

О МАГНИТНОМ ПОЛЕ ЗЕМЛИ, ДВИЖУЩИХСЯ ПОЛЮСАХ, ЖЕСТКОСТЯХ ГЕОМАГНИТНОГО ОБРЕЗАНИЯ И ПОТОКАХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

В. И. Логачев, Ю. И. Стожков

В статье рассматриваются вопросы, связанные с происхождением магнитного поля Земли, его роль в защите Земли от космического излучения и сохранении биосферы Земли в целом.

Ключевые слова: магнитное поле, Земля, космические лучи, биосфера.

Природа магнитного поля Земли. Дипольное геомагнитное поле, уравнение которого вывел Гаусс в 1834 г., зарождается в недрах Земли [1–3]. Потенциал магнитного поля Земли U записывается в виде

$$U(r, \varphi, \lambda, t) = R \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^n \left(\frac{R}{r}\right)^{n+1} (g_n^m(t) \cos(m\varphi) + h_n^m(t) \sin(m\varphi)) P_n^m(\cos \theta),$$

где r – расстояние от центра Земли, θ – полярный угол, λ – долгота, φ – широта, R – радиус Земли, g_n^m , h_n^m – коэффициенты Гаусса, зависящие от времени t , в единицах нанотесла (нТ).

В 1905 году А. Эйнштейн назвал вопрос о природе магнитного поля Земли одной из главных загадок физики XX века. В настоящее время подавляющее большинство геофизиков придерживается механизма геодинамо [4–8]. Однако окончательно механизм образования магнитного поля Земли не создан и в настоящее время. Магнитное поле, которым мы пользуемся при определении положения на местности для навигации, называется “Главным магнитным полем”. Это поле не является чисто дипольным. На него накладываются магнитные поля, связанные с магнитными аномалиями, например, такими мощными как Бразильская магнитная аномалия, Курская магнитная аномалия, аномалиями, образованными токами, текущими в земной коре, процессами, происходящими в верхней мантии (рис. 1) [9].

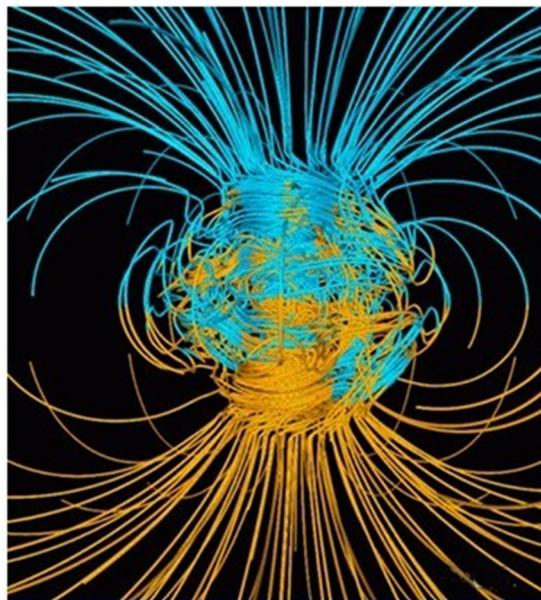


Рис. 1: Качественная картина сложной структуры земного магнитного поля.

Положение магнитных полюсов Земли не совпадает с рассчитанными положениями геомагнитных полюсов. Расчеты последних выполняются по данным подробной съемки магнитного поля на всей поверхности Земли, на самолетах и спутниках. В уравнении Гаусса используются, как правило, первые 13 коэффициентов g_n^m и h_n^m . Первый член представляет собой магнитный диполь, и пересечение его с поверхностью Земли определяет положение геомагнитных полюсов. Квадрупольные и октупольные члены учитываются следующими коэффициентами разложения. На больших расстояниях мультипольные составляющие в уравнении Гаусса быстро затухают и на двух-трех радиусах Земли геомагнитное поле становится в хорошем приближении дипольным. Именно оно определяет условия прихода космических лучей к поверхности Земли. Геомагнитное поле простирается примерно на десять радиусов Земли с солнечной стороны и на сотни радиусов с ночной [10].

О магнитных полюсах Земли и скорости их перемещения. Магнитное поле Земли не является постоянным. Оно меняется со временем и по величине, и по положению его полюсов. Нужно отметить, что изменения координат геомагнитных полюсов существенно меньше изменений (дрейфа) магнитных полюсов главного магнитного поля Земли.

