

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУКФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ**Что ожидает человечество  
при инверсии магнитного поля Земли:  
угрозы мнимые и подлинные**

О.О. Царёва, Л.М. Зелёный, Х.В. Малова,  
М.В. Подзолко, Е.П. Попова, В.Ю. Попов

*Глобальное магнитное поле Земли, существующее благодаря работе внутреннего динамо-механизма, подвержено с момента своего формирования непрерывным изменениям, происходящим на различных масштабах времени. Палеоданные свидетельствуют о том, что сравнительно длительные периоды эволюционных изменений сменяются быстрыми инверсиями. Согласно наблюдениям современное магнитное поле Земли ослабевает, а магнитные полюсы смещаются, что может говорить о начале процесса инверсии. В работе проведена аппроксимация коэффициентами Гаусса компонента земного магнитного поля за последние 100 лет. Методом экстраполяции оценено, что магнитная дипольная компонента обратится в нуль к 3600 г., при этом геомагнитное поле будет определяться меньшей по величине квадрупольной магнитной составляющей. Развита численная модель, позволяющая оценить и провести сравнение потоков галактических и солнечных космических лучей в магнитосфере Земли, а также на её поверхности в периоды доминирования дипольного или квадрупольного полей. Принята во внимание роль атмосферы, поглощающей частицы космических лучей. Оценена величина радиационной опасности для людей на Земле и на высоте ~ 400 км, соответствующей орбите Международной космической станции. Показано, что в максимально неблагоприятный для человечества период инверсии, когда магнитное поле Земли достигнет минимума, поток галактических космических лучей на Земле может возрасти не более чем в три раза, а радиационная опасность не превысит предельно допустимой дозы. Таким образом, опасность периодов магнитной инверсии для людей и природы в целом не может привести к фатальному исходу, несмотря на то что в период инверсии структура магнитосферы должна кардинально измениться.*

**Ключевые слова:** геомагнитное динамо, инверсия магнитного поля, геомагнитное поле, моделирование, галактические космические лучи, солнечные космические лучи, радиационная безопасность

PACS numbers: 91.25.Cw, 91.25.Mf, 94.20.wq

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2017.07.038190>

**О.О. Царёва.** Институт космических исследований РАН,  
ул. Профсоюзная 83/32, 117997 Москва, Российская Федерация  
E-mail: olga8.92@mail.ru

**Л.М. Зелёный.** Институт космических исследований РАН,  
ул. Профсоюзная 83/32, 117997 Москва, Российская Федерация;  
Московский физико-технический институт (государственный  
университет), Институтский пер. 9, 141700 Долгопрудный,  
Московская обл., Российская Федерация  
E-mail: lzelenyi@iki.rssi.ru

**Х.В. Малова.** Научно-исследовательский институт ядерной физики  
им. Д.В. Скобельцына, Московский государственный университет  
им. М.В. Ломоносова,  
Ленинские горы 2, стр. 1, 119991 Москва, Российская Федерация;  
Институт космических исследований РАН,  
ул. Профсоюзная 83/32, 117997 Москва, Российская Федерация  
E-mail: hmalova@yandex.ru

**М.В. Подзолко.** Научно-исследовательский институт  
ядерной физики им. Д.В. Скобельцына,

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,  
Ленинские горы 2, стр. 1, 119991 Москва, Российская Федерация  
E-mail: spacerad@mail.ru

**Е.П. Попова.** Научно-исследовательский институт ядерной физики  
им. Д.В. Скобельцына, Московский государственный университет  
им. М.В. Ломоносова,  
Ленинские горы 2, стр. 1, 119991 Москва, Российская Федерация;  
Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН,  
ул. Б. Грузинская 10, стр. 1, 123242 Москва, Российская Федерация  
E-mail: popovaelp@mail.ru

**В.Ю. Попов.** Национальный исследовательский университет  
"Высшая школа экономики",  
ул. Мясницкая 20, 101000 Москва, Российская Федерация;  
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,  
физический факультет,  
Ленинские горы 2, стр. 1, 119991 Москва, Российская Федерация  
E-mail: masterlu@mail.ru

Статья поступила 27 июня 2017 г., после доработки 27 июля 2017 г.

## Содержание

1. Введение (208).
  2. Модель геомагнитного динамо (210).
  3. Постановка задачи. Описание численной модели (211).
  4. Радиационная обстановка в околоземном пространстве и на Земле (213).
  5. Обсуждение (217).
  6. Заключение (218).
- Список литературы (219).

## 1. Введение

Магнитное поле Земли подвержено циклическим изменениям на разнообразных временных масштабах, от минутных, суточных и вековых до масштабов в несколько миллионов лет. Самые длительные глобальные изменения магнитного поля Земли — инверсии — представляют собой смену направления геомагнитного поля, которое очень приближённо можно рассматривать как поле магнитного диполя. Инверсии в геологической истории Земли происходили неоднократно, о чём свидетельствуют палеомагнитные данные, основанные на термоостаточном намагничивании пород [1–3]. Восстановленная история инверсий геомагнитного поля (магнитохронологическая шкала) охватывает период порядка 4 млрд лет. Современная магнитная эпоха (период между сменами полярностей), называемая эпохой Брюнеса, началась примерно 730 тыс. лет назад, сменив эпоху Матуямы [2, 4–6]. В ходе детальных исследований установлено, что в эпохах существовали периоды кратковременной смены полярности — так называемые эпизоды. Например, в эпоху Матуямы выделяется произошедший примерно 1 млн лет назад эпизод Харамилло (Jaramillo), в котором сравнительно короткий интервал с инверсным магнитным полем составил порядка 60 тыс. лет. По оценкам сама инверсия может длиться от 100 лет (с наклоном диполя около  $2^\circ$  в год согласно [7]) до 5–10 тыс. лет [8–10].

Как правило, магнитные инверсии происходят на фоне заметного понижения напряжённости геомагнитного поля, которое начинается раньше смены полярности как таковой. Перед сменой полярности возрастает амплитуда вековых вариаций [5, 11]. Движение виртуального геомагнитного полюса (линии, соединяющей северный и южный магнитные полюсы) во время инверсии является, скорее, хаотическим, но происходит в пределах ограниченной полосы долгот. Магнитное поле Земли во время инверсий (называемое также палеогеомагнитным), скорее всего, имеет мультипольный характер, а для его описания применяются модели, основанные на механизме геомагнитного динамо [4, 12–14]. В ряде работ с помощью моделей магнитного поля воссоздают структуру магнитосферы во время инверсий геомагнитного поля и проводят анализ их влияния на околоземное пространство (например, с помощью магнитогидродинамических (МГД) моделей, представленных в работах [10, 15–17]). Хотя следует заметить, что вопросы о влиянии инверсий геомагнитного поля на структуру всей магнитосферы, систему токов в ней и плазменное содержание до сих пор нельзя считать окончательно решёнными.

Считается, что магнитные инверсии происходят хаотически [4]. Периоды между ними могут длиться от

нескольких десятков тысяч до нескольких миллионов лет. Последняя смена знака поля произошла около 730 тыс. лет назад, на границе эпох Матуямы и Брюнеса [18]. О том, что на Земле в настоящее время, возможно, начинается новая инверсия поля, могут свидетельствовать изменения магнитного поля в последнее столетие, показанные на рис. 1, который построен с использованием модели IGRF (International Geomagnetic Reference Field) магнитного поля Земли за период с 1900 по 2020 гг. Как видно из рисунка, за это время произошло значительное смещение магнитных полюсов (точек на условной поверхности Земли, в которых направление магнитного поля строго перпендикулярно поверхности): северный полюс сместился более чем на 2000 км, а южный — более чем на 1000 км. При этом изменение положения "геомагнитных" полюсов центрального и смещённого диполя [19] (точек, в которых ось диполя пересекает поверхность Земли) не очень велико. В то же время магнитный дипольный момент уменьшился на 7,5 %, а вклад старших гармоник магнитного поля, напротив, увеличился на  $\sim 50$  %. В предшествующие несколько столетий скорость ослабления дипольного поля составляла 5 % в столетие [20]. Эти данные позволяют предположить, что процесс инверсии будет представлять собой не буквально "переворот диполя", а преобразование поля в мультиполь (и затем, в конце инверсии, формирование нового диполя с диаметрально противоположным положением полюсов).

Важным фактором, влияющим на формирование верхней атмосферы и ионосферы Земли и, несомненно, оказывающим воздействие на биосферу, является приход из космического пространства потоков заряженных частиц галактических космических лучей (ГКЛ) — ядер атомов, ускоренных до энергий от  $10^9$  до  $10^{20}$  эВ. ГКЛ на 90 % состоят из протонов, 7 % составляют альфа-частицы и 3 % — ядра с зарядом  $Z > 2$  и электроны. В целом, магнитное поле Земли отклоняет заряженные частицы, поэтому в атмосферу могут проникнуть только частицы с энергиями, превышающими пороговые значения. Например, на  $50^\circ$  северной широты магнитная отсечка (пороговая энергия частиц) составляет 0,66 ГэВ для протонов и 1,3 ГэВ для альфа-частиц. Величина магнитной отсечки варьируется в зависимости от широты: на экваторе она выше, чем в области магнитных полюсов. Заряженные частицы с энергиями ниже пороговых большей частью захватываются магнитосферой и распределяются внутри неё, пополняя магнитосферные структуры: радиационные пояса, плазменный слой хвоста, кольцевой ток и др.

