



Вековые вариации магнитного поля Земли

ВИКТОР ХАРЕБОВ

ВЕКОВЫЕ ВАРИАЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ

Научно-популярное издание

Издательские решения
По лицензии Ridero
2023

УДК 55
ББК 26.3
Х20

Шрифты предоставлены компанией «ПараТайп»

Харевов Виктор

Х20 Вековые вариации магнитного поля Земли : Научно-популярное издание / Виктор Харевов. — [б. м.] : Издательские решения, 2023. — 66 с.
ISBN 978-5-0059-5627-9

Автор в краткой и доступной форме излагает основные сведения об источниках и структуре вековых вариаций магнитного поля Земли. Изложены современные представления о характере вариаций геомагнитного поля и методах их изучения. Рассмотрены модели геополя и дрейф магнитных полюсов, экологические аспекты влияния изменений геополя на биосферу. Описана методика создания опорных кривых для археомагнитного датирования.

Для самого широкого круга читателей, интересующихся современными науками о Земле.

**УДК 55
ББК 26.3**

12+ В соответствии с ФЗ от 29.12.2010 №436-ФЗ

ISBN 978-5-0059-5627-9

© Виктор Харевов, 2023

ПРЕДИСЛОВИЕ

Однажды в университетской библиотеке мне в руки попала научная статья, в которой описывался метод датирования изделий из обожженной глины. Не дочитав первый лист статьи, я уже понял, что тема моей дипломной работы будет связана с археомагнитным датированием.

В университетской палеомагнитной лаборатории я получил бесценный опыт по работе с образцами керамики, освоив трудоемкий процесс извлечения информации о древнем поле из обломка глиняной вазы. Дипломная работа была написана и успешно защищена, затем были годы аспирантуры и успешная защита кандидатской диссертации на археомагнитную тему.

Профессия археомагнитолога окутана ореолом романтики — пласты горных пород, древние артефакты, находки, открытия... Но на самом деле это нелегкий и кропотливый труд, многочасовая лабораторная обработка коллекций образцов, систематизация и обсуждение полученных результатов. Тем не менее, возникает любовь к этой профессии и поселяется в сердце, иногда — на всю жизнь.

Итак, вековые вариации магнитного поля Земли... На их основе базируются современные палеомагнитные модели и опорные кривые векового хода геомагнитного поля, позволяющие производить точный палеоанализ и археомагнитную датировку. От точного анализа и прогноза вековых вариаций зависит качество работы навигационных систем и систем радиосвязи.

Особое значение имеют экологические аспекты взаимодействия вековых изменений магнитного поля Земли с биосферой, от которых зависит сохранение жизни на нашей планете.

В системе наук о Земле эти научные направления являются одними из самых интересных, они поражают наше воображение и помогают понять и оценить совершенство законов окружающего нас мира.

В книге в простой и доступной форме рассказывается об этих удивительных свойствах нашей планеты. Надеюсь, что читателям эта книга понравится, и в ней они найдут много нового и интересного.

Виктор Харебов
(Торонто, 2023)

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ЗЕМЛИ

ИСТОЧНИКИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Наша планета состоит из трех основных слоев: земной коры, мантии и ядра (рис. 1).

Земная кора — это внешняя оболочка толщиной несколько десятков километров. На долю этого слоя приходится примерно 5% объема и менее 1% массы всей Земли.

Под земной корой находится мантия — это слой толщиной примерно 2900 км, на долю мантии приходится 83% объема и примерно 70% массы всей планеты.

На глубине порядка 2900 км от земной поверхности располагается земное ядро. Ядро имеет форму шара радиусом 3500 км, состоящее из железа с примесью других металлов. Ядро является самой плотной частью планеты, на его долю приходится всего 15% общего объема и 35% массы Земли.

Ядро Земли состоит из двух частей – твердого внутреннего ядра, радиус которого примерно 1300 км, и жидкой внешней оболочки ядра толщиной примерно 2200 км.

Внешняя жидкая оболочка холоднее внутреннего ядра, поэтому происходит тепловое перемешивание жидких потоков (конвекционные течения).

