ годовой $B(SM)$ убывает от положительного значения к отрицательному (смена знака происходит при переходе от уровня $L = 20$ км к уровню $L = 30$ км), в зоне $65^{\circ}-70^{\circ}$ – от одного отрицательного значения к другому. В зоне $70^{\circ}-75^{\circ}$ годовой $B(SM)$ положителен, возрастает до максимума при $L = 30$, затем убывает.

В зонах $60^{\circ}-65^{\circ}$ и $65^{\circ}-70^{\circ}$ ю. ш. и с. ш. вертикальный градиент годового $B(SM)$ (для уровня $L = 15$ км он определяется как $B_{20}(SM) - B_{10}(SM)$, для уровня $L = 25$ км как $B_{30}(SM) - B_{20}(SM)$ и т.д.) отрицателен на всех уровнях. В зонах $70^{\circ}-75^{\circ}$ ю.ш. и с.ш. на уровнях 15 и 25 км градиент положителен, на уровнях 35, 45, 55 км – отрицателен. Это

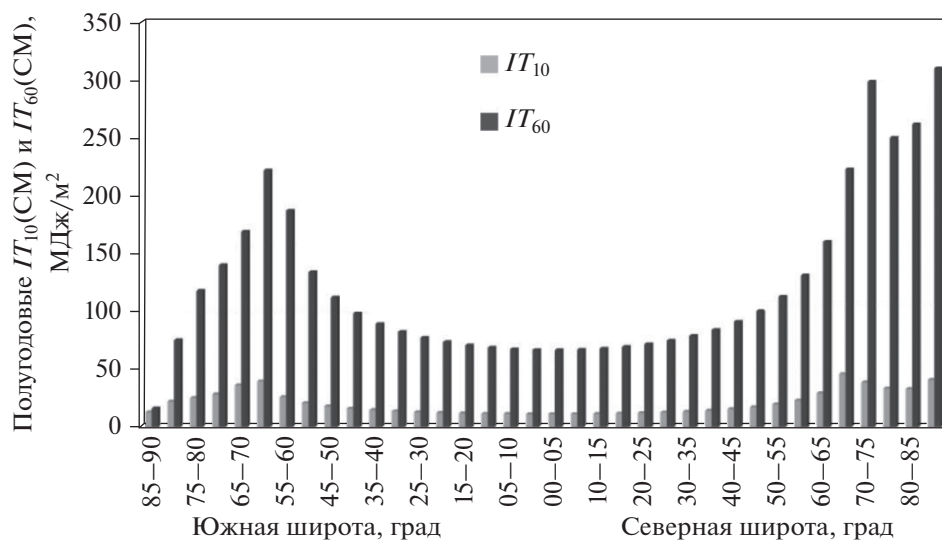


Рис. 6. Полугодовые $IT(СМ)$ для 5-градусных зон в первом полугодии на уровнях 10 и 60 км.