На высотах порядка нескольких десятков километров от поверхности Земли первичные космические лучи испытывают сильные взаимодействия с ядрами атомов воздуха с образованием пионов ( $\pi$ ), каонов (K), нуклон-антинуклонных пар, гиперонов и других частиц. Образующиеся заряженные пионы ( $\pi^\pm$ ) или распадаются с образованием мюонов и нейтрино, или далее взаимодействуют с ядрами. При сверхвысоких энергиях первичных частиц ( $E > 10^5$  ГэВ) число вторичных частиц-потомков, образующих так называемые широкие атмосферные ливни (ШАЛ) в ядерных и электронно-фотонных каскадах в атмосфере Земли, достигает  $10^6 - 10^9$ . Таким образом, вторжение ГКЛ в атмосферу может вызывать развитие каскадов из ядерно-активных частиц, а также электронно-фотонные

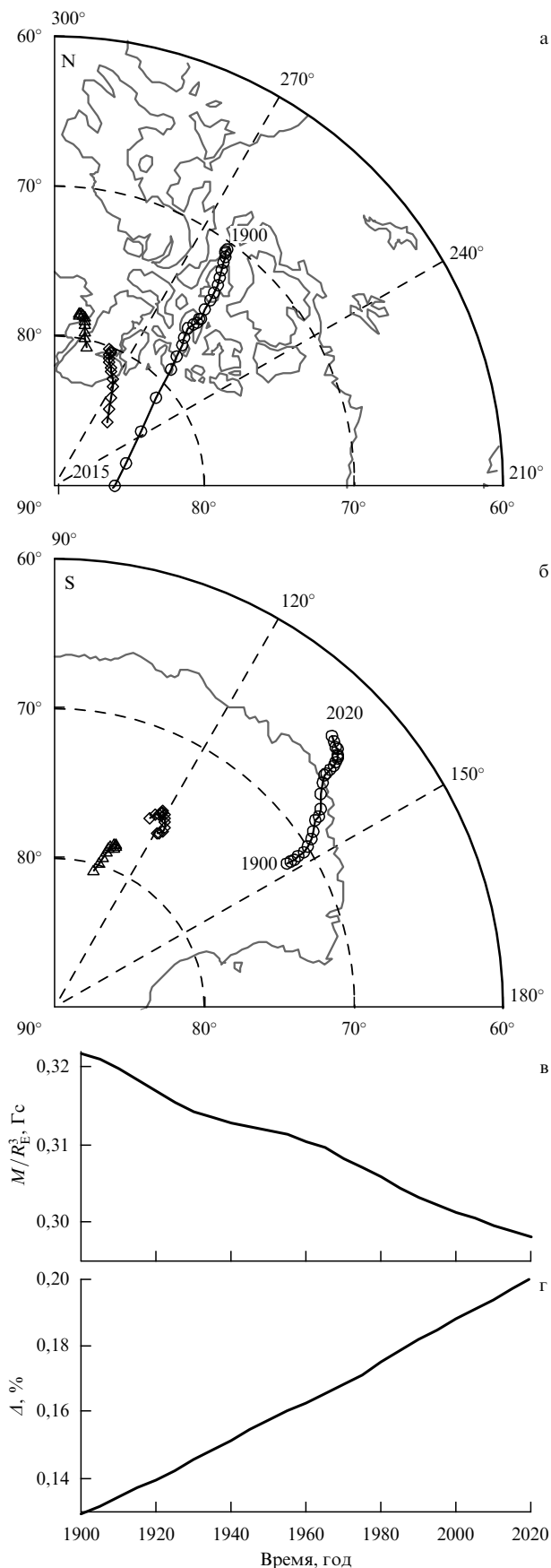


Рис. 1. Изменение положений (а) северных и (б) южных магнитных (кружки) и геомагнитных (треугольник — диполь, ромб — смещённый диполь) полюсов, (в) магнитного дипольного момента  $M$  и (г) вклада  $\Delta$  2-й и 3-й гармоник магнитного поля с 1900 по 2020 гг.

каскады. Максимальная генерация мюонов приходится на высоту  $\sim 10-20$  км. Поток высокоэнергетичных мюонов слабо поглощаются в атмосфере, поэтому на уровне моря вторичное космическое излучение состоит в основном из мюонов (жёсткая компонента интенсивностью  $J_\mu = 0,82 \times 10^{-2} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ ср}^{-1}$ ), электронов и фотонов (мягкая компонента интенсивностью  $J_\nu = 0,31 \times 10^{-2} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ ср}^{-1}$ ).

Пространственное распределение этих потоков в магнитосфере Земли зависит от конфигурации геомагнитного поля, а их величина — от солнечной активности и состояния возмущённости геомагнитного поля. Установлено, что интенсивность ГКЛ изменяется примерно вдвое в протифазе с солнечной активностью. Это связано с тем фактом, что в периоды максимальной солнечной активности возмущённое гелиосферное магнитное поле отклоняет заряженные частицы, пришедшие из глубокого космоса. В периоды минимума солнечной активности интенсивность космического излучения составляет примерно  $J \sim 0,2 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ ср}^{-1}$ , а в периоды максимума —  $J \sim 0,08 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ ср}^{-1}$ . Ядерные взаимодействия частиц ГКЛ с атомами атмосферы в конечном счёте приводят к изменению её состава и плотности. Характеристики атмосферы также изменяются вследствие выпадения захваченных частиц из радиационных поясов. Таким образом, для анализа и прогнозирования состояния атмосферы необходимо, чтобы были известны пространственное распределение и энергетические спектры потоков частиц ГКЛ. Для этого разработаны расчётные модели, учитывающие изменения потоков заряженных частиц в зависимости от солнечной активности. Такие модели должны использоваться совместно с моделью проникновения заряженных частиц в магнитосферу Земли.

Земная магнитосфера является мишенью не только для ГКЛ, но и для солнечных космических лучей (СКЛ) — ускоренных частиц, выбрасываемых из Солнца в результате солнечных вспышек или распадов протуберанцев. Образовавшиеся частицы: протоны, электроны и лёгкие ядра с энергиями от 0,1 МэВ до нескольких сотен МэВ (иногда до нескольких десятков ГэВ) — после взаимодействия с межпланетной средой могут достичь орбиты Земли. Влияние СКЛ на земную магнитосферу проявляется в основном или на больших высотах (например, на орбите Международной космической станции), или опосредованно — через наполнение радиационных поясов, магнитосферные бури, полярные выпадения частиц и т.д. Вторжение СКЛ в ионосферу полярных широт может вызывать дополнительную ионизацию и, соответственно, ухудшение радиосвязи на коротких волнах. Имеются данные о том, что СКЛ могут в значительной мере способствовать опустошению озонового слоя Земли. Усиленные потоки СКЛ также могут быть одним из главных источников радиационной опасности для экипажей и оборудования космических кораблей. Что касается радиационной опасности на Земле, то большая часть СКЛ как более низкоэнергетичная компонента по сравнению с ГКЛ отсекается магнитным полем Земли и поглощается атмосферой, поэтому СКЛ не могут оказывать существенного влияния на земной радиационный фон.

Детальная картина поведения магнитного поля во время инверсий отсутствует по причине сложности анализа палеомагнитных данных и большого временного

масштаба рассматриваемых событий [20, 21]. Известно, что магнитное поле Земли имеет кроме доминирующей дипольной компоненты квадрупольную компоненту, а также компоненты с более высокой мультипольностью. Существуют некоторые указания на то, что полная энергия магнитного поля не изменяется сильно во время инверсии, т.е. часть энергии дипольного магнитного поля может быть перераспределена среди высших мультипольных моментов [22–24]. Однако амплитуды этих компонент быстро затухают с увеличением расстояния и в случае уменьшения дипольной компоненты во время инверсии основной вклад в формирование магнитосферы Земли будет вносить главным образом квадрупольная компонента. Имеются данные (см., например, [23]) о том, что в некоторых инверсиях во время затухания диполя в основном могла преобладать квадрупольная компонента и её амплитуда могла возрастать примерно на 10 % по сравнению с современным уровнем. Такая конфигурация магнитного поля, возможно, была во время инверсии Харамильо [25].

Существуют оценки поведения магнитного поля во время инверсий в рамках моделей динамо [4]. Поскольку полная картина распределения потоков вещества в недрах Земли отсутствует, модели динамо могут воспроизводить разные сценарии поведения магнитного поля во время инверсий в зависимости от предположений о поведении вещества в жидком ядре Земли. Оценки показывают, что следствием ослабления магнитного поля Земли во время инверсии являются проникновение существенно большего потока ГКЛ во внутренние области магнитосферы и возрастание интенсивности ГКЛ/СКЛ у Земли и в околоземной области, в частности там, где проходят траектории искусственных спутников Земли и Международной космической станции (МКС). Инверсия — относительно редкое явление, которое никогда ранее не происходило за время существования *homo sapiens* на Земле, поэтому её неизбежное наступление вызывает закономерную тревогу у человечества и ставит вопрос о радиационной опасности для людей в период инверсии. За рамками настоящей статьи пока остаются часто обсуждаемые в научной литературе и средствах массовой информации вопросы опасности космического излучения для земных био- и техносфер, "сноса" атмосферы Земли в космическое пространство, исчезновения озонового слоя и другие элементы возможной экологической катастрофы.

В настоящей статье проведено исследование интенсивности потоков протонов ГКЛ/СКЛ и радиационной безопасности в околоземном пространстве и на Земле в период магнитной инверсии, для которого выбраны наиболее реалистичные сценарии (уменьшение магнитного поля диполя до 10 % или до нуля в момент инверсии). Для обоснования режима инверсии построена модель геомагнитного динамо, в рамках которой оценён общий тренд изменения компонент мультипольного поля магнитного поля Земли. На основании экстраполяции коэффициентов разложения поля делается оценка момента наступления эпохи инверсии, в который дипольное поле обратится в нуль, а далее знак магнитного поля должен измениться на всей поверхности Земли. С помощью численной модели магнитосферы Земли в момент инверсии и интегрирования траекторий частиц ГКЛ/СКЛ делается оценка радиационных доз на высотах 400 и 100 км, а также на поверхности Земли. Оце-

ниваются области выпадения энергетичных частиц на поверхности планеты.

## 2. Модель геомагнитного динамо

Для исследования режимов инверсии геомагнитного поля нами была использована нелинейная модель  $\alpha\Omega$ -динамо, описанная в работе [26] (см. уравнения (1), (2)), с учётом того, что радиус, ограничивающий область жидкого внешнего ядра Земли, в которой происходит генерация магнитного поля, составляет примерно 1/3 от радиуса планеты. Мы провели анализ параметрического пространства для дипольного и квадрупольного поля с помощью маломодового приближения [27].

Отметим, что маломодовое приближение — один из возможных способов получения упрощённых моделей, направленных на прояснение физики генерации магнитного поля небесных тел. Предполагается, что возбуждаемое магнитное поле звезды или планеты можно описать с помощью сравнительно небольшого числа параметров, что позволяет заменить уравнения динамо подходящим образом подобранной динамической системой уравнений не очень высокого порядка. Такой подход впервые был предложен в [28] и развит в работах [29–35].

Анализ уравнений динамо в нашем случае показал, что если дипольное поле имеет хаотические инверсии, то квадрупольное поле при этом не является постоянным и тоже определённым образом эволюционирует во времени, так что величина квадрупольного поля в момент инверсии дипольного поля носит случайный характер.

Исследование показало, что модель динамо воспроизводит режим инверсий в случае, когда величина какого-либо из управляющих параметров модели флуктуирует. В данной модели управляющими параметрами являются амплитуды дифференциального вращения, альфа-эффекта и меридиональных потоков. Отметим, что прямые измерения этих физических характеристик затруднены и в моделях в основном делаются только оценки их распределения по глубине жидкого ядра.

Альфа-эффект выражается в степени зеркальной асимметрии конвекции, т.е. в преобладании, например, правых вихрей над левыми в одном полушарии и левых вихрей над правыми в другом. Эта асимметрия правого и левого возникает в стратифицированной среде под действием силы Кориолиса. В работе [36] предложено качественное объяснение того, как флуктуации спиральности приводят к возникновению долговременной эволюции геомагнитного поля, сопровождаемой многочисленными инверсиями. Результаты [36] были подтверждены в [34] на основе использования маломодового приближения.

Поскольку модель [26] учитывает меридиональные потоки — глобальные конвективные потоки вещества в жидком внешнем ядре Земли, мы проверили, как такие потоки могут влиять на процесс инверсии. Исследование показало, что в режиме васцилляций магнитного поля (т.е. колебаний на фоне ненулевого среднего по времени значения) резкое убывание амплитуды меридиональной циркуляции примерно на 30 % приводит к инверсии магнитного поля.