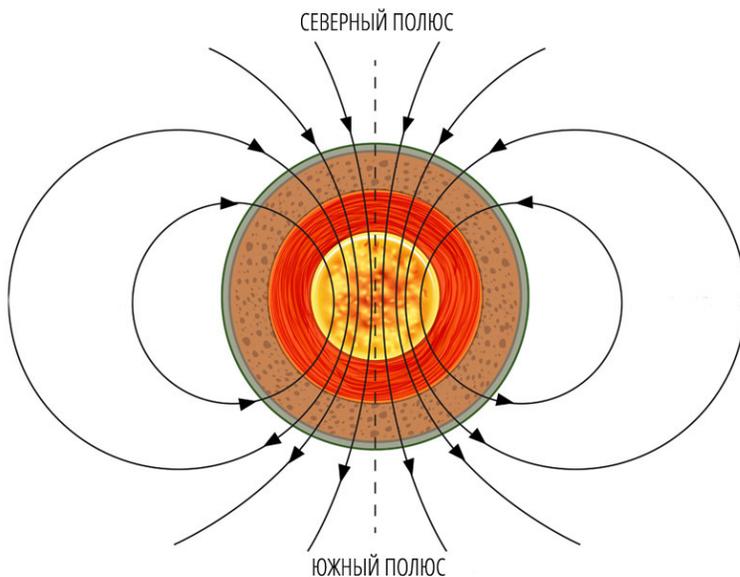


Рис. 1 – Строение Земли и силовые линии геомагнитного поля

Ближние к внутреннему ядру слои жидкой оболочки вращаются вокруг земной оси быстрее, чем слои, расположенные дальше от ядра. В результате градиента скорости вращения на слои жидкого железа начинает действовать сила Кориолиса, которая заставляет эти слои отклоняться

и образовывать спиралевидные траектории, а слабое внешнее поле следует за этими траекториями, постепенно образуя искаженные кольца. Таким образом возникают электрические контуры, которые, в свою очередь, усиливают внешнее поле (динамо-эффект).

Малейшего теплового движения во внешней оболочке земного ядра достаточно для возникновения начального электрического контура, создающего внешнее магнитное поле, которое впоследствии усиливается динамо-эффектом, и в конечном итоге образует магнитное поле Земли. Дополнительный усиливающий эффект могут создавать слабые внешние (в том числе и космические) поля, пронизывающие электрические контуры.

МОРФОЛОГИЯ ВЕКОВЫХ ВАРИАЦИЙ

Наблюдаемое на поверхности Земли магнитное поле можно представить в виде суммы трех полей:

- главного геомагнитного поля, источники которого находятся во внешнем электропроводящем ядре,
- аномального, создаваемого намагниченными горными породами,
- и внешнего, источники которого находятся в верхних слоях атмосферы.

Вклад главного геомагнитного поля составляет более 95%, аномальное поле составляет около 3% геомагнитного поля, а внешнее поле, связанное с солнечно-земными взаимодействиями, – менее 1%.

Установлены следующие свойства магнитного поля Земли:

- Главное магнитное поле, усредненное за достаточно большой промежуток времени, носит преимущественно дипольный характер.

- Магнитный полюс перемещается внутри малой области, его положение близко к географическому полюсу.

- Источник геомагнитного поля одинаков за всю историю Земли и связан с ее вращением.

- Напряженность магнитного поля и его направление за всю историю Земли имели тот же порядок величины, что и у современного поля.

- Инверсии поля происходили на протяжении всего времени существования главного магнитного поля и связаны с перераспределением системы токов в жидком земном ядре.

Магнитные характеристики геомагнитного поля (магнитный момент, модуль напряженности поля и его компоненты) не являются постоянными величинами, они периодически изменяются по величине и направлению. Эти изменения в течение последних 400 лет можно проследить на основе прямых измерений и расчетных данных. Для прошлых эпох применяются архео- и палеомагнитные методы изучения истории магнитного поля Земли.

Палеомагнитные исследования основаны на свойстве горных пород с железосодержащими компонентами намагничиваться в окружающем ее магнитном поле, и при остывании запоминать информацию о величине и направлении этого поля. С помощью специальных физических методов можно извлечь эту информацию, по которой можно судить о состоянии поля той эпохи, в которой происходило остывание породообразующей лавы. Результаты показывают, что в прошлые эпохи магнитное поле существенно менялось по величине и направлению, а также многократно меняло свою полярность (инверсии палеополя).

Область археомагнитных исследований ограничена гораздо меньшим промежутком времени и тесно связана с археологическими находками изделий из обожженной глины.

Древняя керамика, кирпичи, срезы стенок печей для обжига изделий из глины являются объектами археомагнитных исследований. Глины содержат магнитные окислы железа, поэтому при обжиге и последующем остывании изделия из глины «запоминают» информацию о магнитном поле точно так же, как и горные породы при их остывании.

*Мне остается сказать, по какому закону природы
То происходит, что камень притягивать может железо.
Камень же этот по имени месторожденья магнитом
Назван был греками, так как он найден в пределах
магнетов.*

*Люди весьма удивляются камню такому. Он часто
Цепь представляет из звеньев, держащихся сами собою.
Можешь увидеть ты пять таких звеньев, порой даже
больше.*

*Распределенные рядом, качаясь от легкого ветра,
Звенья такие свисают, одно под другим прилепившись.
Звенья одно от другого всю силу и цепкость приемлют.
Вот как здесь действует этого камня текучая сила...*

Лукреций Кар, «О природе вещей»

В результате археомагнитных работ удалось восстановить пространственно-временную структуру археомагнитного поля за последние 10000 лет. С помощью спектрального анализа археомагнитных данных были получены сведения о вековых вариациях магнитного поля Земли с различными временными характеристиками.