Т а б л и ц а 1

Координаты положения геомагнитных и магнитных полюсов Земли и изменение величины дипольного момента магнитного поля Земли в период с 1831 по 2020 г.г.

Год	S (южный геомагнитный полюс – Северное полушарие)		N (северный геомагнитный полюс – Южное полушарие)		S (южный магнитный полюс – Северное полушарие)		N (северный магнитный полюс – Южное полушарие)		Дипольный магнитный момент, 10^{22} АМ ²
1831	Открыт Южный магнитный полюс.				70.1N	96.8W			
1841			Открыт Северный магнитный полюс.				72.4S	155.3E	
1900	78.7N	68.8W	78.7S	111.2E	70.5N	96.2W	71.7S	148.3E	8.32
1905	78.7N	68.7W	78.7S	111.3E	70.7N	96.5W	71.5S	148.5E	8.30
1910	78.7N	68.7W	78.7S	111.3E	70.8N	96.7W	71.2S	148.6E	8.27
1915	78.6N	68.6W	78.6S	111.4E	71.0N	97.0W	70.8S	148.5E	8.24
1920	78.6N	68.4W	78.6S	111.6E	71.3N	97.4W	70.4S	148.2E	8.20
1925	78.6N	68.3W	78.6S	111.7E	71.8N	98.0W	70.0S	147.6E	8.16
1930	78.6N	68.3W	78.6S	111.7E	72.3N	98.7W	69.5S	146.8E	8.13
1935	78.6N	68.4W	78.6S	111.6E	72.8N	99.3W	69.1S	145.8E	8.11
1940	78.5N	68.5W	78.5S	111.5E	73.3N	99.9W	68.6S	144.6E	8.09
1945	78.5N	68.5W	78.5S	111.5E	73.9N	100.2W	68.2S	144.4E	8.08
1950	78.5N	68.8W	78.5S	111.2E	74.6N	100.9W	67.9S	143.5E	8.06
1955	78.5N	69.2W	78.5S	110.8E	75.2N	101.4W	67.2S	141.5E	8.05
1960	78.6N	69.5W	78.6S	110.5E	75.3N	101.0W	66.7S	140.2E	8.03
1965	78.6N	69.9W	78.6S	110.1E	75.6N	101.3W	66.3S	139.5E	8.00
1970	78.7N	70.2W	78.7S	109.8E	75.9N	101.0W	66.0S	139.4E	7.97
1975	78.8N	70.5W	78.8S	109.5E	76.2N	100.6W	65.7S	139.5E	7.94
1980	78.9N	70.8W	78.9S	109.2E	76.9N	101.7W	65.4S	139.3E	7.91
1985	79.0N	70.9W	79.0S	109.1E	77.4N	102.6W	65.1S	139.2E	7.87
1990	79.2N	71.1W	79.2S	108.9E	78.1N	103.7W	64.9S	138.9E	7.84
1995	79.4N	71.4W	79.4S	108.6E	79.0N	105.3W	64.8S	138.7E	7.81
2000	79.6N	71.6W	79.6S	108.4E	81.0N	109.6W	64.7S	138.3E	7.79
2005	79.8N	71.8W	79.8S	108.2E	83.2N	118.2W	64.5S	137.8E	7.77
2010	80.1N	72.2W	80.1S	107.8E	85.0N	132.8W	64.4S	137.3E	7.75
2015	80.4N	72.6W	80.4S	107.4E	86.3N	160.0W	64.3S	136.6E	7.72
2016	80.4N	72.6W	80.4S	107.4E	86.5N	167.8W	64.2S	136.4E	7.72
2017	80.5N	72.6W	80.5S	107.4E	86.6N	175.5W	64.2S	136.3E	7.72
2018	80.5N	72.7W	80.5S	107.3E	86.6N	176.9E	64.2S	136.2E	7.71
2019	80.6N	72.7W	80.6S	107.3E	86.6N	169.6E	64.1S	136.0E	7.71
2020	80.7N	72.7W	80.7S	107.3E	86.5N	162.9E	64.1S	135.9E	7.71

Смещение магнитных полюсов регистрируется с 1885 года. Во время открытия магнитных полюсов их координаты были: для южного полюса – 70.1N; 96.8W, а для северного – 72.4S; 155.3E. После 1831 года, когда положение полюса в Северном полушарии было зафиксировано впервые, к 2020 году полюс сместился уже более чем на 2300 км в сторону Сибири и подошел к географическому полюсу на минимальное расстояние в 4° или 450 км. Скорость его перемещения увеличилась с 15 км/год в 2000 году до 55 км/год в 2019 году. Магнитный полюс в Южном полушарии переместился почти на 900 км и вышел в южную часть Индийского океана.