На рисунке 2а показана теоретическая зависимость амплитуды дипольного поля Земли  $B(t)$  от времени  $t$  на основе решения уравнений модели динамо [26] для режима случайных инверсий, вызванных флуктуациями

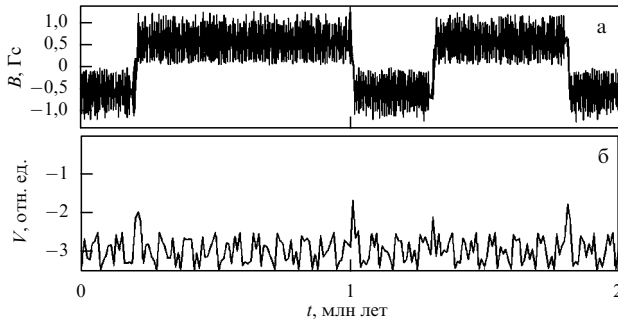


Рис. 2. Зависимость средней напряжённости дипольного магнитного поля на поверхности Земли (а) и скорости меридионального движения вещества (б) от времени для режима хаотических инверсий.



Рис. 3. Рассчитанные в модели геомагнитного динамо максимальные величины квадрупольного поля на поверхности Земли во время 102 инверсий.

меридиональных потоков. Шкала времени на рисунке охватывает период от 0 до 2 млн лет. Как видно из рисунка, большие флуктуации меридиональных потоков, приводящие к инверсии, редки — примерно один раз в несколько сотен тысяч лет. На рисунке 2б показана зависимость скорости меридионального движения вещества  $V(t)$  от времени  $t$  при предположении о том, что в основной части зоны генерации магнитного поля меридиональные потоки направлены противоположно вектору магнитного поля. Поскольку в данной статье нас интересует качественная картина механизма инверсии магнитного поля, значения меридиональных потоков на рис. 2 мы оставляем в модельных единицах.

В нашей модели величина квадрупольного поля во время инверсии дипольного носит случайный характер. На рисунке 3 представлен разброс максимальных значений амплитуд квадрупольного поля  $B$  на поверхности Земли во время прохождения дипольного поля через нуль для 102 последовательных инверсий. Как видно, на поверхности Земли напряжённость квадрупольного геомагнитного поля не превышает примерно 0,05 Гс.

### 3. Постановка задачи.

#### Описание численной модели

Наша задача — исследовать в рамках численной модели геомагнитного поля, как будут изменяться спектры СКЛ и ГКЛ, проникнувших внутрь магнитосферы Земли, вплоть до их попадания в атмосферу и оценить радиационную обстановку на поверхности Земли. С этой целью рассматривается модельная сферическая область вокруг Земли, магнитное поле  $\mathbf{B}_{\text{Earth}}$  которой можно представить как суперпозицию двух полей: дипольного и квадрупольного, взятых с разными весовыми коэффициентами. Схема модели с квадрупольной магнитосферой Земли изображена на рис. 4. Расчёты проводились в

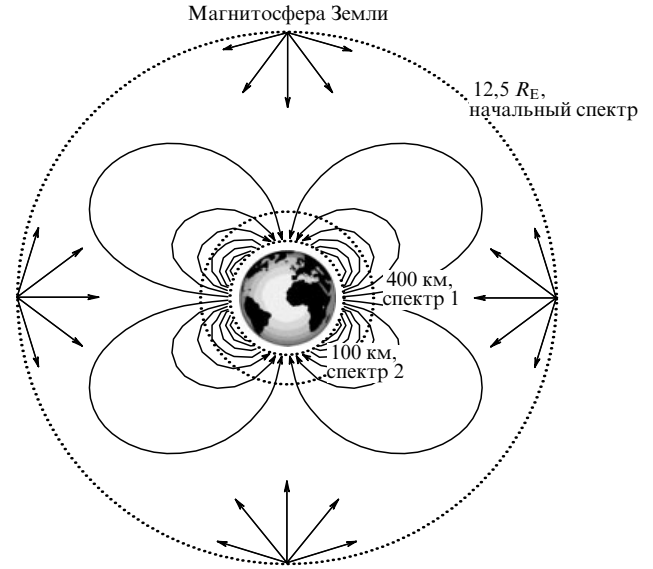


Рис. 4. Схема модели палеомагнитосферы Земли. Показаны силовые линии квадрупольного магнитного поля. Пунктирными линиями отмечены три уровня, на которых рассматриваются энергетические спектры частиц. На расстоянии  $12,5 R_E$  от Земли влияние магнитного поля Земли становится малым по сравнению с влиянием поля солнечного ветра, поэтому можно рассматривать источник исходных спектров ГКЛ на условной сфере данного радиуса. На расстоянии 400 км от Земли проходит траектория МКС (спектр 1 ГКЛ). В данной области часть потоков заряженных частиц отсекается магнитным полем Земли. Отмечена граница атмосферы на расстоянии 100 км от Земли (спектр 2 ГКЛ); стрелками показаны направления скоростей трассируемых в модели частиц.

солнечно-магнитосферной системе координат, в которой ось  $X$  направлена от центра Земли к Солнцу, ось  $Y$  — с утра на вечер, ось  $Z$ , совпадающая с осью магнитного диполя до инверсии, направлена на север.

Используется аксиально-симметричная модель магнитосферы, в которой влиянием кольцевого и хвостового тока, а также радиационных поясов можно пренебречь [17]. Межпланетное магнитное поле  $\mathbf{B}_{\text{IMF}}$  в этой модели не учитывается ( $\mathbf{B}_{\text{IMF}} = 0$ ). Со сферической поверхности радиусом  $12,5 R_E$ , центром которой является Земля (примерное положение сегодняшней магнитопаузы в лобовой части магнитосферы), по направлению к Земле запускаются модельные частицы, имитирующие протоны ГКЛ и СКЛ. Начальное распределение по энергиям от 10 МэВ до 100 ГэВ соответствует спектрам ГКЛ [37] и СКЛ [38]. Каждая частица случайным образом запускалась внутрь конуса, ось которого проходит через точку старта и центр Земли, с углом раскрытия, равным  $\pi/2$ , и трассировалась в заданном постоянном во времени магнитном поле  $\mathbf{B}$  без учёта электрических полей. Следовательно, модуль скорости частицы сохраняется ( $|\mathbf{v}| = \text{const}$ ), и уравнение движения такой, вообще говоря, релятивистской частицы в системе СИ имеет вид

$$\frac{d\mathbf{r}}{dt} = \mathbf{v}, \quad (1)$$

$$m \frac{d\mathbf{v}}{dt} = Ze \sqrt{1 - \frac{|\mathbf{v}|^2}{c^2}} \mathbf{v} \times \mathbf{B}.$$

В результате такого трассирования были рассчитаны энергетические спектры частиц на расстояниях от поверх-

ности Земли 400 км, где проходит траектория МКС, и 100 км, где располагается граница атмосферы. Были проведены оценки радиационной опасности на поверхности Земли вторичного излучения после прохождения протонами атмосферы. Для валидации методики проводились моделирование в современном дипольном поле и сравнение полученных результатов с данными измерений потоков радиации (на разных высотах), полученными в 2015 г.

При расчётах использовались два сценария инверсии. В первом сценарии предполагалось, что магнитное поле Земли в момент инверсии представляет собой суперпозицию остаточного дипольного поля, напряжённостью 10 % от сегодняшнего, и квадрупольного поля. Во втором сценарии магнитное поле Земли в момент инверсии предполагалось квадрупольным. Геомагнитное поле  $\mathbf{B}_{\text{Earth}}$  задавалось с использованием программы IGRF-12 [39, 40]. Потенциал магнитного поля  $U$  удовлетворяет уравнению Лапласа  $\Delta U = 0$ , решением которого является гармонический ряд

$$U(r, \theta, \phi) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n \frac{1}{r^n} [a_n^m \cos(m\phi) + b_n^m \sin(m\phi)] P_n^m(\cos \theta). \quad (2)$$

После нормировки радиального расстояния на радиус Земли  $R$  введём коэффициенты  $g_n^m = a_n^m / R^{n+2}$  и  $h_n^m = b_n^m / R^{n+2}$ , откуда получим

$$U(r, \theta, \phi) = R \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n \left(\frac{R}{r}\right)^{n+1} [g_n^m \cos(m\phi) + h_n^m \sin(m\phi)] \times P_n^m(\cos \theta). \quad (3)$$

Здесь  $r, \theta, \phi$  — геоцентрическая система координат,  $g_n^m(t)$  и  $h_n^m(t)$  — коэффициенты Гаусса, зависящие, вообще говоря, от времени  $t$ ,  $P_n^m$  — нормированные по правилу Шмидта полиномы Лежандра степени  $n$  и порядка  $m$ , имеющие вид

$$P_n^0(x) = P_{n,0}(x), \quad (4)$$

$$P_n^m(x) = \left(\frac{2(n-m)!}{(n+m)!}\right)^{1/2} P_{n,m}(x),$$

где

$$P_{n,m}(\cos \theta) = \sin^m \theta \frac{d^m}{d(\cos \theta)^m} P_n(\cos \theta).$$

Соответствующие компоненты магнитного поля  $\mathbf{B} = -\nabla U$  выражаются как

$$B_r = -\frac{\partial U}{\partial r}, \quad B_\theta = -\frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial \theta}, \quad B_\phi = -\frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial U}{\partial \phi}, \quad (5)$$

$$B_r = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n \left(\frac{R}{r}\right)^{n+2} (n+1) [g_n^m \cos(m\phi) + h_n^m \sin(m\phi)] \times P_n^m(\cos \theta),$$

$$B_\theta = -\sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n \left(\frac{R}{r}\right)^{n+2} [g_n^m \cos(m\phi) + h_n^m \sin(m\phi)] \times \frac{\partial P_n^m(\cos \theta)}{\partial \theta},$$

$$B_\phi = -\frac{1}{\sin \theta} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n \left(\frac{R}{r}\right)^{n+2} m [-g_n^m \sin(m\phi) + h_n^m \cos(m\phi)] \times P_n^m(\cos \theta). \quad (6)$$

Как описано выше, представим геомагнитное поле как суперпозицию дипольного и квадрупольного полей:

$$\mathbf{B}_{\text{Earth}} = \mathbf{B}_{\text{dip}} + \mathbf{B}_{\text{quadrup}}. \quad (7)$$

Первые три слагаемых разложения магнитного диполя  $\mathbf{B}_{\text{dip}}$  имеют вид

$$B_r^{\text{dip}} = 2 \left(\frac{R}{r}\right)^3 [g_1^0 \cos \theta + (g_1^1 \cos \phi + h_1^1 \sin \phi) \sin \theta],$$

$$B_\theta^{\text{dip}} = -\left(\frac{R}{r}\right)^3 [-g_1^0 \sin \theta + (g_1^1 \cos \phi + h_1^1 \sin \phi) \cos \theta], \quad (8)$$

$$B_\phi^{\text{dip}} = -\left(\frac{R}{r}\right)^3 (-g_1^1 \sin \phi + h_1^1 \cos \phi).$$