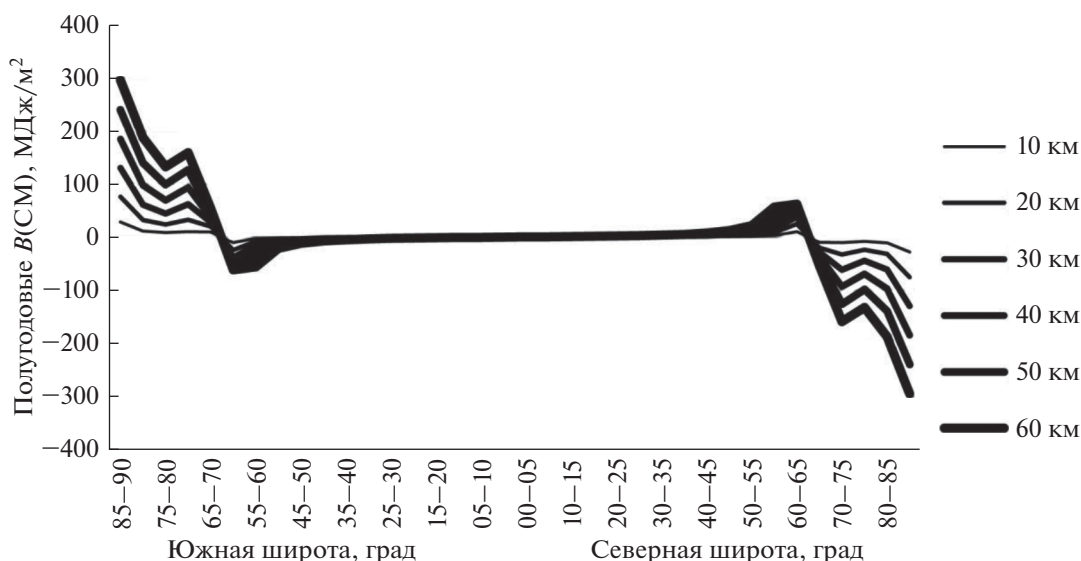


Рис. 7. Полугодовые $B(СМ)$ для 5-градусных зон в первом полугодии на разных высотных уровнях.

единственная пара зон, в которых вертикальный градиент меняет знак.

3.2. Полугодовые характеристики. Графики полугодовых $IT(СМ)$, $OT(СМ)$, $B(СМ)$ для 5-градусных зон поверхности каждого высотного уровня во втором полугодии тропического года зеркальны относительно экватора с аналогичными графиками первого полугодия. При этом графики полугодовых $IT(СМ)$ и $OT(СМ)$ в каждом полугодии почти зеркальны друг с другом относительно экватора (отклонения от строгой зеркальности составляют доли процента). На рис. 6 и 7 представлены графики полугодовых $IT(СМ)$ и $B(СМ)$ в первом полугодии.

В первом полугодии полугодовые $IT(СМ)$ для 5-градусных зон наиболее значительны (превышают среднее по всем зонам значение) в север-

ных широтах – в области 55° – 90° , в южных широтах – в области 50° – 85° (на уровне $L = 10$ км) либо 50° – 80° ($20 \leq L \leq 50$) либо 50° – 75° ($L = 60$). Наблюдаются шесть локальных экстремумов: первый минимум в зоне 85° – 90° ю.ш., первый максимум в зоне 60° – 65° ю.ш., второй минимум в зоне 0° – 5° с.ш., второй максимум в зоне 65° – 70° с.ш. ($L = 10$) либо 70° – 75° с.ш. ($20 \leq L \leq 60$), третий минимум в зоне 80° – 85° с.ш. ($L = 10$) либо 75° – 80° с.ш. ($20 \leq L \leq 60$) и третий максимум в зоне 85° – 90° с.ш. Глобальный минимум достигается в зоне 0° – 5° с.ш. ($L = 10$) либо 85° – 90° ю.ш. ($20 \leq L \leq 60$), глобальный максимум – в зоне 65° – 70° с.ш. ($L = 10$) либо 85° – 90° с.ш. ($20 \leq L \leq 60$). Экстремумы полугодовой $IT(СМ)$ от южного до северного полюса равны 12.76, 39.66, 11.20, 45.97, 33.06, 40.90 МДж/м² на уровне $L = 10$ км; 16.2, 222.3, 66.6,