Анализ археомагнитных рядов показал, что магнитное поле Земли имело дипольную структуру в течение последних 10000 лет, отклонение от дипольного характера поля сравнимо с недипольной частью современного геомагнитного поля.

Спектр вековых вариаций дискретен, выявлены медленные колебания поля (8000, 1800 и 1200-летние), на которые налагаются быстрые колебания (600, 360-летние). Изменение магнитного момента Земли обусловлено основным колебанием поля с периодом 8000 лет.

Изменение направления геомагнитного поля связано с прецессией геомагнитной оси вокруг географической в направлении против часовой стрелки. Один оборот прецессии составляет по длительности 1200 лет, а полный цикл вековых изменений – примерно 100000 лет.

На Рис. 2 приведены спектральные характеристики основных вековых вариаций:



Рис. 2 – Амплитудный спектр вековых вариаций.

Считается, что в среднем амплитуда напряженности современного геомагнитного поля равна 50 микротесла (μT). Таким образом, вековые вариации вносят вклад в изменения геомагнитного поля от 1% до 50% от его среднего значения в наши дни.

МОДЕЛИ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

В соответствии с общей теорией геомагнетизма Гаусса главное геомагнитное поле состоит из дипольной и недипольной частей и может быть математически смоделировано.

Модель центрального диполя. В модели центрального диполя геомагнитный полюс (точка пересечения оси диполя с поверхностью Земли) обладает свойством вертикальности силовых линий дипольного поля (магнитное наклонение равно 90° в Северном и -90° в Южном полушариях). Ось центрального диполя помещена в начало сферической системы координат (в центр Земли) и совпадает с географической осью (см. рис. 1).

Модель наклонного диполя. Дипольная ось в модели наклонного диполя наклонена к оси вращения Земли на угол $10-12$ градусов.

Модель эксцентричного диполя. Ось эксцентричного диполя смещена относительно центра Земли.

Геомагнитное поле наиболее полно описывают модели IGRF (Международное геомагнитное аналитическое поле) и WMM (Всемирная магнитная модель). В этих моделях используется разложение потенциала геомагнитного поля в сферический гармонический ряд, предложенный К. Ф. Гауссом в 1838 году.

IGRF-13 была предложена в декабре 2019 года и предоставляет модель DGRF для эпохи 2015.0, модель IGRF для эпохи 2020.0 и прогнозирующую модель веко-

вых вариаций IGRF для 5-летнего временного интервала с 2020.0 по 2025.0.

Модель представлена разложением скалярного потенциала главного геомагнитного поля по сферическим гармоникам, разложение ограничивается коэффициентами от 1-й до 13-й степени и от 0-го до 13-го порядка (в прогностической вариации от 1-го по 8-й и от 0-го по 8-й соответственно), округлённых до 0,1 нТ.

Сферический гармонический ряд можно свести к дипольным моделям следующим образом. Если в разложении удержать только первый член ряда, то полученная модель будет эквивалентна модели центрального диполя.

При удержании бóльшего числа членов сферического гармонического ряда получают эксцентричные модели с произвольным положением магнитных диполей, значениями и ориентировкой их вектора магнитного момента.

Перечисленные выше модели используются не только для наземных исследований, но и для ориентации космических спутников, навигации пилотируемых и беспилотных космических аппаратов и для других задач освоения космического пространства.

МАГНИТНЫЕ КАРТЫ

Главное геомагнитное поле определяется как поле, полученное усреднением измеренных величин по временному интервалу около года на площади приблизительно 106 км^2 .

На Рис. 3–5 приведены карты изолиний компонент геомагнитного поля (магнитной напряженности, склонения и наклонения) для 2020 года. Их называют магнитными картами. Изолинии склонения – изогоны, изолинии наклонения – изоклины, изолинии напряженности поля – изодинамы.