Магнитный квадруполь  $\mathbf{B}_{\text{quadrup}}$  представим в виде

$$B_r^{\text{q}} = 3 \frac{\sqrt{3}}{2} \left(\frac{R}{r}\right)^4 \left\{ g_2^0 \frac{3 \cos^2 \theta - 1}{\sqrt{3}} + (g_2^1 \cos \phi + h_2^1 \sin \phi) \times \right.$$

$$\left. \times \sin(2\theta) + [g_2^2 \cos(2\phi) + h_2^2 \sin(2\phi)] \sin^2 \theta \right\},$$

$$B_\theta^{\text{q}} = -\frac{\sqrt{3}}{2} \left(\frac{R}{r}\right)^4 \left\{ -g_2^0 \sqrt{3} \sin(2\theta) + (g_2^1 \cos \phi + h_2^1 \sin \phi) \times \right.$$

$$\left. \times 2 \cos(2\theta) + [g_2^2 \cos(2\phi) + h_2^2 \sin(2\phi)] \sin(2\theta) \right\}, \quad (9)$$

$$B_\phi^{\text{q}} = -\frac{\sqrt{3}}{2} \left(\frac{R}{r}\right)^4 \frac{1}{\sin \theta} \left\{ -(g_2^1 \sin \phi + h_2^1 \cos \phi) \sin(2\theta) + \right.$$

$$\left. + [-2g_2^2 \sin(2\phi) + 2h_2^2 \cos(2\phi)] \sin^2 \theta \right\}.$$

Зависимость коэффициентов  $g$  и  $h$  от времени в период от 1900 г. по 2020 г. известна из модели IGRF-12. В современную эпоху дипольные коэффициенты  $g_1^0, g_1^1, h_1^1$  убывают со временем, а квадрупольные  $g_2^0, g_2^1, g_2^2, h_2^1, h_2^2$  возрастают. Мы провели экстраполяцию старшего дипольного коэффициента до 4500 г. (рис. 5). Из рисунка видно, что в 3580 г. старший коэффициент дипольного поля обратится в нуль, т.е. при условии неизменности скорости убывания дипольного поля должна произойти инверсия магнитного поля.

На рисунке 6 изображена зависимость модуля напряжённости магнитного поля на поверхности Земли от широты и долготы. Далее все поля были рассчитаны с коэффициентами Гаусса, полученными на 2015 г. На ри-

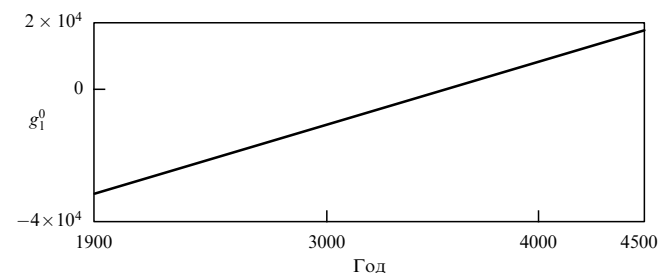
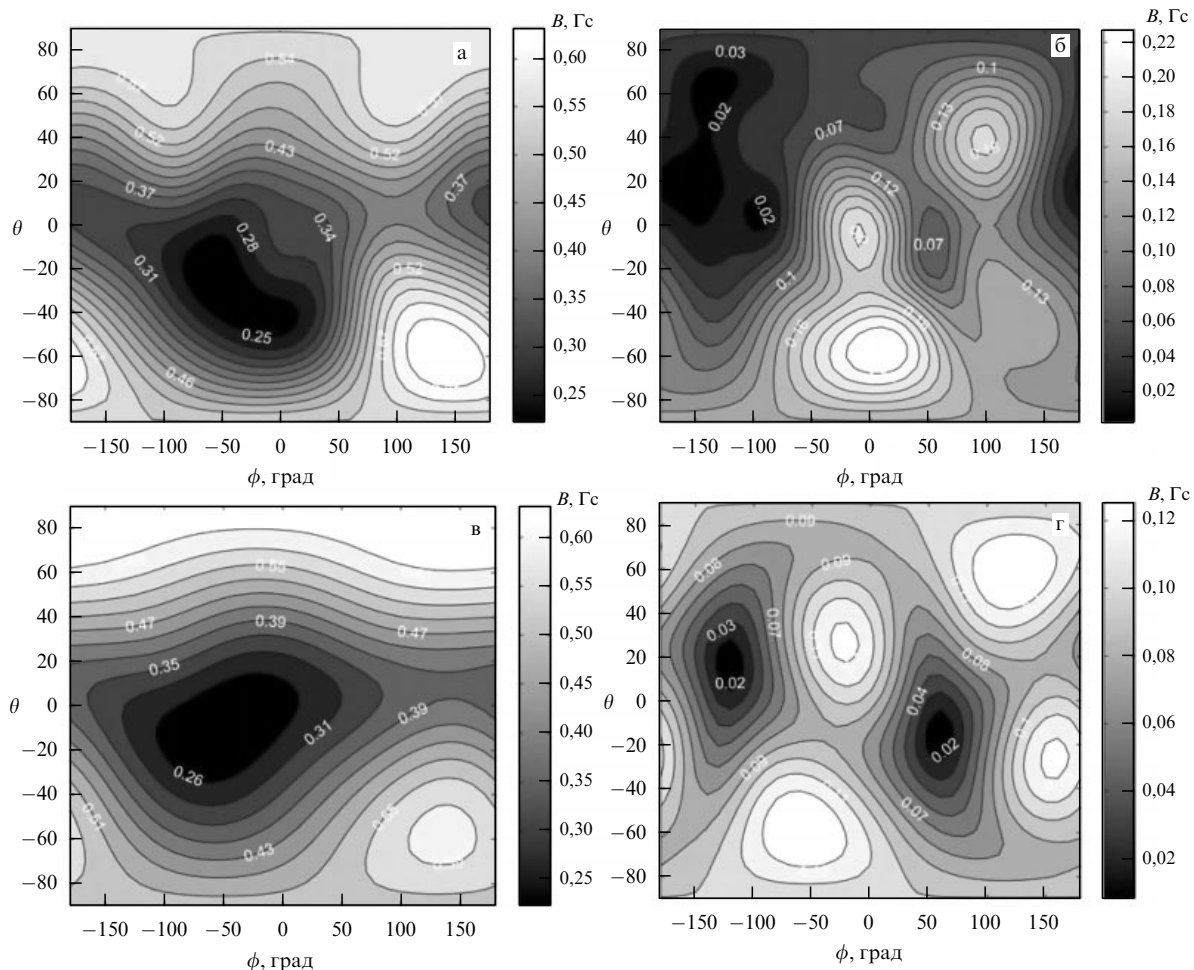


Рис. 5. Экстраполяционная зависимость от времени старшего дипольного коэффициента  $g_1^0$ .



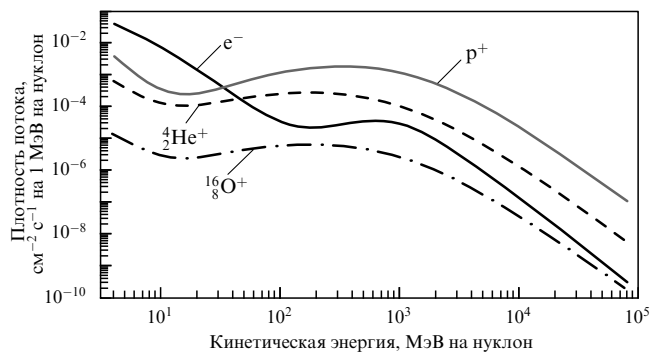
**Рис. 6.** Распределение напряжённости магнитного поля  $B$  [Гс] по широте  $\theta$  и долготе  $\phi$  на поверхности Земли с коэффициентами 2015 г.: (а) мультипольное магнитное поле до 5-го порядка включительно; (б) те же мультиполи, но без дипольной составляющей; (в) суперпозиция диполя и квадруполя; (г) квадруполь.

сунке ба приведены магнитные мультипольные составляющие геомагнитного поля до 5-го порядка включительно; на рис. 6б — мультиполи без дипольной составляющей. Как упоминалось выше, чем больше порядок мультипольной компоненты, тем быстрее её напряжённость убывает с увеличением расстояния. Поэтому мы ограничились рассмотрением комбинаций двух первых компонент: дипольной и квадрупольной. На рисунке 6в показано поле, содержащее мультиполи двух порядков: диполь и квадруполь, на рис. 6г — квадрупольное поле (предполагается, что сценарий магнитной инверсии, ожидаемой примерно в 3600-е годы, соответствует полному исчезновению дипольного поля). Можно также отметить, что напряжённости магнитных полей с мультиполями до 5-го порядка (рис. 6а) и до 2-го порядка (рис. 6в) мало различаются. Также будет рассмотрена суперпозиция 10% диполя и квадруполя. Такая конфигурация с неполным исчезновением дипольной составляющей является одним из предполагаемых сценариев инверсии поля в ряде работ [15, 17].

**4. Радиационная обстановка в околоземном пространстве и на Земле**

Поскольку энергии частиц ГКЛ в среднем на несколько порядков выше, чем у частиц СКЛ, и их основную долю

(92%) составляют протоны, будем считать, что более сильное воздействие на радиационную обстановку вблизи Земли оказывают потоки протонов ГКЛ и частиц ШАЛ, возникающих при взаимодействии протонов ГКЛ с атмосферой. На рисунке 7 показаны модельные логарифмические спектры частиц ГКЛ (протонов  $p^+$ , электронов  $e^-$ , ионов гелия  ${}^4_2\text{He}^+$  и кислорода  ${}^{16}_8\text{O}^+$ ) вне магнитосферы Земли. Видно, что плотность потока протонов ГКЛ с энергиями выше 30 МэВ существенно



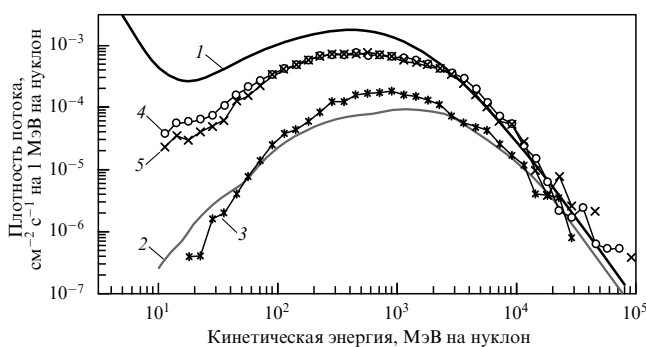
**Рис. 7.** Средние дифференциальные спектры частиц ГКЛ: протонов ( $p^+$ ), электронов ( $e^-$ ), ионов гелия ( ${}^4_2\text{He}^+$ ) и кислорода ( ${}^{16}_8\text{O}^+$ ) на расстоянии  $12,5 R_E$  вне магнитосферы.