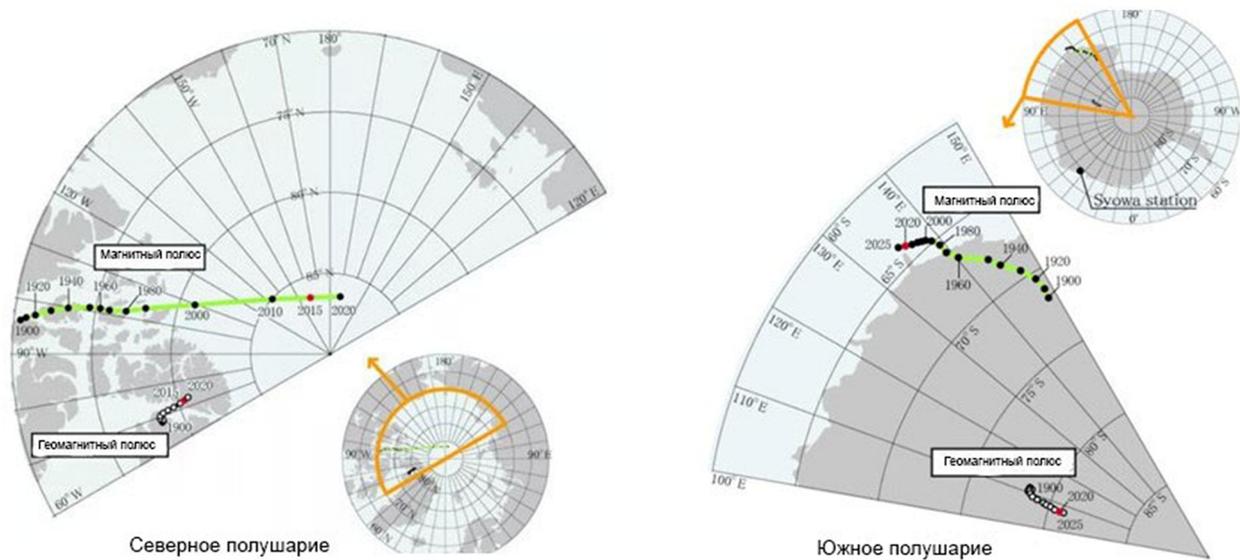


Рис. 2: Положения магнитного полюса Земли и геомагнитного полюса в северном полушарии.

Рис. 3: Положения магнитного полюса Земли и геомагнитного полюса в южном полушарии.

Геомагнитное поле достаточно стабильное и географические координаты его геомагнитных полюсов меняются незначительно (см. табл. 1 и рис. 2 и 3) [10–12].

Ось магнитного диполя прецессирует вокруг земной оси с периодом около 1200 лет [15].

В табл. 1 показаны координаты положения полюсов Земли по годам и изменения величины дипольного момента магнитного поля Земли с 1831 по 2020 г.г. За время с 1900 по 2020 г.г. величина магнитного момента Земли уменьшилась примерно на 7%, что,

конечно, не могло не сказаться на условиях прихода космических лучей к Земле. Изменения положения геомагнитных и магнитных полюсов Земли показано на рис. 2 и 3.

