

КЛИМАТ И КРИОСФЕРА

УДК 551.551.1+551.581

DOI: 10.15372/KZ20230305

ИЗМЕНЕНИЕ ОБЛУЧЕНИЯ ЗЕМЛИ В ГОЛОЦЕНЕ

В.М. Федоров^{1,*}, Д.М. Фролов¹, Е.А. Агафонова²¹ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, географический ф-т,
119991, Москва, Ленинские горы, 1, Россия² Институт океанологии им. П.П. Шириова РАН, 117997, Москва, Нахимовский просп., 36, Россия*Автор для контакта, fedorov.msu@mail.ru

Исследуется изменение инсоляции Земли по широтам и сезонам в отдельные геохронологические периоды голоцена. Проводится сравнительный анализ облучения в граничные годы геохронологических периодов голоцена с современной инсоляцией (2022 г.). Отдельно анализируется изменение летней инсоляции в полушариях в пределах голоцена. Получены количественные оценки изменения интенсивности облучения для геохронологических периодов голоцена и сравнительная оценка относительно современного облучения. Определены экстремумы летней инсоляции в Северном полушарии, с которыми синхронизируются глобальные палеогеографические события голоцена: переход от холодной плейстоценовой эпохи к теплой голоценовой и Малый ледниковый период. Показано, что изменение летнего облучения Северного полушария, определяемое характеристиками орбитального движения Земли, является фактором отмеченных глобальных палеогеографических событий, а ареной их возникновения и преимущественного развития является Северное полушарие Земли.

Ключевые слова: изменение климата, инсоляция, инсоляционные температуры, приповерхностная температура воздуха, инсоляционная контрастность, меридиональный градиент температуры, тенденции и причины изменения.

Ссылка для цитирования: Федоров В.М., Фролов Д.М., Агафонова Е.А. Изменение облучения Земли в голоцене // Криосфера Земли, 2023, т. XXVII, № 3, с. 58–70. DOI: 10.15372/KZ20230305.

CHANGES IN THE EARTH'S INSOLATION DURING THE HOLOCENE

V.M. Fedorov^{1,*}, D.M. Frolov¹, E.A. Agafonova²¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography,
Leninskie Gory 1, Moscow, 119991 Russia² Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Science,
Nakhimovsky Prosp. 36, Moscow, 117997 Russia*Corresponding author, fedorov.msu@mail.ru

Changes in the Earth's insolation by latitudes and seasons in certain periods of the Holocene are considered. A comparative analysis of insolation in boundary years of Holocene geochronological periods with modern insolation (2022) is carried out. The change in summer insolation in the hemispheres is analyzed separately. Quantitative estimates in the intensity of insolation's changes in the Holocene are assessed with respect to the modern insolation. The extremes of summer insolation in the Northern hemisphere are synchronized with the global paleogeographic events of the Holocene: the transition from the cold Pleistocene epoch to the warm Holocene and the Little Ice Age. Characteristics of the Earth's orbital motion have also been shown to control the Northern hemisphere summer insolation's change, which is a factor of the noted global paleogeographic events.

Keywords: climate change, insolation, insolation temperatures, surface air temperature, insolation contrast, meridional temperature gradient, trends and causes of change.

ВВЕДЕНИЕ

Изменения состояния криосферы Земли в настоящем и будущем во многом определяются ее изменениями в прошлом. Поэтому информация о возможных причинах таких изменений представляется актуальной. Солнечная радиация является

основным источником энергии, определяющим радиационный, тепловой баланс Земли, а также ее поверхности и атмосферы и характер гидрометеорологических процессов. Происходящие в криосфере Земли процессы в основном регулируются

изменениями теплового баланса Земли, ее поверхности и атмосферы. Основной составляющей теплового баланса является приходящая от Солнца коротковолновая радиация. В связи с этим изучение пространственных и временных изменений приходящей солнечной радиации имеет большое значение для понимания происходящих в криосфере Земли процессов, их причин и возможного прогнозирования. Цель работы – исследование пространственных и временных изменений инсоляции Земли (интенсивности облучения (ИО), Вт/м²) в голоцене.

Вариации приходящей к Земле лучистой энергии определяются в основном двумя причинами, имеющими различную физическую природу. Одна из причин – изменение активности в излучении Солнца. Другой причиной, определяющей изменение приходящей к Земле солнечной радиации, являются небесно-механические процессы, вызывающие изменения элементов земной орбиты и наклона оси вращения [Миланкович, 1939; Монин, Шишков, 1979]. Известно, что суточный и годовой ход температуры следует за суточным и годовым ходом приходящей солнечной радиации. Суточный и годовой ход приходящей радиации связан с небесно-механическими процессами: вращением Земли вокруг оси, имеющей наклон, и движением Земли по эллиптической орбите вокруг Солнца. В связи с обусловленностью годового хода температуры годовым ходом инсоляции была рассчитана приходящая к Земле солнечная радиация на период 12 тыс. лет в прошлое от настоящего времени (2022 г. н.э.).

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ИНСОЛЯЦИИ

Инсоляция Земли (интенсивность облучения, Вт/м²) рассчитывалась с большим пространственным и временным разрешением. Расчеты выполнялись по данным высокоточных астрономических эфемерид (DE-441, NASA) [http://ssd.jpl.nasa.gov, 2022] для всей поверхности Земли (без учета атмосферы) в интервале от 10 000 г. до н.э. по 2022 г. н.э. Исходными астрономическими данными для расчетов инсоляции были: склонение и эклиптическая долгота Солнца, расстояние от Земли до Солнца, разность хода равномерно текущего координатного времени (Coordinate Time) и всемирного корректируемого времени (Universal Time). Поверхность Земли аппроксимировалась эллипсоидом Geodetic Reference System 1980 (GRS80) с длинами полуосей, равными 6 378 137 м (большие) и 6 356 752 м (малая). В общем виде алгоритм расчетов можно представить выражением

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

где I – приходящая солнечная радиация за элементарный n -й фрагмент m -го тропического года, Дж;

α – часовой угол; σ – площадной множитель, м², с помощью которого вычисляется площадной дифференциал $\sigma(\varphi)d\alpha d\varphi$ (площадь бесконечно малой трапеции – ячейки эллипсоида); φ_1, φ_2 – географические широты, выраженные в радианах; $\Lambda(t, \varphi, \alpha)$ – солнечная радиация в заданный момент в заданном месте поверхности эллипсоида, Вт/м²; t – время, с. Шаги при интегрировании составляли: по долготе 1°, по широте 1°, по времени 1/360 от продолжительности тропического года с учетом ее изменения. Изменение активности Солнца не учитывалось. Значение солнечной постоянной (среднее многолетнее значение TSI – Total Solar Irradiance) принималось равным 1361 Вт/м². Методика выполненных расчетов приходящей на эллипсоид Земли (без учета атмосферы) солнечной энергии подробно изложена в [Fedorov, Kostin, 2020].

ИЗМЕНЕНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ОБЛУЧЕНИЯ В ГЕОХРОНОЛОГИЧЕСКИЕ ПЕРИОДЫ ГОЛОЦЕНА

Для геохронологической периодизации голоцена была принята модифицированная схема Блитта–Сернандера в трактовке Я. Мангеруда с соавторами [Mangerud et al., 1974] (см. таблицу). Согласно решению стратиграфической комиссии INQUA, нижняя граница голоцена проводится по рубежу 11 700 календарных лет назад (кал. л.н.) [Walker et al., 2019].

Для каждого геохронологического периода голоцена исследуется изменение инсоляции Земли по географическим широтам и астрономическим сезонам. Анализируются матрицы изменения инсоляции, полученные как разности матрицы пространственно-временного распределения интенсивности солнечной радиации в год окончания геохронологического периода и матрицы года его начала. Матрица интенсивности облучения представляет собой распределение интенсивности облучения Земли по 5-градусным широтным зонам с разрешением по времени в 1 астрономический месяц (а.м.) (рис. 1). Напомним, что тропическим годом называется промежуток времени между двумя последовательными прохождением Земли в ее орбитальном движении точки весеннего равноденствия [Федоров, 1999, 2002]. Тропиче-

Схема геохронологической периодизации голоцена

Геохронологический период	Начало, лет назад	Окончание, лет назад
Пребореальный	11 700	10 800
Бореальный	10 800	8100
Атлантический	8100	5800
Суббореальный	5800	2600
Субатлантический	2600	Настоящее время

Примечание. Даты откалиброваны и приводятся в календарных годах [Агафонова, 2021].