превосходит плотности потоков других частиц ГКЛ. Поэтому в данной работе не учитывались вклады электронов и тяжёлых ионов ГКЛ в радиационную обстановку на Земле. Также известно [46], что протоны с энергией, меньшей порога образования пионов ( $\sim 300$  МэВ), при взаимодействии с атмосферой теряют энергию на ионизацию и возбуждение ядер атомов воздуха. С уменьшением энергии эффективное сечение ионизационных потерь протона возрастает, так что в результате все образующиеся малоэнергетичные протоны быстро замедляются и поглощаются. Таким образом, для оценки радиации на поверхности Земли будут рассмотрены лишь протоны ГКЛ с энергией выше 300 МэВ.

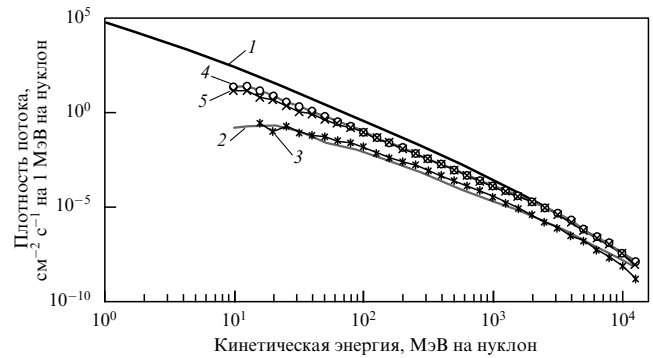
Немного иначе обстоит дело с радиацией на орбите МКС, оценка которой требует учёта влияния протонов ГКЛ и СКЛ. Плотность потока электронов по-прежнему не учитывалась, поскольку электроны значительно менее опасны, чем протоны, ввиду различий в механизмах их воздействия на организм [46].

Для верификации модели эволюции энергетических спектров частиц было проведено сравнение модельных и наблюдаемых спектров в современном (2015 г.) поле, в частности сравнение с данными измерений (2015 г.) на МКС. Дифференциальные спектры протонов ГКЛ и СКЛ на разных расстояниях от Земли были рассчитаны, согласно модели, с соответствующими спектрам источниками на сфере радиусом  $12,5 R_E$ . Сравнились результаты расчётов спектров на высоте 400 км и широте  $50^\circ - 55^\circ$  с данными МКС на высоте 400 км и широте  $\theta = 51,6^\circ$ . Полученные спектры представлены на рис. 8 и 9. Как видно из рисунков, расчётные спектры (кривые 3), соответствующие сегодняшним условиям, достаточно хорошо согласуются с данными МКС (кривые 2). Таким образом, можно сделать вывод, что модель достаточно адекватно рассчитывает потоки высокоэнергетичных заряженных частиц, проникающие внутрь магнитосферы Земли из межпланетного пространства.

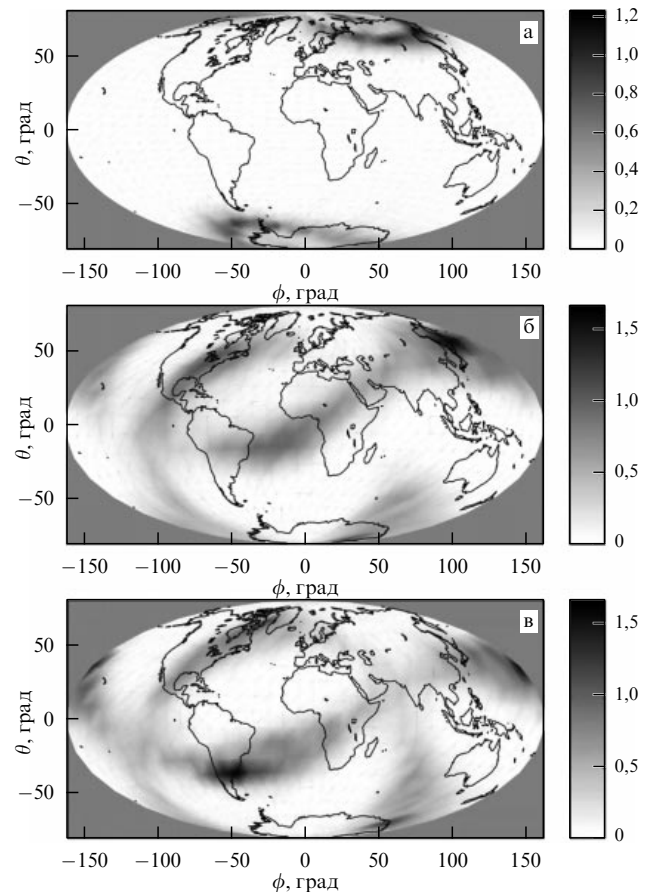
На рисунке 10 отображены доступные для протонов ГКЛ области на высоте 100 км от поверхности Земли до инверсии поля (рис. 10а) и во время инверсии: в сценарии инверсии на рис. 10б присутствуют 10 % дипольного и 90 % квадрупольного поля, а на рис. 10в — при наличии только квадрупольного поля.



**Рис. 8.** Полученные в экспериментах средние дифференциальные спектры протонов ГКЛ в минимуме солнечной активности: на орбите Земли вне магнитосферы (кривая 1), на орбите МКС на широте  $\theta = 51,6^\circ$  (кривая 2 отображает данные наблюдений) и спектры, рассчитанные на высоте 400 км и широте  $\theta = 50^\circ - 55^\circ$  для конфигураций поля сегодня (кривая 3) и в момент инверсии: 10 % диполь + квадруполь (кривая 4) и чистый квадруполь (кривая 5).



**Рис. 9.** Полученные в экспериментах средние дифференциальные спектры протонов СКЛ в максимуме солнечной активности: на орбите Земли вне магнитосферы (кривая 1), на орбите МКС на широте  $\theta = 51,6^\circ$  (экспериментальная кривая 2), а также спектры, рассчитанные с помощью представленной модели на высоте 400 км и широте  $\theta = 50^\circ - 55^\circ$  для конфигураций поля сегодня (кривая 3) и в момент инверсии: 10 % диполь + квадруполь (кривая 4) и чистый квадруполь (кривая 5).



**Рис. 10.** Процентное отношение протонов на поверхности Земли к общему числу протонов, долетевших до границы атмосферы Земли (100 км) (а) в 2015 г.; в сценариях инверсии, когда (б) присутствуют 10 % дипольного и 90 % квадрупольного поля; (в) в чисто квадрупольном поле.

Очевидно, что с исчезновением дипольной компоненты поля должны измениться не только география "высыпания" частиц, но и их количество. Увеличение числа протонов и зоны их покрытия в момент инверсии поля свидетельствует об ухудшении радиационной обстановки в околоземном космическом пространстве. На



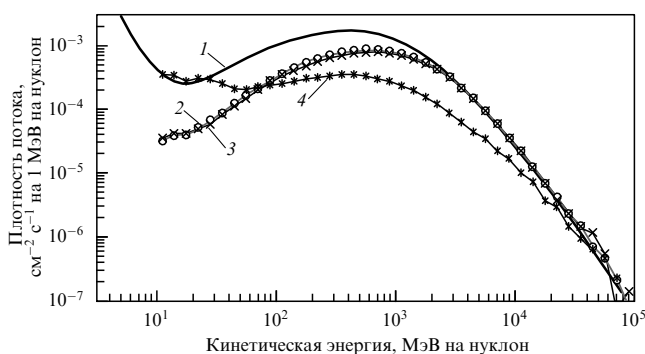
рисунке 10в (чистый квадруполь) можно также наблюдать проникновение частиц в область Южно-Атлантической аномалии (ЮАА) — область с самой слабой напряжённостью современного магнитного поля Земли, менее чем 0,32 Гс на уровне моря. ЮАА расположена между  $-50^\circ$  и  $0^\circ$  по широте и от  $-90^\circ$  до  $+40^\circ$  по долготе (рис. 6а). Однако на момент инверсии топология магнитного поля будет такова, что ЮАА окажется областью с большей напряжённостью поля (рис. 6б) и поток частиц в ней возрастёт.

При прохождении атмосферы количество "первичных" протонов уменьшается из-за ядерных взаимодействий и ионизационных потерь, но благодаря взаимодействию высокоэнергетичных "первичных" протонов с ядрами вещества возникает небольшое количество "вторичных" протонов, поскольку разрушенное ядро распадается на протоны и нейтроны с более низкими энергиями [41, 42]. Судя по результатам [43, 44], основной вклад в дозу радиационного облучения вносят положительные и отрицательные мюоны, а также нейтроны, рождённые в результате таких ядерных взаимодействий. Далее приведены оценки радиации на Земле, обусловленной вторичными частицами, которые практически не зависят от величины магнитного поля.

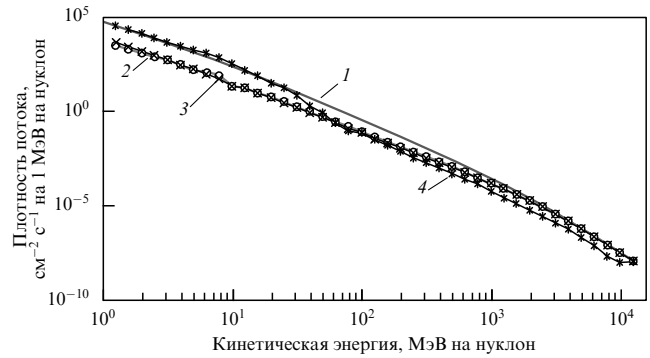
На рисунках 11 и 12 показаны средние энергетические спектры протонов ГКЛ и СКЛ на входе в магнитосферу и атмосферу Земли: на расстоянии  $12,5 R_E$  от (центра) Земли (кривая 1), на расстоянии 100 км от поверхности в 2015 г. (кривая 4) и для двух возможных конфигураций поля в момент магнитной инверсии (кривые 2, 3 отвечают сценариям, представленным соответственно на рис. 10б, в). Средние энергетические спектры этих двух инверсий совпали, хотя их картины пространственного выщипания частиц (рис. 10б, в) разнятся.

Из рисунков 11, 12 видно, что в 2015 г. плотности потоков протонов ГКЛ и СКЛ в околоземном пространстве с энергиями ниже 100 МэВ превосходят плотности потоков в момент инверсии. Однако, как обсуждалось выше, они не дают вклада в радиацию на поверхности Земли. Поэтому часть спектра с энергией менее 300 МэВ (порога образования пионов) при расчётах радиации на поверхности Земли не учитывалась.

Сравнение с рис. 10а показывает, что в околоземном пространстве (100–400 км) с учётом низкоэнергетичной



**Рис. 11.** Средние дифференциальные спектры протонов ГКЛ в минимуме солнечной активности на расстоянии  $12,5 R_E$  от центра Земли вне магнитосферы (кривая 1), на расстоянии 100 км от поверхности Земли для магнитного поля инверсий (кривые 2, 3 соответствуют сценариям, представленным соответственно на рис. 10б, в), и 2015 г. (кривая 4).