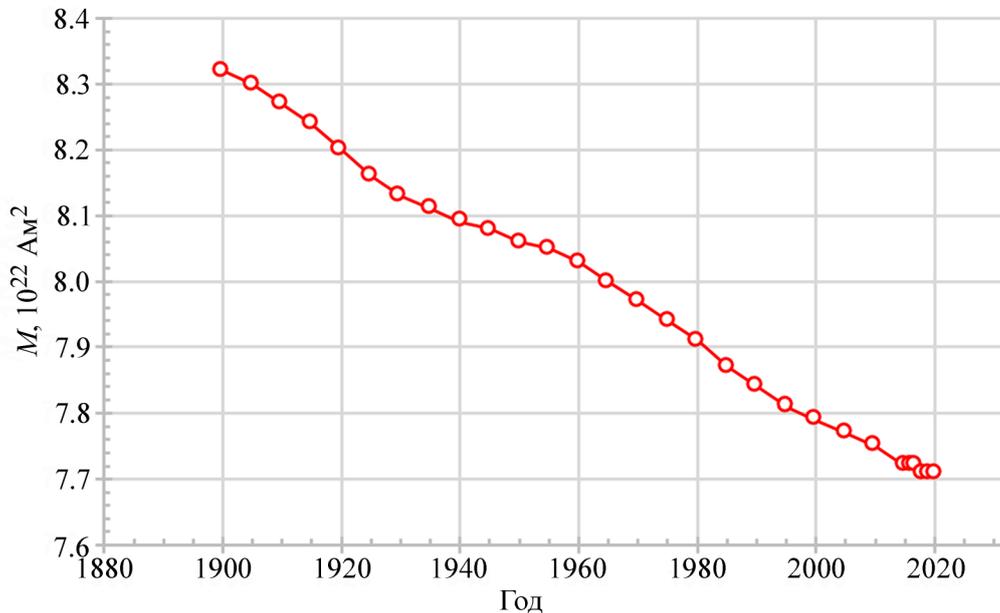


Рис. 4: Зависимость величины дипольного магнитного момента Земли M от времени.

Величина дипольного магнитного момента Земли (расчетные значения) также зависит от времени. Эта зависимость приведена на рис. 4 [13].

О жесткостях геомагнитного обрезания космических лучей. После открытия космических лучей в начале 20 века, шведский ученый Штермер произвел расчеты траекторий движения заряженных частиц в геомагнитном поле, которое было взято дипольным. В соответствии с его расчетами в каждую точку на поверхности Земли приходят из открытого космоса все частицы, жесткость которых выше некоторой величины, называемой жесткостью геомагнитного обрезания.

Жесткость частицы определяется как $R = pc/Z$, где R – жесткость частицы в ГВ, p – ее импульс, c – скорость света, Z – заряд частицы в единицах заряда электрона. Частицы с одинаковой жесткостью имеют в магнитном поле одинаковый ларморовский радиус $r = RB = pc/ZB$ и движутся в магнитном поле по одинаковым траекториям [14].

Жесткость обрезания космических лучей R_c – наибольшая на экваторе и уменьшается с ростом широты (так называемый широтный эффект). Для положительно заряженных частиц жесткость минимальна при движении частицы с запада, а максимальна – с востока. В дипольном магнитном поле на экваторе эти величины для однократно

заряженных частиц равны соответственно ~ 10.1 ГВ и ~ 59.6 ГВ. Для вертикально приходящих частиц $R_c \approx 14.8$ ГВ [15].

Значения геомагнитных жесткостей обрезания R_c в каждой точке земного шара зависят от положения оси магнитного диполя, величины его дипольного момента \mathbf{M} и, в меньшей степени, зависят от местных аномалий и прочих факторов, искажающих магнитное поле Земли. Т.к. положение оси магнитного диполя и его величина меняются со временем, то изменяются и значения R_c . В настоящее время значения геомагнитных порогов обрезания рассчитываются для каждого 5-летнего интервала, причем в модель геомагнитного поля Земли закладываются коэффициенты Гаусса g_n^m, h_n^m , полученные из экспериментальных данных по магнитному полю Земли, относящиеся к рассматриваемому периоду.

О парадоксе во временном ходе потока космических лучей и изменении значений R_c . Поток космических лучей, падающих на границу атмосферы, определяется величиной геомагнитной жесткости обрезания R_c : чем меньше величина R_c , тем больше поток космических лучей. Значения геомагнитных порогов обрезания в районах геомагнитных полюсов близки к нулю и увеличиваются к геомагнитному экватору. Максимальное значение величины R_c для частиц, вертикально падающих на границу атмосферы на геомагнитном экваторе, равно $R_c \approx 14.8$ ГВ. В соответствии с вышеизложенным, потоки космических лучей на Земле будут уменьшаться при переходе из полярных районов к экватору.