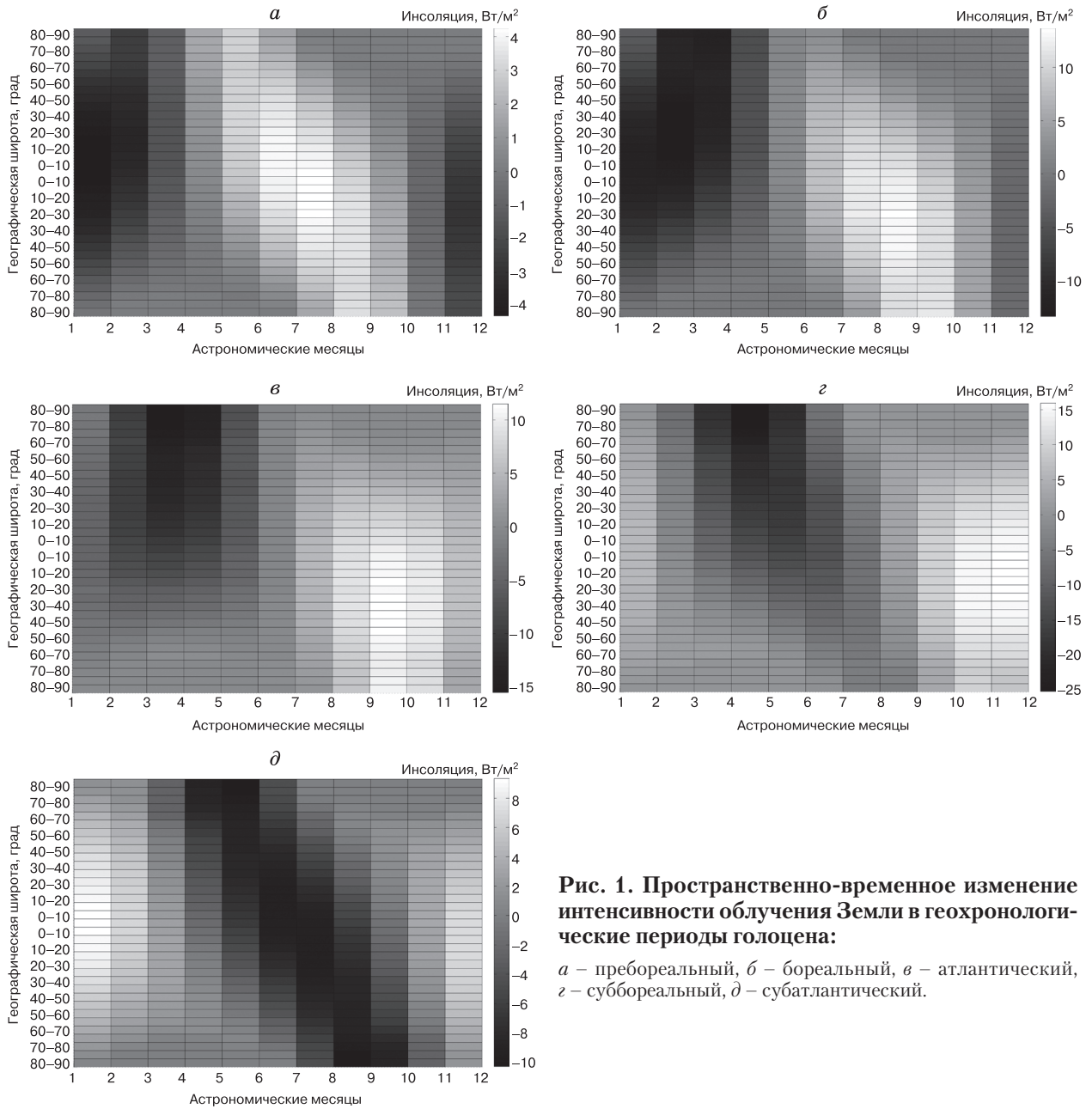


Рис. 1. Пространственно-временное изменение интенсивности облучения Земли в геохронологические периоды голоцена:

а – пребореальный, *б* – бореальный, *в* – атлантический, *г* – суббореальный, *д* – субатлантический.

ский год включает два полугодия, каждое из которых состоит из двух астрономических сезонов (весенний и летний, осенний и зимний). За начало первого астрономического полугодия и окончание второго астрономического полугодия принимается точка весеннего равноденствия. Первое астрономическое полугодие соответствует летнему полугодию в Северном полушарии и зимнему полугодию в Южном. За окончание первого астрономического полугодия и начало второго принимается точка осеннего равноденствия. Второе астрономическое полугодие соответствует зимнему полугодию в Северном полушарии и летнему

полугодию в Южном, начинается в точке осеннего равноденствия и заканчивается в точке весеннего равноденствия. Каждый сезон состоит из трех астрономических месяцев. За начало первого астрономического месяца принимается положение Земли в точке весеннего равноденствия, за начало четвертого – в точке летнего солнцестояния, седьмого – в точке осеннего равноденствия, десятого – в точке зимнего солнцестояния. При относительном постоянстве продолжительности тропического года продолжительность полугодий, сезонов и астрономических месяцев меняется значительно.

Вследствие изменения эксцентриситета земной орбиты и долготы перигелия разность в продолжительности полугодий (и сезонов) является функцией времени. В настоящее время, например, разница между продолжительностью первого и второго астрономических полугодий составляет около 8 сут. Тем не менее приходящая к Земле солнечная энергия в первое и второе полугодие приблизительно одинакова. Это определяется тем, что в более продолжительное полугодие Земля в орбитальном движении проходит через афелий, т. е. находится на более далеком расстоянии от Солнца, чем в менее продолжительное полугодие, в котором Земля проходит через перигелий. Изменение эксцентриситета, долготы перигелия и наклона оси приводит к тому, что приход солнечной радиации по широтам и сезонам со временем изменяется.

Прежде всего следует отметить наличие областей (ранее названных авторами “мертвыми” зонами), в которых облучение отсутствует в течение отдельных месяцев тропического года [Федоров, Фролов, 2019]. В этих областях, соответственно, нет изменений и в интенсивности облучения. “Мертвые” зоны проявляются в матрице пространственно-временного распределения интенсивности облучения для каждого тропического года в рассматриваемом интервале времени. Облучение в Южном полушарии отсутствует в течение 2–5 а.м. в широтной области 80–90° ю.ш., в течение 3–4 а.м. в области 70–80° ю.ш. В Северном полушарии солнечная радиация в течение 8–11 а.м. не поступает в широтную область 80–90° с.ш., в течение 9–10 а.м. – в область 70–80° с.ш.

Пребореальный период. От начала пребореального периода до его завершения отмечается сокращение ИО для астрономической весны (1–3 а.м.) и астрономической зимы (10–12 а.м.). Для астрономического лета и осени в основном отмечается увеличение интенсивности облучения. Максимальное сокращение ИО в этот период характерно для 1-го и 12-го а.м. Оно локализуется в 1-й а.м. в широтной области 10° ю.ш. – 30° с.ш., где составляет от 4.05 до 4.28 Вт/м² и в 12-й а.м. в области 20° ю.ш. – 5° с.ш., где сокращение ИО изменяется от 3.97 до 4.04 Вт/м² (см. рис. 1, а). Максимальное увеличение ИО в пребореальный период отмечается в 6-й и 7-й а.м. в областях 5° ю.ш. – 30° с.ш. (от 3.98 до 4.09 Вт/м²) и 35° ю.ш. – 15° с.ш. (3.92–4.26 Вт/м²).

Бореальный период. В течение бореального периода сокращение ИО проявляется в интервале с 1-го по 4-й а.м. и в 11-м и 12-м а.м. (т. е. относительно сокращения в пребореальный период оно смещается по ходу тропического года приблизительно на месяц). Увеличение ИО в этот период характерно для интервала с 5-го по 10-й а.м. (см. рис. 1, б). Максимальные сокращения ИО в

1-м а.м. локализуются в области 25° ю.ш. – 40° с.ш. (от 10.31 до 11.73 Вт/м²), во 2-м а.м. – в области 15° ю.ш. – 90° с.ш. (10.45–13.29 Вт/м²), в 3-м а.м. – в области 15° с.ш. – 90° с.ш. (10.22–12.15 Вт/м²). Таким образом, максимальное сокращение ИО преимущественно проявляется в Северном полушарии в 1–3 а.м. Максимальное увеличение ИО в бореальный период отмечается преимущественно в Южном полушарии. В 7-й а.м. максимальное увеличение ИО локализуется в области 25° с.ш. – 45° ю.ш. (10.12–11.91 Вт/м²), в 8-й а.м. – в области 15° с.ш. – 90° ю.ш. (10.37–13.66 Вт/м²), в 9-й а.м. – в области 10° ю.ш. – 90° ю.ш. (9.94–11.78 Вт/м²).

Атлантический период. В этот период сокращение характерно преимущественно для первого (1–6 а.м.), увеличение – для второго (7–12 а.м.) астрономического полугодия (см. рис. 1, в). Области максимального сокращения характерны для 3-го и 4-го а.м. и локализуются в областях 0° с.ш. – 90° с.ш. (9.79–15.52 Вт/м²) и 15° с.ш. – 90° с.ш. (10.32–14.24 Вт/м²). При этом сокращение ИО в эти астрономические месяцы увеличивается в направлении Северного полюса. Максимальное увеличение ИО в атлантический период отмечается в 9-й и 10-й а.м. Максимальное увеличение ИО локализовано в областях 0° ю.ш. – 90° ю.ш. (9.84–11.50 Вт/м²) и 15° ю.ш. – 45° ю.ш. (9.89–10.09 Вт/м²). Таким образом, области максимальных сокращений ИО в этот период (как и в бореальном периоде) расположены в Северном полушарии, а области максимального увеличения ИО – в Южном.