**Рис. 12.** Средние дифференциальные спектры протонов СКЛ в максимуме солнечной активности на расстоянии  $12,5 R_E$  от центра Земли вне магнитосферы (кривая 1), на расстоянии 100 км от поверхности Земли для магнитного поля инверсий (кривые 2, 3) и 2015 г. (кривая 4).

части спектра (менее 100 МэВ) средний радиационный фон оказывается больше в современном поле, чем в инверсном, за счёт высокоширотных областей с увеличенной радиацией. В то же время на широте орбиты МКС плотность потока протонов в момент инверсии всё же выше, чем в 2015 г. (см. рис. 8, 9).

Объяснить увеличение плотности потока протонов ГКЛ и СКЛ в области низких энергий для магнитного поля в момент инверсии можно следующим образом. Оценим, на каком расстоянии  $r^*$  от центра Земли внешнее магнитное поле способно существенно изменить начальные (без магнитного поля) траектории заряженных частиц, так чтобы они достигли заданной высоты над её поверхностью. Поскольку напряжённость магнитного поля диполя убывает с увеличением расстояния медленнее, чем напряжённость магнитного поля квадруполя, число замагниченных низкоэнергетичных частиц в современном магнитном поле (с превалирующей дипольной компонентой) выше, чем в момент инверсии поля. Критерием замагниченности является выполнение неравенства  $R_{Larm}(r^*)/r^* \leq 1$ , где  $R_{Larm}(r^*) = mv_{\perp}/(eB(r^*))$  — лармовский радиус вращающейся частицы,  $r^*$  — её радиальное расстояние до центра Земли.

Искомые верхние оценки  $r^*$  можно получить в простом численном эксперименте по трассированию частиц с энергией 10 МэВ (самых низкоэнергетичных в рассматриваемом диапазоне) в магнитном поле 2015 г.:  $r_{max}^* \approx 21,5 R_E$  — и в инверсионных полях: суперпозиции 10% диполя и квадруполя:  $r_{max}^* \approx 9 R_E$  — и чистого квадруполя:  $r_{max}^* \approx 5 R_E$ . Эти оценки показывают, что современное магнитное поле способно замагничивать низкоэнергетичные протоны на больших расстояниях. Замагниченные протоны могут не уходить во внешнюю магнитосферу и затем в межпланетное пространство, а захватываться на спиральные траектории и, двигаясь вдоль силовых линий магнитного поля на высоких широтах, попадать на Землю, что приводит к увеличению плотности их потока. Однако в квадрупольном поле большое количество частиц с энергией  $< 100$  МэВ не попадает на Землю, а уходит во внешние области магнитосферы и в конечном счёте в межпланетное магнитное поле.

Оценим биологическое воздействие протонов ГКЛ. Для этого представим формулу мощности эффективной

**Таблица 1.** Мощность дозы радиации [мЗв сут<sup>-1</sup>] на орбите МКС для трёх конфигураций магнитного поля и в его отсутствие в максимуме солнечной активности

|           | Поле 2015 г. | 10 % диполь + квадруполь | 0 % диполь + квадруполь | Без магнитного поля |
|-----------|--------------|--------------------------|-------------------------|---------------------|
| ГКЛ       | 0,23         | 0,77                     | 0,87                    | 1,08                |
| СКЛ       | 1,45         | 15,56                    | 22,28                   | 113,7               |
| ГКЛ + СКЛ | 1,68         | 16,33                    | 23,15                   | 114,8               |

**Таблица 2.** Мощность дозы радиации [мЗв сут<sup>-1</sup>] на орбите МКС для трёх конфигураций магнитного поля и в его отсутствие в минимуме солнечной активности

|           | Поле 2015 г. | 10 % диполь + квадруполь | 0 % диполь + квадруполь | Без магнитного поля |
|-----------|--------------|--------------------------|-------------------------|---------------------|
| ГКЛ       | 0,37         | 1,3                      | 1,4                     | 2                   |
| СКЛ       | 0,04         | 0,42                     | 0,62                    | 3,26                |
| ГКЛ + СКЛ | 0,41         | 1,72                     | 2                       | 5,26                |

**Таблица 3.** Мощность дозы радиации [мЗв сут<sup>-1</sup>] протонов с энергией > 300 МэВ на высоте 100 км от поверхности Земли для трёх конфигураций магнитного поля и в его отсутствие в период максимума солнечной активности

|           | Поле 2015 г. | 10 % диполь + квадруполь | 0 % диполь + квадруполь | Без магнитного поля |
|-----------|--------------|--------------------------|-------------------------|---------------------|
| ГКЛ       | 0,27         | 0,68                     | 0,73                    | 0,97                |
| СКЛ       | 0,31         | 0,6                      | 0,67                    | 1,9                 |
| ГКЛ + СКЛ | 0,58         | 1,28                     | 1,4                     | 3,9                 |

**Таблица 4.** Мощность дозы радиации [мЗв сут<sup>-1</sup>] протонов с энергией > 300 МэВ на высоте 100 км от поверхности Земли для трёх конфигураций магнитного поля и в его отсутствие в период минимума солнечной активности

|           | Поле 2015 г. | 10 % диполь + квадруполь | 0 % диполь + квадруполь | Без магнитного поля |
|-----------|--------------|--------------------------|-------------------------|---------------------|
| ГКЛ       | 0,46         | 1,25                     | 1,31                    | 1,87                |
| СКЛ       | 0,006        | 0,011                    | 0,012                   | 0,035               |
| ГКЛ + СКЛ | 0,47         | 1,26                     | 1,32                    | 1,91                |

дозы [45] в виде

$$H_R = \frac{1}{\rho} \int \Phi(E) Q(E) \frac{dE}{dx} dE, \quad (10)$$

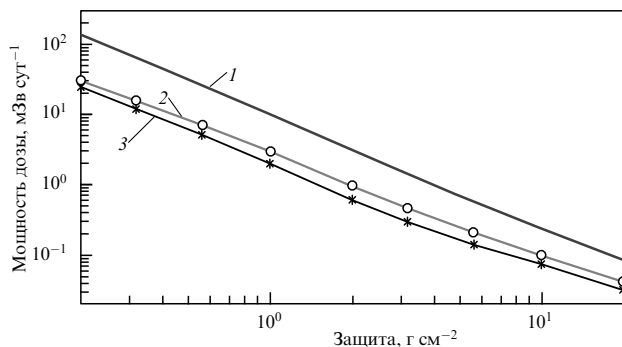
где  $Q(E)$  — коэффициент качества ионизирующих излучений (ГОСТ 8.496-83 ГСИ),  $\rho$  — плотность вещества среды,  $dE/dx$  — ионизационные потери, описываемые известной формулой [46],  $\Phi(E)$  — дифференциальный спектр. Исползованные в расчётах дифференциальные спектры приведены на рис. 8, 9, 11, 12. При этом на рис. 8 и 11 показаны спектры протонов ГКЛ при минимуме солнечной активности (СА) на высотах 400 км (на орбите МКС) и 100 км от поверхности Земли, а на рис. 9, 12 — спектры протонов СКЛ в максимуме СА на тех же высотах. Такой выбор представления спектров обусловлен тем, что максимальная доза радиации на поверхности Земли обнаруживается в периоды минимальной СА за счёт частиц ГКЛ и на орбите МКС — в периоды максимальной СА за счёт СКЛ.

Расчитанные мощности эффективных доз, обусловленных протонами ГКЛ и СКЛ, приведены в табл. 1–5. Согласно этим таблицам плотность потоков протонов ГКЛ и СКЛ для чисто квадрупольного поля выше, чем для суперпозиции 10 % диполя и квадруполья, поэтому в дальнейшем под понятием поля в момент инверсии мы будем подразумевать чисто квадрупольное поле.

На орбите МКС основной вклад в дозу радиации вносят протоны СКЛ при максимуме солнечной активности (86 % от суммарной мощности доз ГКЛ и СКЛ для современного поля и 97 % для чистого квадруполья). Из таблицы 1 видно, что в момент инверсии суммарная мощность доз составит 23,2 мЗв сут<sup>-1</sup> (или 8500 мЗв год<sup>-1</sup>). Согласно табл. 6 эти дозы, накопленные в течение года, превысят допустимый уровень радиации 200 мЗв, что может существенно ограничить срок пребывания космонавтов на орбите даже с учётом защиты. На рисунке 13 приведён график снижения мощности доз в зависимости от толщины защиты (от скафандра до обшивки МКС).

Совсем по-другому выглядит картина радиационного фона на МКС в минимуме СА. Спектры протонов СКЛ в минимуме СА на полтора порядка ниже спектров в максимуме СА, изображённых на рис. 8. Расчёты показали (см. табл. 2), что в момент инверсии суммарная мощность доз будет равна 2 мЗв сут<sup>-1</sup> (или 730 мЗв год<sup>-1</sup>).

В таблице 3 приведены результаты расчётов средних по поверхности планеты мощностей доз протонов ГКЛ и СКЛ с энергией более 300 МэВ на высоте 100 км. Вклад частиц ГКЛ и СКЛ в радиацию на данной высоте примерно одинаков как для современного поля, так и для поля в момент инверсии. Однако в радиацию на поверхности Земли основной вклад вносят высокоэнергетичные протоны ГКЛ, доза которых на высоте 100 км, как видно из табл. 3 и 4, в максимуме СА в два раза



**Рис. 13.** Средняя мощность эквивалентной дозы радиации за разными защитами в максимуме СА на орбите МКС от частиц радиационных поясов, СКЛ и ГКЛ (кривая 3) и от СКЛ и ГКЛ в отсутствие магнитосферы (кривая 1) и в квадрупольном поле (кривая 2).

**Таблица 5.** Уточнённая мощность дозы радиации [мЗв год<sup>-1</sup>] на поверхности Земли для трёх конфигураций магнитного поля и в его отсутствие (в период минимума солнечной активности)

|              |                          |                         |                     |
|--------------|--------------------------|-------------------------|---------------------|
| Поле 2015 г. | 10 % диполь + квадруполь | 0 % диполь + квадруполь | Без магнитного поля |
| 0,3          | 0,8                      | 0,85                    | 1,2                 |

**Таблица 6.** Степень воздействия доз  $\gamma$ -излучения на человека

| Доза, мЗв | Действие на человека                           |
|-----------|--|
| 0–200     | Отсутствие явных повреждений                   |
| 200–500   | Возможное изменение состава крови              |
| 500–1000  | Изменение состава крови, повреждения           |
| 1000–2000 | Повреждения, возможная потеря трудоспособности |
| 2000–4000 | Нетрудоспособность, возможная смерть           |
| 4000      | Смертность 50 %                                |
| 6000      | Смертельная доза                               |

меньше, чем в минимуме. Соответственно, можно ожидать такого же отношения доз радиации на поверхности.

В таблице 4 приведены мощности доз протонов ГКЛ и СКЛ с энергией более 300 МэВ на высоте 100 км в минимуме СА. Как и ожидалось, в этом случае частицы СКЛ не вносят существенного вклада в суммарную радиацию.