Т а б л и ц а 2

Рассчитанные значения R_c в ГВ (вертикальное направление) для разных периодов времени, начиная с 1955 г. по настоящее время, для московского региона

Год	Мод.	1955	1960	1965	1970	1975	1980	1985
R_c , ГВ	IGRF	2.31	2.33	2.33	2.34	2.33	2.28	2.26
Год	Мод.	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020
R_c , ГВ	IGRF	2.21	2.19	2.19	2.13	2.12	2.09	2.04

За последние ~ 120 лет величина дипольного момента Земли \mathbf{M} уменьшилась и незначительно изменилась ориентация его оси (см. табл. 1 и рис. 6). Соответственно изменялись и значения геомагнитных порогов обрезания R_c . В одних областях земного шара эти значения будут увеличиваться, в других уменьшаться, в третьих оставаться постоянными. Расчеты показывают, что в районе средних географических широт значения R_c уменьшались с 1950 г. по настоящее время. В табл. 2 приведены рассчитанные

значения R_c для московского региона для периодов с 1955 г. по настоящее время с шагом 5 лет. Расчеты были выполнены по программе, разработанной в ИЗМИРАН [16].

Видно, что с 1955 по 2020 г.г. геомагнитный порог обрезания R_c в московском регионе уменьшился на (10–13)%. Из данных по широтным измерениям космических лучей можно найти ожидаемое увеличение их потока. На рис. 5 приведен экспериментально измеренный временной ход потока космических лучей (среднемесячные значения) в максимуме кривой их поглощения в атмосфере N_m в полярных районах на Севере (зеленая кривая, $R_c = 0.5$ ГВ), в Антарктиде (синяя кривая, $R_c = 0.04$ ГВ), и на широте Москвы (красная кривая). Значения R_c соответствуют данным табл. 2.

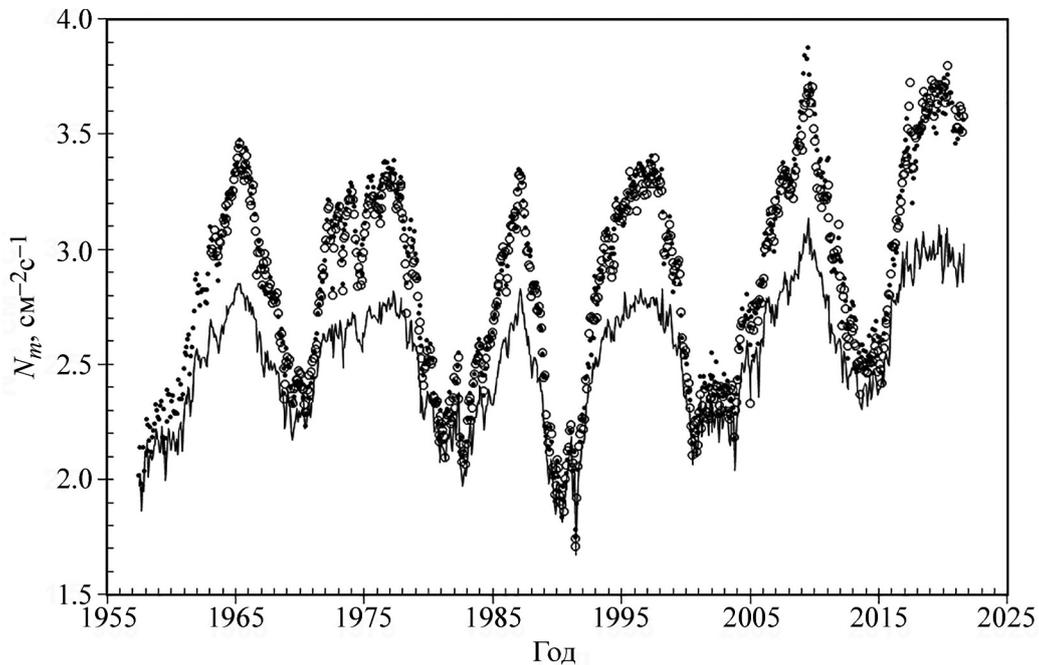


Рис. 5: Измеренные среднемесячные потоки космических лучей в атмосфере в максимуме кривой их поглощения N_m в зависимости от времени (1957–2020 г.г.) на широтах с $R_c = 0.5$ ГВ (Северный полярный район, зеленая кривая), в Антарктиде с $R_c = 0.04$ ГВ (синяя кривая) и на широте Москвы с $R_c = 2.3$ ГВ (красная кривая).