Суббореальный период. Сокращение ИО за этот период происходит преимущественно в интервале от 2-го до 7-го а.м., увеличение ИО отмечается в 1-й а.м. и в интервале 8–12 а.м. (см. рис. 1, г). Максимальное сокращение ИО отмечается в обширном регионе Северного полушария в интервале с 3-го по 5-й а.м. При этом сокращение в период 3–5 а.м. возрастает в направлении к Северному полюсу. В 3-й а.м. максимальные сокращения локализуются в области 15° с.ш. – 90° с.ш. (10.29–18.92 Вт/м²), в 4-й а.м. – в области 10° с.ш. – 90° с.ш. (10.56–25.14 Вт/м²), в 5-й а.м. – в области 20° ю.ш. – 90° с.ш. (9.8–19.61 Вт/м²). В 6-й а.м. максимальные сокращения ИО отмечаются в области 25° ю.ш. – 60° с.ш. (9.63–12.03 Вт/м²). Максимальное увеличение ИО отмечается в 10–12 а.м. в обширном регионе от Северного тропика до Южного полярного круга. В 10-й а.м. область максимального увеличения охватывает широтный диапазон от 30° с.ш. до 65° ю.ш. (10.55–15.25 Вт/м²), в 11-й а.м. – область от 35° с.ш. до 65° ю.ш. (10.84–15.93 Вт/м²), в 12-й а.м. – район от 30° с.ш. до 40° ю.ш. (10.41–12.39 Вт/м²).

Субатлантический период. Сокращение ИО отмечается в 3-й а.м. в северном Заполярье

(см. рис. 1, *д*), в 4-й а.м. – в области от Южного тропика до Северного полюса, в 5-й а.м. – в области от 60° с.ш. до Северного полюса, в 6-й и 7-й а.м. сокращение ИО отмечается во всех широтных зонах. В 8-й а.м. сокращение фиксируется в области от 55° с.ш., а в 9-й а.м. от 20° с.ш. до Южного полюса. В 10-й а.м. сокращение ИО локализуется в южном Заполярье. Максимальное сокращение в 4-й а.м. отмечается в северном Заполярье (7.77–8.77 Вт/м²), в 5-й а.м. – в области от 25° с.ш. до Северного полюса (7.77–10.16 Вт/м²) с увеличением сокращения в направлении к полюсу. В 6-й а.м. максимальное сокращение проявляется в области от 45° с.ш. до 15° ю.ш. (8.38–9.46 Вт/м²), в 7-й а.м. – в области от 10° с.ш. до 45° ю.ш. (8.47–9.46 Вт/м²), в 8-й месяц – в широтном диапазоне от 30° ю.ш. до Южного полюса (8.15–10.29 Вт/м²) и в 9-й месяц – в южном Заполярье (7.79–8.81 Вт/м²).

Увеличение ИО в субатлантический период происходит в 1-й и 12-й а.м. во всех широтных зонах, во 2-й а.м. во всех широтных зонах, кроме области 80–90° ю.ш., в 11-й а.м. – во всех широтных зонах, кроме области 80–90° с.ш. (“мертвые” зоны). В 3-й а.м. увеличение ИО отмечается в области от 50° с.ш. до 80° ю.ш., в 4-й а.м. – в области от 25° ю.ш. до 70° ю.ш., в 9-й а.м. – в области от 70° с.ш. до 25° с.ш., в 10-й а.м. – в диапазоне от 70° с.ш. до 55° ю.ш. Максимальные увеличения ИО отмечаются в 1-й а.м. в широтном диапазоне от 35° с.ш. до 25° ю.ш. (8.07–9.14 Вт/м²) и в 12-й а.м. в области от 25° с.ш. до 35° ю.ш. (8.25–9.34 Вт/м²). Таким образом, картина пространственно-временных изменений ИО в этом периоде более пестрая, чем в предшествующих периодах голоцена.

Для пребореального периода характерно увеличение облучения в летний и осенний астрономические сезоны, сокращение инсоляции происходит в весенний и зимний астрономические сезоны. В бореальном периоде увеличение инсоляции отмечается для двух последних месяцев летнего астрономического сезона, всего осеннего сезона и первого месяца астрономической зимы. Сокращение облучения характерно для всего весеннего и первого месяца летнего астрономического сезона, а также для двух месяцев, завершающих зимний сезон. В течение атлантического периода поступление солнечной радиации сокращается в первое астрономическое полугодие (весенний и летний астрономические сезоны в Северном полушарии) и увеличивается во второе астрономическое полугодие (осень, зима). В суббореальном периоде уменьшение инсоляции отмечается преимущественно для двух месяцев, завершающих весенний сезон, для всего летнего сезона и первого месяца астрономической осени. Приход солнечной радиации возрастает в первый весенний месяц, в течение двух месяцев, завершающих осенний сезон, и

в течение всего зимнего сезона. В субатлантический период облучение преимущественно возрастает в весенний и зимний астрономические сезоны, сокращается в летний и осенний.

Максимальные изменения ИО отмечаются для суббореального периода: максимальное сокращение в 4-й а.м. – в области 10° с.ш. – 90° с.ш. (10.56–25.14 Вт/м²), максимальное увеличение ИО в 11-й а.м. – в области от 35° с.ш. до 65° ю.ш. (10.84–15.93 Вт/м²). В изменении интенсивности облучения Земли в голоцене проявляется смещение областей сокращения и увеличения ИО в годовом ходе, что в основном определяется климатической прецессией – изменением угловых соотношений линии апсид (соединяющей афелий и перигелий орбиты) и линии узлов (соединяющей точки весеннего и осеннего равноденствия).

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ОБЛУЧЕНИЯ ЗЕМЛИ В ГРАНИЧНЫЕ ГОДЫ ХРОНОЛОГИЧЕСКИХ ПЕРИОДОВ С ЕЕ СОВРЕМЕННЫМ ОБЛУЧЕНИЕМ

Выше приведены количественные оценки пространственно-временных изменений интенсивности облучения Земли для геохронологических периодов голоцена. Для получения более полной картины изменения ИО рассчитаны количественные изменения интенсивности облучения в граничные годы хронологических периодов (см. таблицу) и 2022 г. н.э. Пространственно-временные изменения рассчитывались вычитанием из матрицы граничных годов матрицы интенсивности облучения 2022 г. (рис. 2). Приведенные данные позволяют получить приблизительную сравнительную оценку облучения (обеспеченности радиационным теплом без учета его переноса) отдельных широтных зон в различные астрономические месяцы граничных лет геохронологических периодов голоцена с приходящей солнечной радиацией в настоящее время. Такие оценки также получены впервые.

11 700 лет назад – начало пребореального периода. В это время Земля получала значительно больше солнечной радиации в первое астрономическое полугодие (летнее полугодие в Северном полушарии), чем получает в это полугодие в настоящее время, и гораздо меньше – во второе астрономическое полугодие (см. рис. 2, *а*). Максимальные превышения ИО относительно ее современных значений отмечаются в период со 2-го по 5-й а.м. В это время ИО превышала современные значения в обширной области – от 55–60° ю.ш. до Северного полюса. При этом величины превышений в эти астрономические месяцы возрастали в меридиональном направлении с юга на север от 1–2 Вт/м² в зоне 55–60° ю.ш. до максимальных значений в северной полярной зоне 85–90° с.ш. Здесь превышения ИО относительно ее современ-