Для оценки радиации на поверхности Земли найдём отношение мощностей доз на высоте 100 км для инверсного ( $H_{R3} = 1,32$  мЗв сут<sup>-1</sup>) и современного (2015 г.) ( $H_{R2} = 0,47$  мЗв сут<sup>-1</sup>) полей:  $H_{R3}/H_{R2} \approx 3$ . Если предположить, что магнитное поле Земли полностью отсутствует ( $H_{R3} = 1,9$  мЗв сут<sup>-1</sup>), то соответствующее отношение мощностей доз составит  $H_{R1}/H_{R2} \approx 4$ . Полагая приближённо свойства атмосферы неизменными, можно предположить, что полученный коэффициент будет сохраняться на поверхности Земли и в момент инверсии.

Согласно модели PARMA (PHITS-based Analytical Radiation Model in the Atmosphere; PHITS — Particle and Heavy Ion Transport code System) для оценки потоков КЛ [44], в 2015 г. в минимуме солнечной активности облучение человека на уровне моря за счёт космических лучей составило примерно  $8 \times 10^{-4}$  мЗв сут<sup>-1</sup>, или 0,3 мЗв год<sup>-1</sup>. Исходя из данных табл. 6 по воздействию на организм

человека суммарной годовой дозы радиации можно сделать вывод о том, что её увеличение примерно в три или даже четыре раза не будет представлять опасности для людей на Земле в течение периода естественной продолжительности человеческой жизни ( $\leq 100$  лет). Предполагаемые мощности доз на поверхности Земли в минимуме СА для полноты картины уточнены в табл. 5.

### 5. Обсуждение

Процесс инверсии геомагнитного поля, вероятно, уже начавшийся в нашу эпоху, может влиять на структуру земной магнитосферы, радиационную обстановку [47, 48] и на жизнь на Земле в целом [9, 10, 16, 49, 50]. Во время инверсии возможно кроме переворота диполя движение квадрупольной компоненты. В этом случае магнитные аномалии поменяют своё расположение, что тоже даст вклад в перераспределение космической радиации, достигающей Земли.

В работе [49] предполагалось, что в период магнитной инверсии на Землю могли попадать частицы от Солнца, которые почти не отклоняются магнитным полем, и эти потоки солнечных частиц вместе с частицами из радиационных поясов должны сделать невозможной дальнейшую эволюцию всего живого на Земле. Однако позднее поступило возражение в работе [50], что даже если бы геомагнитное поле на Земле полностью отсутствовало, то никакого прямого влияния на биосферу со стороны энергетичных частиц ожидать не следует, так как атмосфера эффективно поглощает первичные частицы солнечного и космического происхождения. В подтверждение этого было показано [10], что на высотах от 18 км до 12 км над уровнем моря эквивалентная доза облучения космическими частицами уменьшается примерно в два раза, а на высотах от 12 км до 6 км — примерно в 7–10 раз, т.е. атмосфера играет роль надёжного щита от первичных космических частиц.

Однако экранирование Земли атмосферой всё же не является совершенным, поэтому проблема влияния процессов магнитного переполносования на живых обитателей Земли пока остаётся нерешённой. Проблема должна рассматриваться в комплексе всех факторов, определяющих условия существования жизни на планете [8–10, 51, 52]. Последствиями магнитной инверсии могут быть, помимо повышенной радиации, истощение озонового слоя [53–56] и разнообразные климатические изменения на Земле [51, 57]. В статье [58] утверждается, что такая неотъемлемая часть магнитосферы, как радиационные пояса, должна исчезнуть, когда во время магнитной инверсии минимизируется дипольное магнитное поле и останется только квадрупольная составляющая. Некоторые авторы находят достаточно убедительные корреляции между магнитными эпохами/эпизодами и появлением и исчезновением видов живых существ на Земле [9, 10, 47, 48], эпохами обледенений [59]. Похоже, что причинно-следственные связи между жизнью и геомагнитным полем устанавливаются опосредованно и представляют собой сложную цепь разнообразных процессов [60, 61]. Показано, что смена полярности магнитного поля достаточно хорошо коррелирует с периодами ускоренного вымирания некоторых видов живых организмов и появления новых видов [62, 63]. Подтверждена корреляция между изменением полярности и растительными границами на Земле [64].

Таким образом, влияние инверсий на развитие биосферы, в частности на человека, может быть существенным, хотя вполне возможно, что подобные изменения проявляются на масштабах палеомагнитных шкал времени, а не в течение жизни отдельных особей или даже нескольких их поколений.

В отличие от низкоэнергичных частиц СКЛ, потоки высокоэнергичных ГКЛ в период исчезновения земного дипольного поля будут проникать в гораздо больших количествах внутрь магнитосферы и облучать поверхность Земли. Длительный, в течение одной тысячи или более лет, период повышенной радиации может оказаться опасным испытанием для человечества, технологической среды его обитания и его экспедиций в околоземное космическое пространство. Вопрос стоит таким образом: выживет ли человечество под действием увеличенных потоков радиации на Земле в период магнитных инверсий?

Чтобы внести свою лепту в решение этого вопроса, мы провели численное моделирование, с помощью которого оценили радиационные угрозы ГКЛ и СКЛ для людей на поверхности Земли и на космической станции на высоте 400 км в период инверсии, когда, согласно гипотезе, дипольная составляющая магнитного поля должна полностью или частично исчезнуть. Результаты моделирования и проведённого анализа свидетельствуют о том, что наибольшую опасность для МКС на высоте 400 км от поверхности представляют частицы СКЛ, поток которых должен возрасти в 14 раз по сравнению с современным.

Таким образом, получаемые космонавтами дозы облучения составят  $6000 \text{ мЗв год}^{-1}$  или  $8500 \text{ мЗв год}^{-1}$  (без защиты) в максимуме СА. Большая часть низкоэнергичных частиц солнечного ветра будет поглощаться атмосферой и не сможет проникнуть на Землю. В то же время радиация на поверхности Земли должна увеличиться за счёт вторичных частиц ГКЛ (мюонов) и лучистой радиации, которые имеют такие энергии, при которых атмосфера практически прозрачна для их распространения.

Предполагая, что свойства атмосферы к моменту инверсии останутся прежними, можно предсказать увеличение радиации на Земле в три раза в периоды солнечного минимума и в два раза в периоды максимума. Однако с учётом того, что сегодня в минимуме СА радиационный фон на уровне моря составляет  $8,02 \times 10^{-4} \text{ мЗв сут}^{-1}$ , увеличение в три раза достаточно низкой величины радиационного фона не должно повлиять на радиационную безопасность людей. Тем не менее нет никакой уверенности в том, что в масштабе полного времени инверсии, составляющего 5–10 тыс. лет, повышенный радиационный фон является совершенно безопасным с точки зрения здоровья людей и всех живых существ на Земле. Нельзя исключить, что накопление генетических мутаций [65–67] может иметь отдалённые последствия и проявиться на большом масштабе времени — порядка длительности инверсии или более.

Подводя итоги, можно сказать, что результаты нашей работы, с одной стороны, опровергают те работы, в которых предполагается существенное влияние повышенной радиации на всё живое на Земле в момент инверсии: результаты не свидетельствуют о критическом повышении радиационного фона на Земле. В то же время они носят предупреждающий характер, говоря о

радиационной опасности при нахождении людей в космосе (например, на орбитальных станциях) в период магнитной инверсии, при этом лишь на определённых орбитах (на широте  $< 60^\circ$ ).

## 6. Заключение

В настоящей статье рассмотрен возможный сценарий исчезновения дипольной магнитной компоненты геомагнитного поля во время инверсии магнитного диполя Земли — с этой целью построена модель  $\alpha\Omega$ -динамо для дипольной и квадрупольной компонент. Рассмотрены два возможных сценария инверсии: 1) с квадрупольным и 10%-ным дипольным магнитными полями и 2) только с квадрупольным полем. Для обоих сценариев рассчитаны спектры протонов ГКЛ и СКЛ, распределение их потоков на планете и оценено изменение средних мощностей эффективных доз протонов.

Показано, что на поверхности Земли средние мощности эффективных доз протонов ГКЛ (вклад СКЛ незначителен) возрастут примерно в три раза по сравнению с таковыми в 2015 г., при предположении неизменной толщины атмосферы и её состава. Показано, что вследствие изменения конфигурации магнитного поля области повышенной радиации перераспределятся по поверхности Земли (сегодня это области северного и южного магнитных полюсов), что может негативно сказаться на здоровье людей, живущих в данных регионах.

На Земле радиация, вызванная в основном частицами ГКЛ, антикоррелирует с периодами солнечной активности, т.е. она максимальна в периоды минимальной активности Солнца. Что касается МКС, то максимальная радиация, обусловленная проникновением на станцию частиц СКЛ и ГКЛ, коррелирует с периодами максимальной солнечной активности, поскольку основной вклад в радиационную обстановку на станции вносят частицы СКЛ. Согласно оценкам, в момент инверсии в максимуме активности Солнца мощность эффективных доз протонов СКЛ и ГКЛ на орбите МКС (на широте  $51,6^\circ$ , 400 км) повысится в 14 раз по сравнению с таковой в 2015 г., что связано с широтным перераспределением радиации. При этом общий радиационный фон на высоте 400 км в момент инверсии может оказаться ниже в 4,5 раза из-за уменьшения захвата низкоэнергичной компоненты СКЛ малой по размеру квадрупольной магнитосферой Земли.

Основным вопросом, который решался в данной статье, являлся вопрос о реальности угрозы повышенной радиации для жизни людей на Земле во время магнитной инверсии. Полученные нами результаты дают отрицательный ответ на этот вопрос. Действительно, хотя радиационный фон в среднем должен возрасти примерно в три раза в период солнечного минимума, а области повышенной радиации перераспределятся и их площади, по-видимому, увеличатся в соответствии с уменьшением дипольного магнитного поля во времени, такие дозы не являются опасными для людей и других живых существ. В то же время для космонавтов, работающих на МКС на высоте 400 км в период магнитной инверсии, увеличение дозы радиации в 14 раз может быть опасным, поэтому, несомненно, понадобится коррекция орбит космических аппаратов.

Следует отметить, что влияние повышенной радиации на земную биосферу и эволюция магнитосферы на

больших масштабах времени во время магнитных инверсий — это малоисследованные области, требующие более глубокого изучения. Дальнейшее рассмотрение деталей радиационной обстановки на Земле и в её окрестности с учётом разных сценариев изменения магнитного поля во время инверсии является целью будущих исследований авторов настоящей статьи.

#### Благодарности

Авторы выражают искреннюю признательность директору Научно-исследовательского института ядерной физики им. Д.В. Скобельцына Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова М.И. Панасюку, И.И. Алексееву, В.В. Калегаеву, С.И. Свертилову и В.И. Галкину за обсуждение результатов работы и ценные предложения по её развитию. Авторы благодарят В.В. Бенгина (Институт медико-биологических проблем РАН) и Иорданку Семкову (Space Research and Technology Institute, Bulgarian Academy of Sciences) за консультации по вопросам расчёта доз.