Для полярных широт изменения геомагнитных жесткостей обрезания незначительны, т. к. порог обрезания определяется толщиной слоя атмосферы над прибором, который составляет 20–50 г/см² для максимума кривой поглощения космических лучей N_m . Значения N_m максимальны в периоды минимумов солнечной активности. Поэтому ниже мы рассматриваем и сравниваем только такие периоды, именно, 1965, 1977, 1987,

1997 годы. Уровень солнечной активности и модуляция космических лучей были в эти периоды примерно одинаковы.

Последние два минимума солнечной активности в 23-ем (2009 г.) и в 24-ом (2019 г.) солнечных циклах были аномально слабыми по числу солнечных пятен, напряженности межпланетного магнитного поля и по другим индексам активности Солнца и геофизическим индексам. Поэтому наблюдаемые большие значения потоков космических лучей N_m в 2009 и 2019 годах обусловлены аномально низкой солнечной активностью. Эти периоды в рассмотрение не принимались.

Из табл. 2 мы видим уменьшение величины жесткости геомагнитного обрезания R_c . Это уменьшение должно вызвать увеличение потока космических лучей N_m в периоды минимумов солнечной активности 1965–1997 г.г. Из данных по широтным измерениям космических лучей можно найти ожидаемое увеличение их потока. На рис. 6 показана так называемая широтная зависимость максимальных значений N_m в минимуме солнечной активности 1987 г. [17].

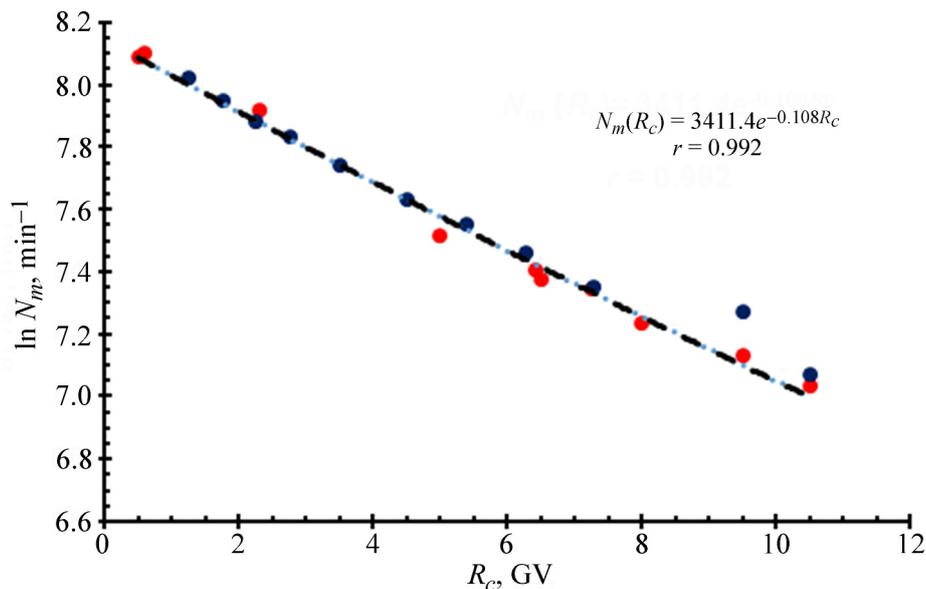


Рис. 6: Зависимость потока космических лучей в максимуме каскадной кривой в атмосфере N_m от геомагнитной жесткости обрезания R_c в минимуме солнечной активности 1987 г. Красные и синие точки – результаты измерений в Атлантическом океане в Северном и Южном полушариях Земли, соответственно. Пунктирная прямая проведена методом наименьших квадратов, r – коэффициент корреляции (см. формулу на рисунке).

В табл. 3 приводятся рассчитанные геомагнитные пороги обрезания R_c для московского региона в минимумах солнечной активности 1965, 1977, 1986, 1996, 2009, 2020 г.г., их изменения ΔR_c относительно минимума 1965 г., ожидаемые изменения потока космических лучей относительно 1965 г., $(\Delta N/N)$, %, а также измеренные значения потоков космических лучей в максимуме кривой поглощения в атмосфере N_m . Расчет ожидаемых значений $(\Delta N/N)$, % проводился по формуле $(\Delta N/N) = -10.8\Delta R_c$, % (см. табл. 3).