ИЗМЕНЕНИЕ ОБЛУЧЕНИЯ ЗЕМЛИ В ГОЛОЦЕНЕ

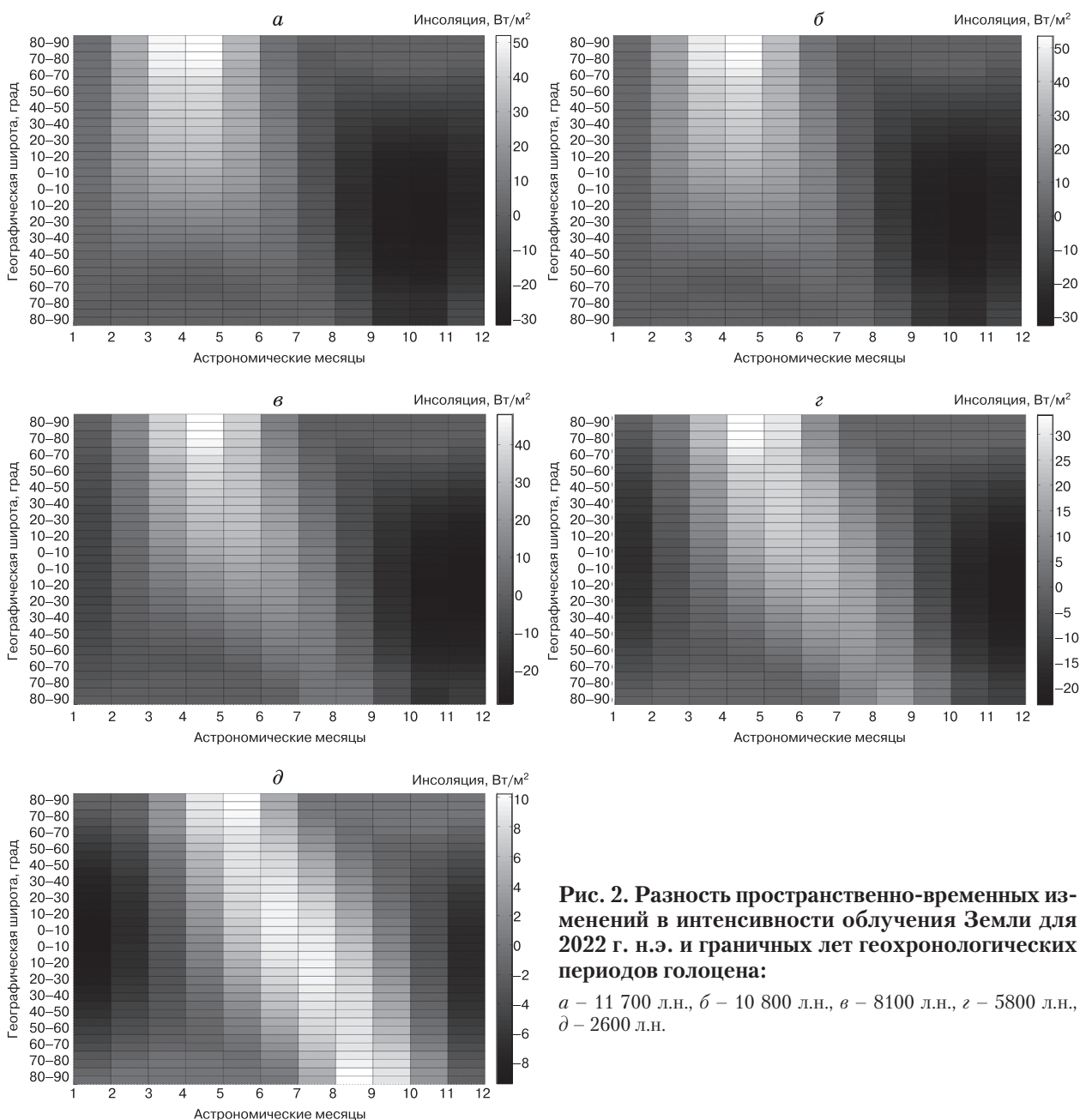


Рис. 2. Разность пространственно-временных изменений в интенсивности облучения Земли для 2022 г. н.э. и граничных лет геохронологических периодов голоцена:

a – 11 700 л.н., *б* – 10 800 л.н., *в* – 8100 л.н., *г* – 5800 л.н., *д* – 2600 л.н.

ных значений составляли во 2-й а.м. – 29.07 Вт/м², в 3-й а.м. – 50.70 Вт/м², в 4-й а.м. – 52.22 Вт/м², в 5-й а.м. – 32.11 Вт/м². Таким образом, Северное полушарие в первое астрономическое полугодие 11 700 л.н. получало значительно больше солнечной энергии, чем в настоящее время. Максимальные превышения современных значений ИО характерны для 2–5 а.м. в приполярных и заполярных областях Северного полушария.

Значения ИО 11 700 л.н. уступают ее современным значениям во второе астрономическое полугодие (зимнее в Северном полушарии). Максимально низкие (относительно современных) зна-

чения ИО по времени приходятся на 8–12 а.м., в пространстве они локализуются в области от 65–70° с.ш. до Южного географического полюса. При этом максимально низкие (относительно современных) значения ИО отмечаются в южной тропической области, где они максимально уступают современным в 8-й а.м. на 20.28 Вт/м² (5–10° ю.ш.), в 9-й а.м. – на 30.31 Вт/м² (15–20° ю.ш.), в 10-й а.м. – на 31.74 Вт/м² (10–20° ю.ш.), в 11-й – на 24.01 Вт/м² (10–15° ю.ш.). Таким образом, 11 700 л.н. во второе астрономическое полугодие (зимнее в Северном полушарии) Земля получала значительно меньше солнечной радиации (осо-

бенно в широтной области приблизительно от 45° с.ш. до южной полярной области), чем получает в это полугодие в отмеченной широтной области в настоящее время (2022 г. н.э.). Максимально низкие (относительно современных) значения ИО отмечаются в 9–10 а.м. в южной тропической области.

10 800 лет назад – начало бореального периода. В общем, распределение ИО мало меняется относительно начала пребореального периода. В первое астрономическое полугодие (летнее полугодие в Северном полушарии) 10 800 л.н. Земля по-прежнему получает больше солнечной радиации, во второе – меньше, чем в настоящее время (см. рис. 2, б). Максимальные превышения ИО над ее современными значениями характерны для 2–5 а.м. В пространстве они локализованы в области от Южного тропика до Северного географического полюса. При этом значения превышений возрастают в направлении к Северному полюсу. Так, превышение ИО 10 800 л.н. во 2-й а.м. изменяется от 10.39 Вт/м² (15–20° ю.ш.) до 26.54 Вт/м² (85–90° с.ш.), в 3-й а.м. – от 10.40 Вт/м² (25–30° ю.ш.) до 49.54 Вт/м² (85–90° с.ш.), в 4-й а.м. – от 9.68 Вт/м² (30–35° ю.ш.) до 53.84 Вт/м² (85–90° ю.ш.), в 5-й а.м. – от 9.56 Вт/м² (35–40° ю.ш.) до 35.16 Вт/м² (85–90° ю.ш.).

Значения ИО 10 800 л.н. во второе астрономическое полугодие (зимнее в Северном полушарии) в основном уступают соответствующим значениям ИО в 2022 г. Максимально низкие значения ИО относительно современных характерны для 9–12 а.м. В пространстве область максимально уступающих современным значений ИО локализуется в широтном диапазоне от 55° с.ш. до Южного географического полюса. При этом максимальные превышения современных значений ИО над соответствующими значениями 10 800 л.н. отмечаются в экваториальной и южной тропической областях. В 8-й а.м. максимально низкое относительно современного значение (уступающее на 16.99 Вт/м²) отмечается в широтном диапазоне 0–10° ю.ш., в 9-й и в 10-й а.м. – в широтной зоне 15–20° ю.ш. (28.71 и 32.48 Вт/м² соответственно), в 11-й а.м. – в зоне 10–15° ю.ш. (26.81 Вт/м²).

8100 лет назад – начало атлантического периода. Общая картина расположения значений ИО, превышающих и уступающих современным, сохраняется. Значения ИО 8100 л.н. по-прежнему превышают современные в первое астрономическое полугодие и уступают им во второе астрономическое полугодие. Однако в 1-м а.м. значения ИО 8100 л.н. во всех широтных зонах начинают уступать соответствующим современным значениям ИО (см. рис. 2, в), в 7-м а.м. они превышают соответствующие современные значения ИО. Область максимальных превышений ИО 8100 л.н. смещается в годовом ходе облучения и приходит-

ся на 3–6 а.м. При этом для 2–5 а.м. тенденция увеличения превышений в направлении к Северному полюсу сохраняется. В 6-й и 7-й а.м. такая тенденция не проявляется. Во 2-й а.м. превышения ИО изменяются от 10.67 Вт/м² в широтной зоне 55–60° с.ш. до 15.35 Вт/м² в зоне 85–90° с.ш., в 3-й а.м. – от 10.08 Вт/м² (10–15° ю.ш.) до 37.39 Вт/м² (85–90° с.ш.), в 4-й а.м. – от 9.86 Вт/м² (25–30° ю.ш.) до 48.21 Вт/м² (85–90° с.ш.), в 5-й – от 10.60 Вт/м² (35–40° ю.ш.) до 36.95 Вт/м² (85–90° с.ш.). В 6-й а.м. максимум превышения ИО (23.10 Вт/м²) локализуется в широтной зоне 10–20° с.ш., в 7-й месяц (11.50 Вт/м²) – в зоне 20–25° с.ш.

Максимально в 1-й а.м. значение ИО 8100 л.н. уступает современным в области от 25° ю.ш. до 15° с.ш. (10.46 Вт/м²). Во 2–5 а.м. значения ИО 8100 л.н. также уступают современным в высоких широтах Южного полушария. Область максимально низких (относительно соответствующих современных) значений ИО во второе астрономическое полугодие отмечается в 9–12 а.м. и смещается к югу относительно локализации, полученной для 11 700 и 10 800 л.н. В 9-й а.м. значения ИО 8100 л.н. максимально уступают современным (на 18.74 Вт/м²) в широтной зоне 5–10° ю.ш., в 10-й а.м. – на 27.82 Вт/м² в зоне 15–20° ю.ш., в 11-й – на 28.88 Вт/м² в зоне 15–10° ю.ш., в 12-й а.м. – на 22.29 Вт/м² в широтной зоне 0–5° ю.ш.