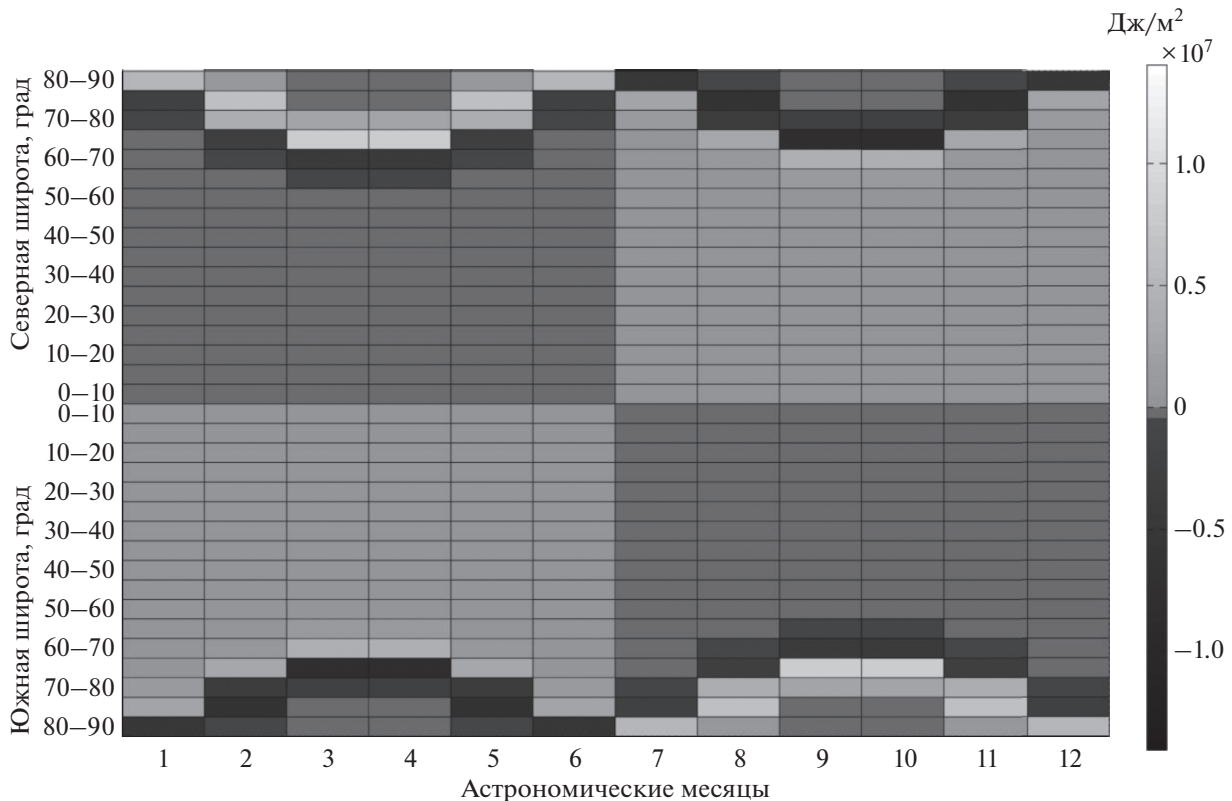


Рис. 8. Месячные $B(SM)$ для 5-градусных зон на уровне 10 км.

299.0, 250.3, 310.5 МДж/м² на уровне $L = 60$ км. При возрастании высотного уровня полугодовая $IT(SM)$ в зоне 85°–90° ю. ш. растет до уровня $L = 20$ км, затем практически не меняется, в остальных зонах наблюдается монотонный рост.

Полугодовой $B(SM)$ в первом полугодии минимален в зоне 85°–90° ю.ш. и максимален в зоне 85°–90° с.ш. Между крайними значениями наблюдаются локальные экстремумы: в южных широтах – отрицательный максимум в зоне 75°–80°, отрицательный минимум в зоне 70°–75°, положительный максимум в зоне 60°–65°, в северных широтах – отрицательный минимум в зоне 60°–65°, положительный максимум в зоне 70°–75°, положительный минимум в зоне 75°–80°. При этом полугодовой $B(SM)$ положителен от экватора до 65-й южной параллели и отрицателен далее до южного полюса; отрицателен от экватора до 65-й северной параллели и положителен далее до северного полюса. Экстремумы полугодовой $B(SM)$ от южного полюса до северного равны –28.11, –8.24, –10.29, 10.30, –10.30, 10.30, 8.25, 28.11 МДж/м² на уровне $L = 10$ км; –294.3, –132.0, –158.5, 61.6, –61.7, 158.5, 132.0, 294.3 МДж/м² на уровне $L = 60$ км. Модуль полугодовой $B(SM)$ монотонно растет с ростом L для каждой зоны.

3.3. Месячные характеристики. На рис. 8 и 9 приведены матрица среднемноголетних месячных балансов для 5-градусных зон и матрица при-

рашений месячных балансов от 3000 г. до н. э. до 2999 г. н. э. для уровня $L = 10$ км. Для остальных уровней матрицы аналогичны.