Т а б л и ц а 3

Геомагнитные пороги обрезания R_c для московского региона в минимумах солнечной активности и их изменения относительно 1965 г., $\Delta R_c = R_{ci} - R_{c65}$ (расчет по программе ИЗМИРАН)

Год	1965	1977	1986	1996	2009	2020
R_c , ГВ	2.31	2.33	2.26	2.19	2.12	2.04
ΔR_c	0	-0.02	-0.05	-0.12	-0.19	-0.27
$(\Delta N/N)$, %	0	+0.22	+0.54	+1.30	+2.05	+2.92
N_m , см ⁻² с ⁻¹	2.810±0.034	2.749±0.038	2.650±0.061	2.777±0.034	3.025±0.017	2.992±0.019

Ожидаемые (расчет) изменения потока космических лучей относительно 1965 г. по настоящее время $(\Delta N/N) = 100 \cdot (N_i - N_{65})/N_{65}$, %. Здесь R_{c65} , N_{65} и R_{ci} , N_i – значения геомагнитных жесткостей обрезания R_c и максимальных потоков космических лучей N_m в 1965 г. и в i – период времени. В последней строке приведены экспериментальные данные величин N_m , полученные в московском регионе (г. Долгопрудный).

В соответствии с расчетами, с 1965 г. по 1996 г. максимальные потоки космических лучей (значения N_m) должны возрасти примерно на 1.3%. Однако данные многолетних измерений, проведенные ДНС ФИАН (рис. 5), показывают скорее их постепенное уменьшение, чем увеличение в минимумах солнечной активности в период 1965 по 1996 г.г. [18].

Значения N_m в минимумах солнечной активности в 1965, 1977, 1987, 1997 годах уменьшаются (см. пунктирные прямые на рис. 5, которые проходят через максимальные значения N_m , наблюдаемые в 1965 г.). Аналогичную картину можно наблюдать, если провести анализ данных нейтронных мониторов.

Такое поведение космических лучей может быть связано с уменьшением потока галактических космических лучей в межзвездной среде вблизи солнечной системы. Возрастание потоков космических лучей в минимумах солнечной активности в 2009 и в 2020 г.г. вызвано аномально низким уровнем солнечной активности в эти периоды и аномально низкими значениями солнечных и межпланетных магнитных полей.

О движении магнитных полюсов. Некоторое время назад в СМИ и некоторых научных журналах появились статьи, в которых, в связи с движением магнитных полюсов, предсказывались катастрофические последствия для всего живущего на Земле. Многие ученые ссылались на то, что планетарное магнитное поле является главным условием существования жизни на Земле [19]. Поворот магнитного поля вплоть до его полной переориентации (смена полюсов), его возможное исчезновение на какой-то период времени, по мнению этих авторов, должно привести к потере Землей атмосферы и гибели всего живого. Посмотрим, повлияло ли смещение полюсов магнитного поля в Северном полушарии на 2200 км и в Южном на 900 км на распределение интенсивности космического излучения, приходящего к Земле на различных широтах.

Потоки космических лучей за период с 1960 по 2020 г.г. практически не изменились. На рис. 6 отчетливо виден 11-летний ход космических лучей. В то же время их потоки в минимумах солнечной активности 1965–1997 г.г. не только не увеличились, а даже уменьшились. Небольшое увеличение потоков космических лучей на (10–15)% в последних минимумах солнечной активности в 2009 и 2020 г.г., как уже отмечалось, связано с глубоким минимумом солнечной активности в эти периоды.

Это говорит о том, что всякие локальные изменения, происходящие с магнитным полем Земли, в том числе и движение магнитных полюсов, не приводят к заметным изменениям в геомагнитном поле, защищающем нашу планету от внешних воздействий.