5800 лет назад – начало суббореального периода. Превышение ИО 5800 л.н. над современными значениями отмечается во 2-й а.м. в области от 60° с.ш. до 90° с.ш., в 3-й а.м. – от 25° ю.ш. до 90° с.ш., в 4-й а.м. – от 45° ю.ш. до 90° с.ш., в 5-й а.м. – от 60° ю.ш. до 90° с.ш. В 6-й и 7-й а.м. значения ИО 5800 л.н. превышают современные значения ИО во всех широтных зонах (см. рис. 2, г). В 8-й астрономический месяц превышения фиксируются в области от 30° с.ш. до 90° ю.ш., в 9-й а.м. – от 60° ю.ш. до 90° ю.ш. При этом превышения в период 2–5 а.м. возрастают к Северному полюсу, в период 8–9 а.м. – к Южному полюсу. Область максимальных превышений ИО 5800 л.н. в первое астрономическое полугодие отмечается в северной полярной области (85–90° с.ш.). Превышения во 2-й а.м. составляют 5.59 Вт/м², в 3-й а.м. – 21.87 Вт/м², в 4-й а.м. – 33.97 Вт/м², в 5-й а.м. – 29.81 Вт/м². В 6-й а.м. максимальное превышение, составляющее 21.41 Вт/м², отмечается в широтной зоне 10–15° с.ш., в 7-й (15.94 Вт/м²) – в зоне 15–20° ю.ш. В 8-й и 9-й а.м. максимальные превышения ИО отмечаются в южной полярной области 85–90° ю.ш. – 14.41 и 5.14 Вт/м² соответственно.

Значения ИО 5800 л.н. уступают современным значениям ИО в 1-й а.м. во всех широтных зонах. Во 2-й а.м. ИО 5800 л.н. оказывается

меньше современных значений ИО в области от 50° с.ш. до 80° ю.ш., в 3-й а.м. – в области от 30° ю.ш. до 70° ю.ш., в 4-й и 5-й а.м. – в широтных диапазонах 45–70° ю.ш. и 60–80° ю.ш. соответственно. Во второе астрономическое полугодие значения ИО 5800 л.н. в 8-й а.м. уступают современным в широтном диапазоне от 30° с.ш. до 80° с.ш., в 9-й а.м. – от 70° с.ш. до 60° ю.ш., в 10-й и 11-й а.м. – от 70° и 80° с.ш. до 85° и 90° ю.ш. соответственно. В 12-й а.м. ИО 5800 л.н. уступает современным значениям ИО во всех широтных зонах. Максимально значения ИО 5800 л.н. уступают современным в 1-й а.м. в диапазоне от 55° с.ш. до 50° ю.ш. с максимумом (15.22 Вт/м²) в широтной зоне 0–5° с.ш., в 10-й а.м. – в области от 45° с.ш. до 65° ю.ш. с максимумом (18.04 Вт/м²) в зоне 10–15° ю.ш., в 11-й а.м. – в области от 55° с.ш. до 75° ю.ш. с максимумом (23.08 Вт/м²) в широтной зоне 10–15° ю.ш., в 12-й а.м. – в широтном диапазоне от 60° с.ш. до 65° ю.ш. с максимумом (21.77 Вт/м²) в зоне 0–5° ю.ш.

2600 лет назад – начало субатлантического периода. Интенсивность облучения 2600 л.н. уступала современной ИО в начале и конце тропического года (преимущественно в 1–3 и 10–12 а.м.) и превосходила ее в середине года (преимущественно в 4–9 а.м.). В 1-й и 2-й а.м. ИО 2600 л.н. уступала современным значениям ИО во всех широтных зонах (за исключением “мертвых” зон) с максимальными значениями в тропических областях (см. рис. 2, з). Интенсивность облучения 2600 л.н. максимально уступала современным значениям ИО в широтном диапазоне приблизительно от 30° с.ш. до 30° ю.ш. в 1-й а.м. приблизительно на 9 Вт/м², во 2-й а.м. – на 6.5 Вт/м². В 8-й, 9-й и 10-й а.м. ИО 2600 л.н. уступает ее современным значениям в интервале от северных “мертвых” зон до 60° с.ш., 25° с.ш. и 55° с.ш. соответственно. Максимально ИО 2600 л.н. уступает современным значениям также в 11-й и 12-й а.м. в широтном диапазоне приблизительно от 25° с.ш. до 25° ю.ш. В это время максимально ИО 2600 л.н. уступает современным значениям в 11-й а.м. на 7.18 Вт/м² (в зоне 5–10° ю.ш.) и в 12-й а.м. на 9.38 Вт/м² (в зоне 0–5° ю.ш.)

ИО 2600 л.н. превышает ее современные значения в 3-й, 4-й и 5-й а.м. от северной полярной области (85–90° с.ш.) до широтных зон 45° с.ш., 25° ю.ш. и 60° ю.ш. соответственно. В 6-й и 7-й а.м. ИО 2600 л.н. превосходит современные значения во всех широтных зонах. В 8-й, 9-й и 10-й а.м. ИО 2600 л.н. превышает современные значения ИО от южной полярной области (85–90° ю.ш.) приблизительно до параллелей 55° с.ш., 20° с.ш. и 60° ю.ш. соответственно. Максимальные превышения ИО отмечаются в 4-й а.м. в северном Заполярье (от 8.42 до 8.83 Вт/м²), в 5-й а.м. в области приблизительно от 30° с.ш. до максимального значения

(10.20 Вт/м²) в северной полярной зоне (85–90° с.ш.). В 6-й а.м. область максимальных превышений локализуется приблизительно в интервале от 45° с.ш. до 20° ю.ш. с максимумом (9.49 Вт/м²) в зоне 10–15° с.ш. В 7-й а.м. максимальные превышения ИО отмечаются в широтном диапазоне от 20° с.ш. до 50° ю.ш. с максимумом (9.47 Вт/м²) в зоне 10–15° ю.ш. В 8-й и 9-й а.м. максимальные превышения фиксируются в области от Южного географического полюса до 35° ю.ш. и до 75° ю.ш. соответственно. При этом максимальные значения превышений ИО в эти астрономические месяцы отмечаются в южной полярной области: 10.29 Вт/м² – в 8-й а.м. и 8.80 Вт/м² – в 9-й а.м.

Для приближенной оценки полученных количественных характеристик, вероятно, следует напомнить, что размах изменений ИО для Земли в годовом ходе (от афелия к перигелию ее орбиты) составляет около 26 Вт/м².

Таким образом, в начале пребореального периода (11 700 л.н.) приходящая солнечная радиация превышала современную в первое астрономическое полугодие (весна, лето в Северном полушарии) и уступала ей во второе астрономическое полугодие (осень, зима). Максимальные превышения облучения характерны для Северного полушария, в полярных районах которого они достигают значений более 50 Вт/м². Максимально низкие (относительно современных) значения инсоляции отмечаются в тропических областях обоих полушарий. В начале бореального периода (10 800 л.н.) все эти особенности сохраняются. В начале атлантического периода (8100 л.н.) облучение Земли превосходит современное в течение двух месяцев, завершающих весенний астрономический сезон, всего астрономического лета и в первый месяц астрономической осени. Уступает современной приходящая солнечная радиация в первый весенний месяц, в течение двух месяцев, завершающих осенний сезон, и всей астрономической зимы. Максимальные превышения облучения по-прежнему характерны для полярных районов Северного полушария. Максимально облучение в это время уступает современному в тропических районах. В начале суббореального периода (5800 л.н.) инсоляция уступает современным значениям в первые два месяца весеннего сезона, в последний месяц астрономической осени и всего зимнего сезона (преимущественно в тропических областях полушарий). Превышает современные значения ИО в последний месяц весеннего сезона, в течение астрономического лета и в первый месяц осеннего сезона (максимальные превышения по-прежнему характерны для полярных областей Северного полушария, пониженные значения локализируются в тропических областях). В начале субатлантического периода (2600 л.н.) облучение Земли уступает современному преимущественно в течение

весеннего и зимнего астрономических сезонов и превышает его в течение астрономического лета и осени. Области максимальных различий (превышений и понижений) располагаются в это время в тропических районах обоих полушарий.

ИЗМЕНЕНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ЛЕТНЕГО ОБЛУЧЕНИЯ В ГОЛОЦЕНЕ

Известно, что летняя инсоляция играет большую роль в изменениях природной системы Земли и ее компонентов, одним из которых является криосфера.