Для каждой полуповерхности высотного уровня (18 зон) в летнем полугодии (6 месяцев) в области от экватора до полярного круга отмечаются малые по модулю отрицательные месячные $B(SM)$, а в полярном районе (65°–90°) – высокие положительные месячные $B(SM)$, из-за которых полугодовой $B(SM)$ для этой полуповерхности в летнем полугодии положителен. В зимнем полугодии наоборот: в области от экватора до полярного круга отмечаются малые положительные месячные $B(SM)$, а в полярном районе – высокие по модулю отрицательные месячные $B(SM)$, приводящие к отрицательному полугодовому $B(SM)$ для этой полуповерхности в зимнем полугодии. В полярных районах в каждом полугодии локализуются высокие по модулю месячные $B(SM)$ обоих знаков – и положительные, и отрицательные.

Для каждой полуповерхности высотного уровня в летнем полугодии в области от экватора до полярного круга месячные балансы за 5999 лет увеличиваются, а в зимнем полугодии – уменьшаются. Однако, в полярных районах отмечаются и экстремальные уменьшения месячных увеличений, и экстремальные уменьшения месячных балансов. В результате полугодовой баланс для каждой полуповерхности в каждом полугодии уменьшается по модулю (в

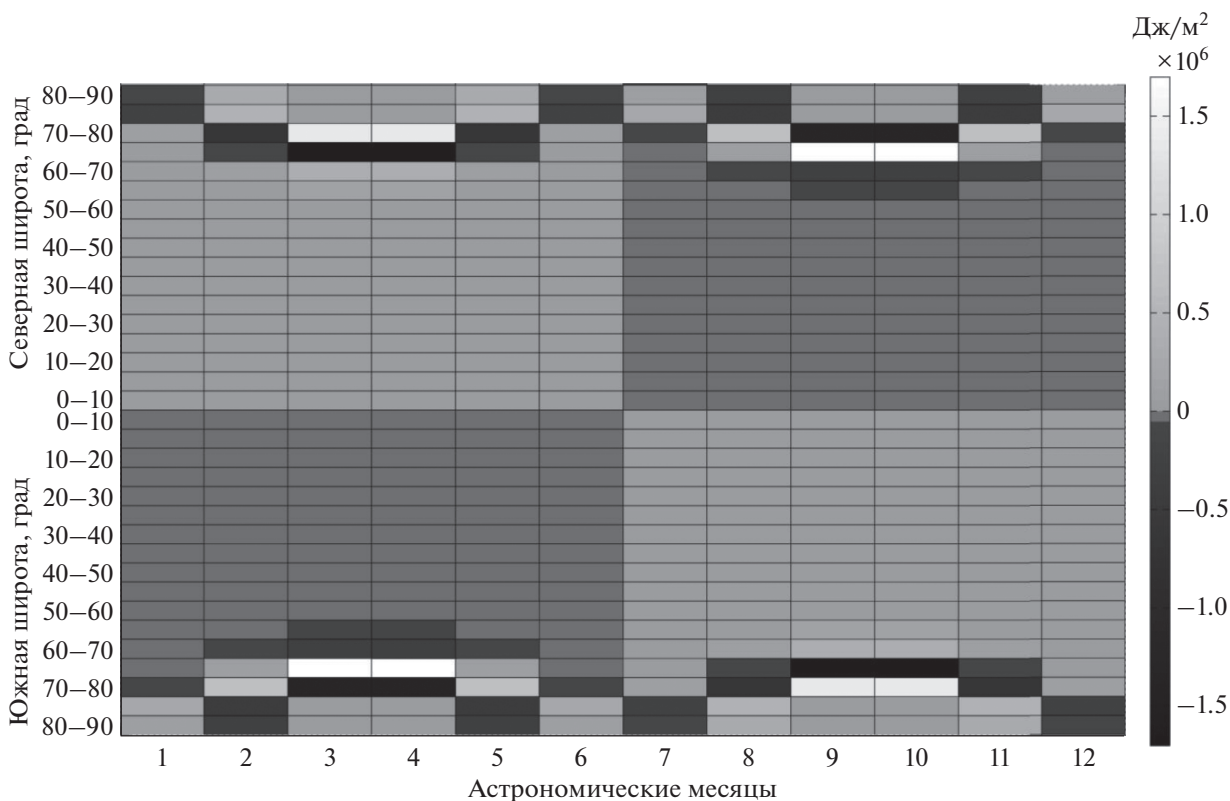


Рис. 9. Приращения месячных B для 5-градусных зон на уровне 10 км за 5999 лет.