Работа Л.М.З. поддержана грантами Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) 16-02-00479 и 16-52-16009-НЦНИЛ-а. Работа Е.П.П. поддержана Российским научным фондом (грант 16-17-10097). Работа М.В.П. выполнена при поддержке грантом РФФИ 17-29-01022.

#### Список литературы

- Vine F J, Matthews D H *Nature* **199** 947 (1963)
- Gubbins D *Rev. Geophys.* **32** 61 (1994)
- Korte M, Manda M *Earth Planets Space* **60** 937 (2008)
- Jacobs J A *Reversals of the Earth's Magnetic Field* (New York: Cambridge Univ. Press, 1994)
- Gubbins D, Kelly P J *Geophys. Res.* **100** 14955 (1995)
- Soler-Arechalde A M et al. *Front. Earth Sci.* **3** 11 (2015)
- Sagnotti L et al. *Geophys. J. Int.* **199** 1110 (2014)
- Glassmeier K-H et al. *Int. J. Astrobiol.* **8** 147 (2009)
- Glaßmeier K-H, Soffel H, Negendank J F W, in *Geomagnetic Field Variations* (Advances in Geophysical and Environmental Mechanics and Mathematics, Eds K-H Glaßmeier, H Soffel, J F W Negendank) (Berli: Springer-Verlag, 2009) p. 1
- Glassmeier K-H, Vogt J *Space Sci. Rev.* **155** 387 (2010)
- Hoffman K A *Nature* **359** 789 (1992)
- Kida S, Araki K, Kitauchi H J. *Phys. Soc. Jpn.* **66** 2194 (1997)
- Olson P, Driscoll P, Amit H *Phys. Earth Planet. Inter.* **173** 121 (2009)
- Sheyko A, Finlay C C, Jackson A *Nature* **539** 551 (2016)
- Vogt J et al. *J. Geophys. Res.* **109** A12221 (2004)
- Glassmeier K-H et al. *Ann. Geophys.* **22** 3669 (2004)
- Stadelmann A et al. *Earth Planets Space* **62** 333 (2010)
- Максимочкин В И, Целебровский А Н, Шрейдер А А *Уч. зап. физ. фак. МГУ* **3** 1631910 (2016)
- Schmidt A *Gerlands Beiträge Geophys.* **41** 346 (1934)
- Merrill R T, McFadden P L *Rev. Geophys.* **37** 201 (1999)
- Valet J, Meynadier L *Nature* **366** 234 (1993)
- Williams I, Fuller M J. *Geophys. Res.* **86** 11657 (1981)
- Clement B M, Kent D V *Phys. Earth Planet. Inter.* **39** 301 (1985)
- Clement B M *Earth Planet. Sci. Lett.* **104** 48 (1991)
- Bradford M C, Kent D V *J. Geophys. Res.* **89** 1049 (1984)
- Popova H J. *Phys. Conf. Ser.* **681** 012021 (2016)
- Попова Е П *УФН* **186** 577 (2016); Popova E P *Phys. Usp.* **59** 513 (2016)
- Ruzmaikn A A *Comm. Astrophys.* **9** 85 (1981)
- Kitiashvili I, Kosovichev A G *Astrophys. J.* **688** L49 (2008)
- Kitiashvili I, Kosovichev A G *Geophys. Astrophys. Fluid Dyn.* **103** 53 (2009)
- Соколов Д Д, Нефедов С Н *Вычислительные методы и программирование* **8** 195 (2007)
- Нефедов С Н, Соколов Д Д *Астрон. журн.* **87** 278 (2010); Nefedov S N, Sokoloff D D *Astron. Rep.* **54** 247 (2010)
- Соколов Д Д и др. *Письма в Астрон. журн.* **34** 842 (2008); Sokoloff D D et al. *Astron. Lett.* **34** 761 (2008)
- Собко Г С и др. *Геоманетизм и аэронавигация* **52** 271 (2012); Sobko G S et al. *Geomagn. Aeronom.* **52** 254 (2012)
- Popova H *Magnetohydrodynamics* **49** 59 (2013)
- Hoynig P *Astron. Astrophys.* **272** 321 (1993)
- ISO 15390:2004. Space environment (natural and artificial) – Galactic cosmic ray model, <https://www.iso.org/standard/37095.html>
- Ныммик Р А *Космические исследования* **31** 51 (1993)
- Thébault E, Finlay C C, Toh H *Earth Planets Space* **67** 158 (2015)
- Thébault E et al. *Earth Planets Space* **67** 79 (2015)
- Гальпер А М *Космические лучи* (М.: МИФИ, 2002)
- Калмыков Н Н, Куликов Г В, Роганова Т М, в сб. *Модель космоса* Т. 1 (Под ред. М И Панасюка) (М.: КДУ, 2007) с. 62
- Sato T et al. *Radiat. Res.* **170** 244 (2008)
- Sato T *PLoS ONE* **10** e0144679 (2015)
- Dietze G, in *Proc. of the IRPA-10, 10th Intern. Congress of the Intern. Radiation Protection Association, 14–19 May 2000, Hiroshima, Japan* (Hiroshima: IRPA, 2000) p. EO-3
- Антонов Р А, в сб. *Модель космоса* Т. 1 (Под ред. М И Панасюка) (М.: КДУ, 2007)
- Siscoe G L, Chen C-K *J. Geophys. Res.* **80** 4675 (1975)
- Saito T, Sakurai T, Yumoto K *Planet. Space Sci.* **26** 413 (1978)
- Uffen R J *Nature* **198** 143 (1963)
- Sagan C *Nature* **206** 448 (1965)
- Kirkby J *Surv. Geophys.* **28** 333 (2007)
- Kirkby M J et al. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* **15** 3741 (2011)
- Sinnhuber B-M et al. *Geophys. Res. Lett.* **30** 1580 (2003)
- Melott A L et al. *Geophys. Res. Lett.* **32** L14808 (2005)
- Vogt J et al. *J. Geophys. Res.* **112** 6216 (2007)
- Winkler H et al. *J. Geophys. Res.* **113** 2302 (2008)
- Svensmark H, Friis-Christensen E *J. Atmos. Solar Terr. Phys.* **59** 1225 (1997)
- Lemair J F, Singer S F, in *Dynamics of the Earth's Radiation Belts and Inner Magnetosphere* (Geophysical Monograph, Vol. 199, Eds D Summers et al.) (Washington, DC: American Geophysical Union, 2012) p. 355
- Doake C S M *Nature* **267** 415 (1977)
- Simpson J F *Geol. Soc. Am. Bull.* **77** 197 (1966)
- Doake C S M *Earth Planet. Sci. Lett.* **38** 313 (1978)
- Opdyke N D *Int. J. Bioclimat. Biometeorol.* **3** 253 (1959)
- Watkins N D, Goodell H G *Science* **156** 1083 (1967)
- Black D I *Earth Planet. Sci. Lett.* **3** 225 (1967)
- Harrison C G A, Somayajulu B L K *Nature* **212** 1193 (1966)

66. Zarrouk N, Bennaceur R *Int. J. Astrobiol.* **8** (3) 169 (2009) 16–20 July 2007, San Juan, Puerto Rico (ASP Conf. Ser., Vol. 420, Eds K J Meech et al.) (San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, 2009) p. 259
67. Ponert J, Příhoda P, in *Bioastronomy 2007, Molecules, Microbes and Extraterrestrial Life, Proc. of a Workshop*, 16–20 July 2007, San Juan, Puerto Rico (ASP Conf. Ser., Vol. 420, Eds K J Meech et al.) (San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, 2009) p. 259

### What expects humankind during the inversion of the Earth's magnetic field: threats imagined and real

O.O. Tsareva<sup>(1)</sup>, L.M. Zelenyi<sup>(1,2)</sup>, H.V. Malova<sup>(1,3)</sup>, M.V. Podzolko<sup>(3)</sup>, E.P. Popova<sup>(3,4)</sup>, V.Yu. Popov<sup>(5,6)</sup>

<sup>(1)</sup> Space Research Institute, Russian Academy of Sciences, ul. Profsoyuznaya 83/32, 117997 Moscow, Russian Federation

<sup>(2)</sup> Moscow Institute of Physics and Technology (State University), Institutskii per. 9, 141700 Dolgoprudnyi, Moscow region, Russian Federation

<sup>(3)</sup> M.V. Lomonosov Moscow State University, D.V. Skobel'tsyn Institute of Nuclear Physics, Leninskie gory 1, str. 2, 119991 Moscow, Russian Federation

<sup>(4)</sup> O.Yu. Schmidt Institute of Earth's Physics, Russian Academy of Sciences, ul. B. Gruzinskaya 10, str. 1, 123242 Moscow, Russian Federation

<sup>(5)</sup> National Research University Higher School of Economics, ul. Myasnitskaya 20, 101000 Moscow, Russian Federation

<sup>(6)</sup> M.V. Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics, Leninskie gory 1, str. 2, 119991 Moscow, Russian Federation

E-mail: <sup>(1)</sup>olga8.92@mail.ru, <sup>(1,2)</sup>lzelenyi@iki.rssi.ru, <sup>(1,3)</sup>hmalova@yandex.ru,

<sup>(3)</sup>spacerad@mail.ru, <sup>(3,4)</sup>popovaelp@mail.ru, <sup>(5,6)</sup>masterlu@mail.ru

The Earth's global magnetic field generated by an internal dynamo mechanism has been continuously changing at different time scales since its formation. Paleodata indicate that relatively long periods of evolutionary changes can be replaced by quick magnetic inversions. Based on observations, the Earth's magnetic field is currently weakening and the magnetic poles are shifting, possibly indicating the beginning of the inversion process. This paper uses the Gauss coefficients to approximate the behavior of the Earth's magnetic field components over the past 100 years. Using the extrapolation method, it is shown that the magnetic dipole component will vanish by the year 3600 and that at that time the geomagnetic field will be determined by the smaller value of a quadrupole magnetic component. A numerical model is developed which allows one to evaluate and compare both galactic and solar cosmic ray fluxes in the Earth's magnetosphere and on its surface during the periods of dipole or quadrupole domination. The role of atmosphere in absorbing particles of cosmic rays is taken into account. An estimate of radiation danger to humans is obtained for the ground level and for the International Space Station altitude of  $\sim 400$  km. It is shown that in the most unfavorable, minimum field, part of the inversion process the galactic cosmic ray flux increases by no more than a factor of three, implying that the radiation danger does not exceed the maximum permissible dose. Thus, the danger of the magnetic inversion periods for humans and nature generally should not have fatal consequences for humans and nature despite dramatically changing the structure of the Earth's magnetosphere.

**Keywords:** geomagnetic dynamo, magnetic field inversion, geomagnetic field, modeling, galactic cosmic rays, solar cosmic rays, radiation security

PACS numbers: 91.25.Cw, 91.25.Mf, 94.20.wq

Bibliography — 67 references

Received 27 June 2017, revised 27 July 2017

*Uspekhi Fizicheskikh Nauk* **188** (2) 207–220 (2018)

*Physics – Uspekhi* **61** (2) (2018)

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2017.07.038190>

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNe.2017.07.038190>