Это определяется, во-первых, тем, что при увеличении летней инсоляции повышается приповерхностная температура воздуха и температура поверхности океана. Следствием этого является увеличение испарения и повышение содержания водяного пара в атмосфере, что, в свою очередь, приводит к усилению парникового эффекта. В результате появляется дополнительное тепло, которое вновь приводит к увеличению испарения, повышению содержания водяного пара в атмосфере, усилению парникового эффекта и вновь к появлению дополнительного тепла. Эти процессы, многократно повторяясь, формируют механизм усиления потепления.

Во-вторых, выделением скрытого тепла от увеличения атмосферных осадков (переход водяного пара в воду и снег или лед).

В-третьих, уменьшением альбедо за счет сокращения площади морских льдов и ледников – нагреванием большей площади поверхности (материков и океанов) и от нее – атмосферы. При сокращении летней инсоляции, очевидно, происходят обратные эффекты. В связи с этим мы проанализировали изменение летней инсоляции полушарий в голоцене (рис. 3).

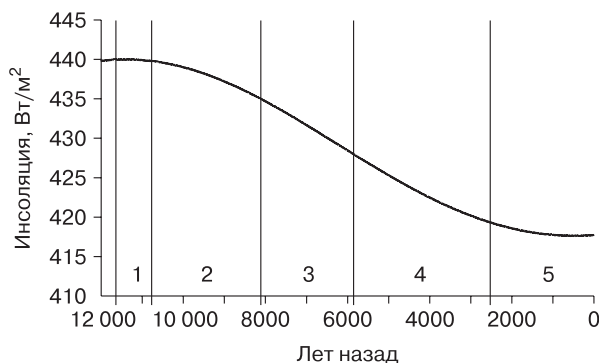


Рис. 3. Изменение летней инсоляции Северного полушария в голоцене:

1 – пребореальный, 2 – бореальный, 3 – атлантический, 4 – суббореальный, 5 – субатлантический периоды.

Максимум летней инсоляции в Северном полушарии отмечается в интервале приблизительно от 11 550 до 11 350 л.н. (рис. 4).

Максимум летней инсоляции в Северном полушарии синхронизируется с глобальным палеогеографическим событием: переходом от холодной плейстоценовой эпохи к теплой голоценовой эпохе. Это палеогеографическое событие (продолжительностью около 2000 лет) в основном датируется временем 12 000–10 000 кал. л.н. [Монин, Шишков, 1979]. В Европе его начало связывают с наступлением активной фазы разрушения Скандинавского ледникового щита и отступанием его от моренных гряд Салпаусселькя, в Северной Америке – с завершением стадии Валдерс. В это же время сокращается толщина и площадь Гренландского ледникового щита [Sinclair et al., 2016]. Установлено, что в переходный период между плейстоценом и голоценом глобальная температура поверхности Земли увеличилась примерно на 2.0–3.5 °C [Osman et al., 2021].

Переход от холодной плейстоценовой к теплой голоценовой эпохе находит четкое отражение в изотопно-кислородном составе ледовых кернов Гренландии и о. Девон, полигонально-жильных льдов Восточной Сибири, а также раковин фораминифер из донных осадков [Монин, Шишков, 1979]. Этот переход фиксируется в изменениях флористических и фаунистических комплексов и ареалов обитания [Субетто и др., 2003; Болиховская, 2011], в палеогидрологических событиях – подъеме уровня Мирового океана и археологических данных с мезолитических стоянок [Панин, Матлахова, 2015; Smith et al., 2011]. Все это указывает на значительные изменения природы в этот период. Темпы деградации ледников в это время увеличивались в 2–3 раза и более [Mangerud, 2013]. За потеплением в раннем голоцене (10 000–5000 л.н.) следует похолодание на ~0.7 °C в течение

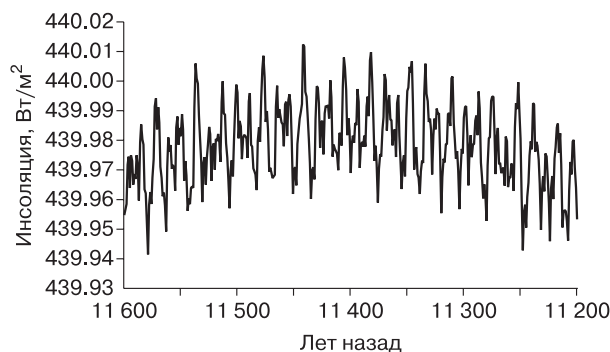


Рис. 4. Максимум летней инсоляции в Северном полушарии в голоцене.

ние среднего и позднего голоцена, которое достигает самых низких температур воздуха во время Малого ледникового периода [Marcott et al., 2013].

Минимум летней инсоляции отмечается в интервале от 1400 до 1600 г. (рис. 5).

Минимум летней инсоляции в Северном полушарии синхронизируется с глобальным палеогеографическим событием – Малым ледниковым периодом (МЛП), который, по-видимому, был наиболее существенным событием в истории климата последнего тысячелетия. Период похолодания наступил после теплого оптимума средневековья, когда все реконструируемые температурные характеристики были выше современных примерно на 1°C (~1.2–0.8 тыс. кал. л.н.) [Клименко и др., 2001]. МЛП сопровождался увеличением площади арктических льдов и горного оледенения в Европе. Временной интервал события достаточно протяженный и определяется приблизительно с 1300 по 1880 г., с максимумом в период 1550–1880 гг. [Degroot, 2018].

МЛП представляет особый интерес, так как во время его последнего столетия (1750–1850 гг.) возникла возможность инструментальных наблюдений, документальные отчеты которых сохранились до наших дней, а более ранние периоды зафиксированы во множестве исторических источников, в произведениях изобразительного искусства и литературе [Федоров и др., 2021; Mann, 2003]. Наряду с историческими источниками данные по колонке GISP2 из Гренландии, а также многочисленные дендрохронологические, гляциологические и палеоклиматические данные отражают увеличение глобального объема льда и похолодание, произошедшее в Северной Атлантике, в различных районах Северной Евразии и Северной Америки во время МЛП с кульминацией в XVII в. [Bradley et al., 2003]. В среднем для Северного полушария аномалия температуры воздуха в момент последнего похолодания составляла от -0.2 до -0.6°C [Crowley, Lowery, 2000].

В качестве основных причин МЛП называют уменьшение солнечной активности, увеличение вулканической активности, особенности циркуляционных процессов в атмосфере и океане [Mann, 2003]. Однако, наряду с возможным участием указанных факторов в глобальном похолодании, вряд ли ими ограничиваются все причины этого палеогеографического события. Четкая его синхронизация с минимумом летней инсоляции Северного полушария, очевидно, указывает на то, что именно летняя инсоляция Северного полушария является основным фактором МЛП.

Абсолютный максимум летней инсоляции Северного полушария (440.01 Вт/м^2) отмечается 11 442 л.н., абсолютный минимум (417.61 Вт/м^2) в 1604 г. н.э. Размах изменения равен 22.41 Вт/м^2 , а

продолжительность ветви спада составляет около 10 000 лет. Если ветви роста и спада равновесные, то цикл изменения летней инсоляции Северного полушария имеет продолжительность около 20 000 лет. Следовательно, предшествующий Малому ледниковому периоду минимум летней инсоляции в Северном полушарии должен приходиться на время 21 500 л.н., которое синхронизируется с максимумом развития последнего покровного оледенения в Европе и Северной Америке [Монин, Шишков, 1979]. Отмеченный цикл изменения летней инсоляции определяется циклом долготы перигелия, в течение которого перигелий земной орбиты пересекает ее кардинальные точки (равноденствия и солнцестояния). Период цикла долготы перигелия составляет около 21 000 лет [Миланкович, 1939]. Этот цикл также называется климатической прецессией [Монин, Шишков, 1979; Федоров, 1999], с которой в основном связаны изменения облучения Земли по широтам и сезонам, отмеченные выше для хронологических периодов голоцена. Вероятно, МЛП имел ограниченное развитие в связи с тем, что минимум летней инсоляции в Северном полушарии наблюдался на фоне увеличения годового меридионального градиента инсоляции (МГИ), которым регулируется меридиональный перенос радиационного тепла в системе океан–атмосфера. Увеличение МГИ началось около 9500 л.н. и связано с уменьшением наклона оси вращения, период изменения которого составляет около 41 000 лет [Миланкович, 1939; Федоров, 2019, 2021].

Четкий минимум летней инсоляции Южного полушария в рассматриваемом временном диапазоне не фиксируется. Однако ее значения в начале голоцена, вероятно, были близки к минимальным (рис. 6). В этом случае летняя инсоляция в Северном и Южном полушариях изменяется асинхронно. Рассчитанный коэффициент корреляции летней инсоляции полушарий в пределах голоцена равен -0.997 .