летнем полугодии положительный баланс уменьшается, а в зимнем полугодии отрицательный баланс увеличивается). Этот эффект объясняется уменьшением угла наклона земной оси и уменьшением сезонных различий в облучении каждого полушария Земли. Абсолютное убывание модуля полугодичного баланса для полуповерхности за 5999 лет наиболее значительно на высотном уровне $L = 60$ км, относительное убывание – на уровне $L = 20$ км (табл. 2).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для целой поверхности любого высотного уровня баланс удельных транзитных энергий равен нулю за любой промежуток времени (при от-

сутствии ошибок вычислений, без учета поглощения и рассеяния солнечных лучей в атмосфере). Для полуповерхности и 5-градусной зоны баланс отличен от нуля при наличии транзитного облучения (оно отсутствует для трех зон вокруг каждого полюса вблизи солнцестояний).

Годовые балансы для широтных зон имеют резкий отрицательный минимум в зонах 65° – 70° ю.ш. и с.ш. На высотных уровнях начиная с 30 км отрицательные значения наблюдаются также в зонах 60° – 65° ю.ш. и с.ш. Отрицательные значения окружены высокими положительными значениями в прилегающих зонах. Вертикальный градиент годового баланса для зон 60° – 65° и 65° – 70° ю.ш. и с.ш. отрицателен на всех уровнях, для зон 70° – 75° ю.ш. и с.ш. – начиная с уровня $L = 35$ км. Для всех остальных зон вертикальный градиент положителен на всех уровнях. Области, где вертикальный градиент отрицателен на всех уровнях, совпадают с областями внетропического циклогенеза, высотных фронтальных зон и струйных течений.

Полугодовые балансы для широтных зон каждой полуповерхности в летних полугодиях положительны в области 65° – 90° и отрицательны в области 0° – 65° на всех высотных уровнях. В зимних полугодиях наоборот: отрицательны в области 65° – 90° и положительны в области 0° – 65° . Вместе с тем полугодичный баланс для полуповерхности положителен в летнем и отрицателен в зимнем полу-

Таблица 2. Сокращение модуля полугодичного баланса для полуповерхности для разных высотных уровней за 5999 лет

L , км	кДж/м ²	%
10	6.811	3.091
20	19.94	3.209
30	36.41	3.198
40	54.71	3.131
50	76.63	3.144
60	98.66	3.089

годии. Таким образом, полугодовые балансы для зон наиболее значительны в полярных областях.

Месячные балансы для каждой полуповерхности максимальны (положительны) вблизи летних солнцестояний, минимальны (отрицательны) вблизи зимних солнцестояний, близки к нулю вблизи равноденствий.

Приращения месячных балансов для зон каждой полуповерхности с 3000 г. до н. э. по 2999 г. н. э. в летнем полугодии от экватора до полярных кругов малы по модулю и положительны, в зимнем полугодии малы по модулю и отрицательны. В полярной области (65° – 90°) отмечаются как положительные, так и отрицательные приращения, высокие по модулю. В результате этих изменений модуль полугодического баланса для каждой полу-поверхности в каждом полугодии за 5999 лет сокращается.

Вычисленные массивы характеристик транзитного облучения 5-градусных широтных зон поверхностей высотных уровней в тропических годах и их частях с 3000 г. до н. э. по 2999 г. н. э. могут быть использованы при исследовании особенностей термобарического поля, а также фотохимических реакций и процессов ионизации в плотных слоях атмосферы.