Возможно, в далеком будущем нас ждет новая инверсия (изменение направления) геомагнитного поля. Но как показывают результаты палеомагнитных исследований, в прошлом Земля неоднократно переживала такие периоды. Анализ эрозии атмосферы под действием солнечного ветра в периоды инверсии не показывает сколько-нибудь заметного воздействия этих процессов на биосферу нашей планеты [20]. Даже в периоды инверсии геомагнитного поля атмосфера продолжает надежно защищать нашу планету от космических излучений. Расчеты, выполненные К.-Х. Глассмайером и И. Фогтом [21] для атмосферы земного типа, показали, что эквивалентная доза облучения в эти периоды может увеличиться не более чем в 2 раза.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] C. F. Gauss, *Allgemeine Theorie des Erdmagnetismus. Resultate aus den Beobachtung des magnetischen Vereins im Jahre 1838.* Gottingen: Dieterichsche Buchhandlung, 1839. Bd. 1. S. 1-57.

- [2] К. Гаусс, *Избранные труды по земному магнетизму*. Серия “Классики науки” (М., изд. Академия Наук СССР, 1952 г.), 342 с.
- [3] Е. Б. Дегтярева, Реферат: “Аналитическое представление магнитного поля Земли”, ИФЗ РАН, 2016 г. 18 с. <https://docplayer.com/61460924-Analiticheskoe-predstavlenie-magnitnogo-polya-zemli.html>.
- [4] International Association of Geomagnetism and Aeronomy, Working Group V-MOD. International Geomagnetic Reference Field: the eleventh generation. 2010. <https://www.ngdc.noaa.gov/IAGA/vmod/igrfhw.html>
- [5] J. Proudman, (July 1, 1916). “On the motion of solids in a liquid possessing vorticity”. Proc. R. Soc. Lond. A. 92: 408–424. Bibcode:1916RSPSA..92..408P. doi:10.1098/rspa.1916.0026.
- [6] G. I. Taylor, (March 1, 1917). “Motion of solids in fluids when the flow is not irrotational”. Proc. R. Soc. Lond. A. 93: 92–113. Bibcode:1917RSPSA..93...99T. doi:10.1098/rspa.1917.0007.
- [7] J. Larmor, Reports of the British Association **87**, 159 (1919).
- [8] Я. И. Френкель, Земной магнетизм. “Собрание избранных трудов. Научные статьи”. Том II (М.-Л., АН СССР, 1958). С. 572–583.
- [9] <https://krsk.sibnovosti.ru/pictures/0012/0540/model.gif>
- [10] wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp
- [11] http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/poles/figs/pole_ns.gif
- [12] http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/poles/figs/pole_ss.gif
- [13] <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/poles/dmvar.html>
- [14] D. F. Smart, M. A. Shea, World Grid of Calculated Cosmic Ray Vertical Cutoff Rigidities for Epoch 2000. Proc. 30th ICRC, Mexico, Vol. 1, P. 737–740, 2007. <https://indico.nucleares.unam.mx/event/4/session/39/contribution/730>.
- [15] В. С. Мурзин, *Астрофизика космических лучей. Учебное пособие для вузов* (М., Университетская книга, Логос, 2007).
- [16] <https://tools.izmiran.ru/cutoff2050/#>
- [17] A. E. Golenkov, A. K. Svirzhevskaya, N. S. Svirzhevsky, Yu. I. Stozhkov, Cosmic ray latitude survey in the stratosphere during the 1987 solar minimum. In Proc. 21-st ICRC, Adelaide, Australia, 1990. Adelaide: Physics Publications Univ. Adelaide, 1990, vol. 7, p. 14-17.
- [18] Потоки космических лучей в максимуме кривой поглощения в атмосфере и на границе атмосферы (1957–2020), https://sites.lebedev.ru/ru/DNS_FIAN/1949.html.

- [19] K. H. Lammer, J. H. Bredehöft, A. Coustenis, et al., *Astron. Astrophys. Rev.* **17**, 181 (2009).
- [20] Manasvi Lingam, *Habitability and the Evolution of Life Under Our Magnetic Shield.* Eos, 21.12.2020
- [21] K. KH. Glassmayer, J. Fogt, *Space Sci. Rev.* **155**, 387 (2010), *Space Sci. Rev.* 2010, 155, 387 - 410, **87**, p.159-160. DOI 10.1007/s00159-009-0019-z.

Поступила в редакцию 23 ноября 2021 г.

После доработки 29 ноября 2021 г.

Принята к публикации 30 ноября 2021 г.