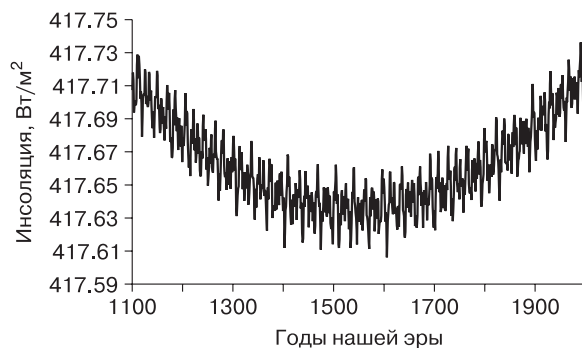


Рис. 5. Минимум летней инсоляции в Северном полушарии.

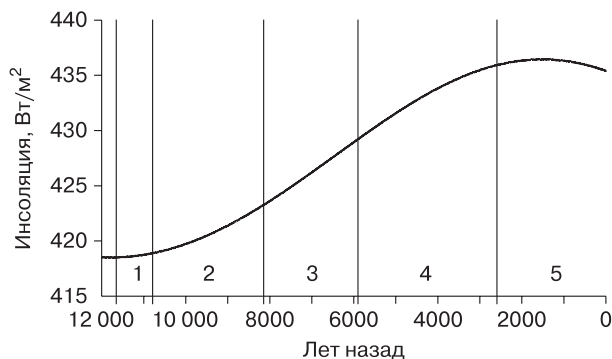


Рис. 6. Изменение летней инсоляции Южного полушария в голоцене:

1 – пребореальный, 2 – бореальный, 3 – атлантический, 4 – суббореальный, 5 – субатлантический периоды.

Максимум летней инсоляции в Южном полушарии приходится приблизительно на интервал от 400 до 600 г. н.э. (рис. 7).

Возможно, максимум летней инсоляции можно было бы весьма предположительно сопоставить с потеплением “римского времени”.

Из сравнительного анализа экстремумов в летней инсоляции Северного и Южного полушарий с глобальными палеогеографическими событиями в голоцене следует, что вероятной причиной активной фазы деградации покровного оледенения и перехода от плейстоцена к голоцену, а также МЛП являются максимум и минимум летней инсоляции в Северном полушарии соответственно. Участие летней инсоляции Южного полушария в генерации этих глобальных палеогеографических событий не находит подтверждения в полученных авторами результатах. Причиной других известных глобальных климатических событий, например, малого (средневекового) климатического оптимума голоцена, также могут быть экстремумы в механизмах переноса радиационного тепла – меридионального и межполушарного [Федоров и др., 2021].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам расчетов инсоляции Земли получены матрицы, отражающие особенности изменения облучения Земли по широтам и сезонам в отдельные геохронологические периоды голоцена. Для пребореального периода характерно увеличение облучения в летний и осенний астрономические сезоны, сокращение инсоляции происходит в весенний и зимний астрономические сезоны. В бореальном периоде увеличение инсоляции отмечается для двух последних месяцев летнего астрономического сезона, всего осеннего сезона и первого месяца астрономической зимы. Сокращение облучения характерно для всего

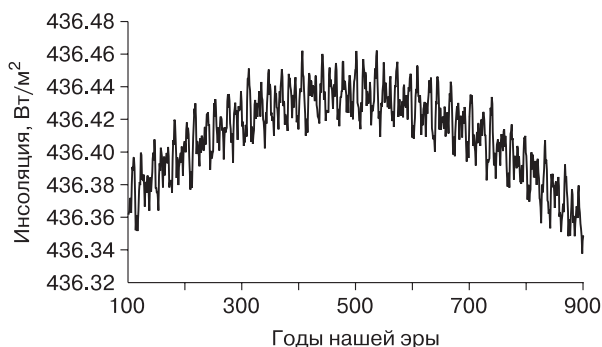


Рис. 7. Максимум летней инсоляции в Южном полушарии.

сеннего сезона и первого месяца летнего астрономического сезона, а также для двух месяцев, завершающих зимний сезон. В течение атлантического периода поступление солнечной радиации сокращается в первое астрономическое полугодие (весенний и летний астрономические сезоны) и увеличивается во второе астрономическое полугодие (осень, зима). В суббореальном периоде уменьшение инсоляции отмечается преимущественно для двух месяцев, завершающих весенний сезон, для всего летнего сезона и первого месяца астрономической осени. Приход солнечной радиации возрастает в первый весенний месяц, в течение двух месяцев, завершающих осенний сезон, и в течение всего зимнего сезона. В субатлантический период облучение преимущественно возрастает в весенний и зимний астрономические сезоны и сокращается в летний и осенний сезоны.

Рассчитаны матрицы, отражающие различия в облучении Земли по широтам и сезонам в граничные годы геохронологических периодов голоцена и современной инсоляции (2022 г.). Определено, что от начала голоцена до начала субатлантического времени области превышения современного облучения преимущественно располагались в Северном полушарии, с максимальными превышениями в его полярных районах. Области, в которых инсоляция максимально уступала ее современным значениям, в течение всего голоцена располагались преимущественно в тропических областях обоих полушарий. В субатлантическом периоде область максимального превышения в Северном полушарии также смещалась в умеренные и тропические широты.

Глобальные палеогеографические события голоцена (переход от холодной плейстоценовой эпохи к теплой голоценовой и Малый ледниковый период) синхронизированы с экстремумами летней инсоляции в Северном полушарии. Следовательно, летнее облучение Северного полушария может быть причиной этих событий, а преимуще-

ственной областью их возникновения и развития является Северное полушарие Земли.

Полученные результаты могут учитываться при создании палеогеографических и палеогеокриолитологических реконструкций для голоцена и его геохронологических периодов. Их следует учитывать и при стратиграфической корреляции палеогеографических и геокриолитологических событий на основе данных изотопно-кислородного анализа ледовых кернов гренландских и антарктических скважин.

Благодарности. Работа выполнена в соответствии с госбюджетными темами географического факультета МГУ “Палеогеографические реконструкции природных геосистем и прогнозирование их изменений” (121051100135-0), “Опасность и риск природных процессов и явлений” (121051300175-4).

Литература

Агафонова Е.А. Палеогеографические условия развития Белого моря в голоцене (по данным диатомового анализа): Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М., 2021, 26 с.

Болыховская Н.С. Эволюция климата и ландшафтов Нижнего Поволжья в голоцене // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География, 2011, № 2, с. 13–27.

Клименко В.В., Климанов В.А., Сирин А.А., Слепцов А.М. Изменение климата на западе европейской части России в позднем голоцене // Докл. РАН, 2001, т. 376, № 5, с. 679–683.

Миланкович М. Математическая климатология и астрономическая теория колебаний климата. М.; Л., ГОНТИ, 1939, 208 с.

Монин А.С. История климата / А.С. Монин, Ю.А. Шишков. Л., Гидрометеиздат, 1979, 408 с.

Панин А.В., Матлахова Е.Ю. Гидроклиматическая шкала Восточно-Европейской равнины по данным датирования палеогидрологических событий // Актуальные проблемы палеогеографии и стратиграфии плейстоцена: Материалы Всерос. науч. конф. “Марковские чтения 2015 года”. М., 2015, с. 152–154.

Субетто Д.А., Давыдова Н.Н., Сапелко Т.В., Вольфарт Б., Вастегорд С., Кузнецов Д.Д. Климат северо-запада России на рубеже плейстоцена и голоцена // Изв. РАН. Сер. геогр., 2003, № 5, с. 1–12.

Федоров В.М. Астрономическая хронология глобальных климатических событий в позднем плейстоцене и голоцене // Криосфера Земли, 1999, т. III, № 3, с. 105–109.

Федоров В.М. Системы отсчета времени в географии // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География, 2002, № 4, с. 21–26.

Федоров В.М. Проблема меридионального переноса тепла в астрономической теории климата // Геофиз. процессы и биосфера, 2019, т. 18, № 3, с. 117–128.

Федоров В.М. Астрономическая теория климата: вопросы модернизации и развития // Гидрометеорология и экология, 2021, № 64, с. 435–465.

Федоров В.М., Фролов Д.М. Пространственная и временная изменчивость приходящей на верхнюю границу атмосферы солнечной радиации // Космич. исслед., 2019, т. 57, № 3, с. 177–184.

Федоров В.М., Фролов Д.М., Веласко Эррера В.М.Н., Сун В.В.-Х., Сионко Р.Г. Роль радиационного фактора в глобальных климатических событиях позднего голоцена // Геофиз. процессы и биосфера, 2021, т. 20, № 3, с. 5–19.

Bradley R.S., Briffa K.R., Cole J., Hughes M.K., Osborn T.J. The climate of the last millennium // Paleoclimate, Global Change and the Future / K. Alverson, R.S. Bradley, T.F. Pedersen (Eds.). Berlin, Springer Verlag, 2003, p. 105–141.

Crowley T.J., Lowery T.S. Northern Hemisphere temperature reconstruction // Ambio, 2000, vol. 29, p. 51–54.

Degroot D. The frigid Golden Age: climate change, the Little Ice Age, and the Dutch Republic. N.Y., Cambridge Univ. Press, 2018, p. 1560–1720.