Работа выполнена в рамках тем государственного задания “Эволюция, современное состояние и прогноз развития береговой зоны Российской Арктики” (121051100167-1) и “Опасность и риск природных процессов и явлений” (121051300175-4).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кондратьев К.Я., Никольский Г.А., Есипова Е.Н. Аэростатные исследования радиационных потоков в свободной атмосфере // Изв. АН СССР, сер. физ. атм. и океана. 1966. Т. 2. № 4. С. 380–393.
2. Макарова Е.А., Харитонов А.В., Казачевская Т.В. Поток солнечного излучения. М.: Наука, 1991.
3. Миланкович М. Математическая климатология и астрономическая теория колебаний климата. М.–Л.: ГОНТИ, 1939.
4. Монин А.С. Введение в теорию климата. Л.: Гидрометеоиздат, 1982.
5. Федоров В.М. Солнечная радиация и климат Земли. М.: Физматгиз, 2018.
6. Федоров В.М. Вариации инсоляции Земли и особенности их учета в физико-математических моделях климата // Успехи физических наук. 2019. Т. 189. № 1. С. 33–46. <https://doi.org/10.3367/UFN.2017.12.038267>
7. Федоров В.М. Исторические этапы в изучении многолетних вариаций солнечной активности // Жизнь Земли. 2019. Т. 41. № 2. С. 138–147
8. Федоров В.М., Костин А.А., Фролов Д.М. Особенности удельной энергии облучения тонких слоев атмосферы // Труды XXIV всероссийской ежегодной конференции “Солнечная и солнечно-земная физика – 2020”, СПб, 2020. С. 301–304.
9. 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.
10. Berger A. Long-term variation of caloric insolation resulting from the Earth's orbital elements // Quat. Res. 1978. V. 9. P. 139–167.
11. Berger A., Loutre M.F., Yin Q. Total irradiation during any time interval of the year using elliptic integrals // Quaternary science reviews. 2010. V. 29. P. 1968–1982. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2010.05.07>
12. Bertrand C., Loutre M.F., Berger A. High frequency variations of the Earth's orbital parameters and climate change // Geophys. Res. Lett. 2002. V. 29. № 18. P. 401–403. <https://doi.org/10.1029/2002GL015622>
13. Borisenkov E.P., Tsvetkov A.V., Agaponov S.V. On some characteristics of insolation changes in the past and the future // Climatic Change. 1983. № 5. P. 237–244.
14. Cionco R.G., Soon W.W.-H. Short-Term Orbital Forcing: A Quasi-Review and a Reappraisal of Realistic Boundary Conditions for Climate Modeling // Earth-Science Reviews. 2017. V. 166. P. 206–222.
15. Fedorov V.M. Spatial and temporal variations in solar climate of the Earth in the present epoch // Izvestiya. Atmospheric and oceanic physics. 2015. V. 51. № 8. P. 779–791. <https://doi.org/10.1134/S0001433815080034>
16. Fedorov V.M., Frolov D.M. Spatial and temporal variability of solar radiation arriving at the top the atmosphere // Cosmic Research. 2019. V. 57. № 3. P. 156–162. <https://doi.org/10.1134/S0010952519030043>
17. Fedorov V.M., Kostin A.A. The calculation of the Earth's insolation for the 3000 BC – AD 2999 // Processes in Geomed. 2020. № 1. P. 181–192. https://doi.org/10.1007/978-3-030-38177-6_20
18. Fröhlich C. Observations of irradiance variability // Space Science Reviews. 2000. V. 94. P. 15–24.
19. Fröhlich C. Total solar irradiance observations // Surveys in Geophysics. 2012. V. 33. P. 453–473. <https://doi.org/10.1007/s10712-011-9168-5>
20. <http://www.pmodwrc.ch>
21. Kopp G., Lean J. A new lower value of total solar irradiance: Evidence and climate significance // Geophys. Res. Lett. 2011. V. 37. L01706. <https://doi.org/10.1029/2010GL045777>
22. Laskar J., Joutel F., Boudin F. Orbital, precessional and insolation quantities for the Earth from –20 Myr to +10 Myr // Astron. and Astrophys. 1993. V. 287. P. 522–533.
23. Loutre M.F., Berger A., Bretagnon E., Blanc P.-L. Astronomical frequencies for climate research at the decadal to century time scale // Climate dynamics. 1992. V. 7. P. 181–194.
24. Vernekar A. Long-period global variations of incoming solar radiation // Series: Meteorological Monographs. American Meteorological Society. 1972. V. 12. № 34.
25. Willson R.C., Mordvinov A.V. Secular total solar irradiance trend during solar cycles 21 and 22 // Geophys. Res. Lett. 2003. V. 30. P. 1199–1202. <https://doi.org/10.1029/2002GL016038>