Fedorov V.M., Kostin A.A. The calculation of the Earth's insolation for the period 3000 BC–AD 2999 // Springer Geology, 2020, vol. 1, p. 181–192.

Mangerud J., Andersen S.T., Berglund B.E., Donner J.J. Quaternary stratigraphy of Norden, a proposal for terminology and classification // Boreas, 1974, vol. 3, p. 109–128.

Mangerud J., Goehring B., Lohne O., Svendsen J., Gyllencreutz R. Collapse of marine-based outlet glaciers in the Scandinavian Ice Sheet // Quat. Sci. Rev., 2013, vol. 67, p. 8–16.

Mann M. Little Ice Age // Encyclopedia of Global Environmental Change, Vol. 1. The Earth System: Physical and Chemical Dimensions of Global Environmental Change / M.C. MacCracken, J.S. Perry (Eds.). N.Y., John Wiley and Sons, 2003, p. 504–509.

Marcott S., Shakun J., Clark P., Mix A. A reconstruction of regional and global temperature for the Past 11,300 years // Science, 2013, vol. 339, p. 1198–1201.

Osman M., Tierney J., Zhu J., Tardif R., Hakim G., King J., Poulsen C. Globally resolved surface temperatures since the Last Glacial Maximum // Nature, 2021, vol. 599, p. 239–244.

Sinclair G., Carlson A.E., Mix A.C., Lecavalier B.S., Milne G., Mathias A., Buizert C., DeConto R. Diachronous retreat of the Greenland ice sheet during the last deglaciation // Quat. Sci. Rev., 2016, vol. 145, p. 243–258.

Smith D., Harrison S., Firth C., Jordan J. The early Holocene sea level rise // Quat. Sci. Rev., 2011, vol. 30, p. 1846–1860.

Walker M., Head M.J., Lowe J., Berkelhammer M., Björck S., Cheng H., Fisher D., Gkinis V., Long A., Newham R., Rasmussen S.O., Weiss H. Subdividing the Holocene Series/Epoch: formalization of stages/ages and subseries/subepochs, and designation of GSSPs and auxiliary stratotypes // J. Quat. Sci., 2019, vol. 34, No. 3, p. 173–186.

URL: <http://ssd.jpl.nasa.gov> – NASA, Jet Propulsion Laboratory California Institute of Technology (JPL Solar System Dynamics) [Электрон. ресурс. Нац. аэрокосмич. агентства США] (дата обращения: 20.06.2022).

References

Agafonova E.A. Paleogeographic conditions of the development of the White Sea in the Holocene (according to diatom analysis): PhD thesis. Moscow, 2021, 26 p. (in Russian).

Bolihovskaya N.S. Evolution of climate and landscapes of the Lower Volga region in the Holocene. Vestnik Mosk. Universita. Ser. 5. Geografiya, 2011, No. 2, p. 13–27 (in Russian).

Klimenko V.V., Klimanov V.A., Sirin A.A., Slepcev A.M. Climate change in the West of the European part of Russia in the Late Holocene. Dokl. RAN, 2001, vol. 376, No. 5, p. 679–683 (in Russian).

Milankovich M. Matematicheskaya klimatologiya i astronomicheskaya teoriya kolebanij klimata [Mathematical climatology

- and astronomical theory of climate fluctuations]. Moscow; Leningrad, GONTI, 1939, 208 p. (in Russian).
- Monin A.S., Shishkov Yu.A. Istoriya klimata [History of Climate]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1979, 408 p. (in Russian).
- Panin A.V., Matlahova E.Yu. Hydroclimatic scale of the East European Plain according to the paleohydrological events dating. In: Aktual'nye problemy paleogeografii i stratigrafii plejstotsena: Materialy Vserossijskoj nauchnoj konferencii "Markovskie chteniya 2015 goda" [Actual problems of paleogeography and stratigraphy of the Pleistocene: Proceeding of the All-Russian Scientific Conference "Markov Readings 2015"]. Moscow, 2015, p. 152–154 (in Russian).
- Subetto D.A., Davydova N.N., Sapelko T.V., Vol'fart B., Vastegord S., Kuznecov D.D. Climate of Northwestern Russia at the turn of the Pleistocene and Holocene. Izvestiya RAN. Seriya geograficheskaya [Proceeding of the Russian Academy of Science. Geographical Series], 2003, No. 5, p. 1–12 (in Russian).
- Fedorov V.M. Astronomical chronology of global climatic events in the Late Pleistocene and the Holocene. Kriosfera Zemli [Earth's Cryosphere], 1999, vol. III, No. 3, p. 105–109 (in Russian).
- Fedorov V.M. Time reference systems in geography. Vestnik Mosk. Universiteta. Ser. 5. Geografiya, 2002, No. 4, p. 21–26 (in Russian).
- Fedorov V.M. The problem of meridional heat transfer in the astronomical climate theory. Izvestiya – Atmospheric and Oceanic Physics, 2019, vol. 55, No. 10, p. 1572–1583. DOI: 10.1134/S0001433819100025.
- Fedorov V.M. Astronomical climate theory: issues of modernization and development. Gidrometeorologiya i `ekologiya [Hydrometeorology and Ecology], 2021, No. 64, p. 435–465 (in Russian). DOI: 10.33933/2713-3001-2021-64-435-465.
- Fedorov V.M., Frolov D.M. Spatial and temporal variability of solar radiation coming to the upper boundary of the atmosphere. Kosmicheskie issledovaniya [Cosmic Research], 2019, vol. 57, No. 3, p. 156–162 (in Russian). DOI: 10.1134/S0010952519030043.
- Fedorov V.M., Frolov D.M., Velasko Herrera V.M.N., Sun V.V.-H., Sionko R.G. Role of the radiation factor in global climatic events of the Late Holocene. Izvestiya – Atmospheric and Oceanic Physics, 2021, vol. 57, No. 10, p. 1239–1253. DOI: 10.1134/S0001433821100030.
- Bradley R.S., Briffa K.R., Cole J., Hughes M.K., Osborn T.J. The climate of the last millennium. In: Paleoclimate, Global Change and the Future / K. Alverson, R.S. Bradley, T.F. Pedersen (Eds.). Berlin, Springer Verlag, 2003, p. 105–141.
- Crowley T.J., Lowery T.S. Northern Hemisphere temperature reconstruction. Ambio, 2000, vol. 29, p. 51–54.
- Degroot D. The frigid Golden Age: climate change, the Little Ice Age, and the Dutch Republic. N.Y., Cambridge Univ. Press, 2018, p. 1560–1720.
- Fedorov V.M., Kostin A.A. The calculation of the Earth's insolation for the period 3000 BC–AD 2999. Springer Geology, 2020, vol. 1, p. 181–192.
- Mangerud J., Andersen S.T., Berglund B.E., Donner J.J. Quaternary stratigraphy of Norden, a proposal for terminology and classification. Boreas, 1974, vol. 3, p. 109–128.
- Mangerud J., Goehring B., Lohne O., Svendsen J., Gyllencreutz R. Collapse of marine-based outlet glaciers from the Scandinavian Ice Sheet. Quat. Sci. Rev., 2013, vol. 67, p. 8–16.
- Mann M. Little Ice Age. In: Encyclopedia of Global Environmental Change, Vol. 1. The Earth System: Physical and Chemical Dimensions of Global Environmental Change / M.C. MacCracken, J.S. Perry (Eds.). N.Y., John Wiley and Sons, 2003, p. 504–509.
- Marcott S., Shakun J., Clark P., Mix A. A reconstruction of regional and global temperature for the Past 11,300 years. Science, 2013, vol. 339, p. 1198–1201.
- Osman M., Tierney J., Zhu J., Tardif R., Hakim G., King J., Poulsen C. Globally resolved surface temperatures since the Last Glacial Maximum. Nature, 2021, vol. 599, p. 239–244.
- Sinclair G., Carlson A.E., Mix A.C., Lecavalier B.S., Milne G., Mathias A., Buizert C., DeConto R. Diachronous retreat of the Greenland ice sheet during the last deglaciation. Quat. Sci. Rev., 2016, vol. 145, p. 243–258.
- Smith D., Harrison S., Firth C., Jordan J. The early Holocene sea level rise. Quat. Sci. Rev., 2011, vol. 30, p. 1846–1860.
- Walker M., Head M.J., Lowe J., Berkelhammer M., Björck S., Cheng H., Fisher D., Gkinis V., Long A., Newnham R., Rasmussen S.O., Weiss H. Subdividing the Holocene Series/Epoch: formalization of stages/ages and subseries/subepochs, and designation of GSSPs and auxiliary stratotypes. J. Quat. Sci., 2019, vol. 34, No. 3, p. 173–186.
- URL: <http://ssd.jpl.nasa.gov> – NASA, Jet Propulsion Laboratory California Institute of Technology (JPL Solar System Dynamics) [Electronical resource NASA] (last visited: 20.06.2022).

*Поступила в редакцию 28 июля 2022 г.,
после доработки – 6 апреля 2023 г.,
принята к публикации 17 мая 2023 г.*