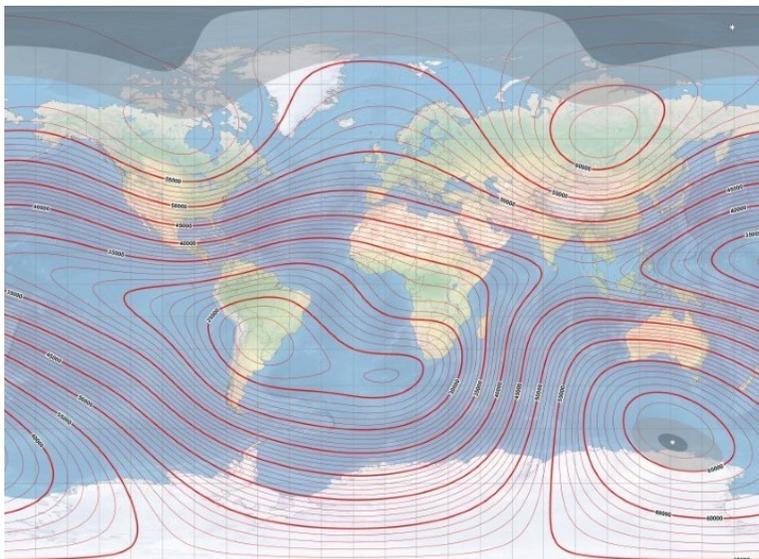


Рис. 3 – Карта изолиний напряженности T (мкТл).

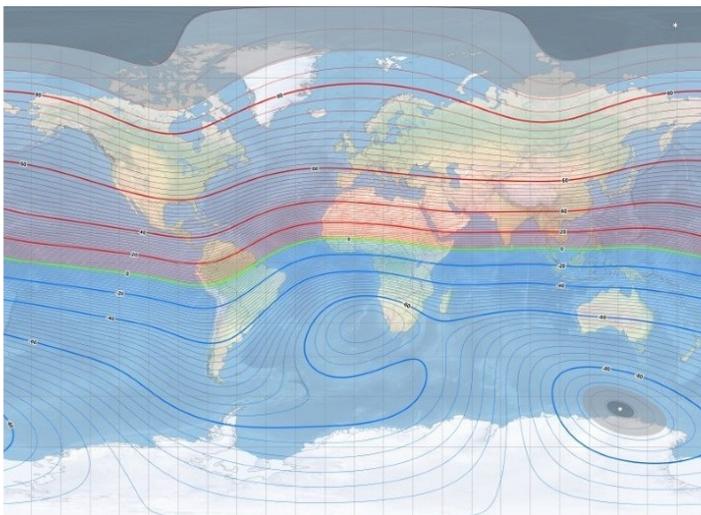


Рис. 4 – Карта изолиний магнитного наклонения I ($^{\circ}$).

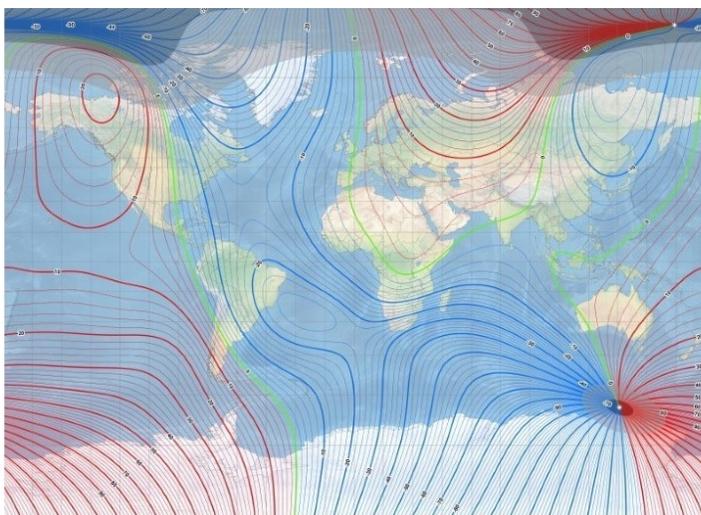


Рис. 5 – Карта изолиний магнитного склонения D ($^{\circ}$).

Полные данные о моделях геомагнитного поля, координатах полюсов, программах для вычислений и другой документации размещены на сайтах WMM и IGRF:

<http://www.ngdc.noaa.gov/geomag/WMM/image.shtml>

Модель IGRF:

<https://www.ngdc.noaa.gov/AGA/vmod/igrf.html>

Модель WMM:

<https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/WMM/>

Калькулятор поля:

<https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/calculators/magcalc.shtml#igrfwmm>

Документацию и рисунки, размещенные на этих сайтах, можно свободно копировать и использовать без авторских ограничений.

КРИВЫЕ ВЕКОВОГО ХОДА

ПРЕДМЕТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Высокоточное вычисление параметров магнитного поля Земли с помощью современных моделей (IGRF и WMM), а также определение их пространственно-временных характеристик и магнитное картирование возможны для промежутка времени порядка 400 лет. Параметры современного поля и построенные на их основе магнитные карты отличаются высокой точностью и широко применяются в геофизических исследованиях, экологических прогнозах, наземной и спутниковой навигации.

Для исследований геомагнитного поля последних 10000 лет используют изделия из обожженной глины (керамика, кирпичи, печи для обжига, очаги). А для временного отрезка, насчитывающего миллионы лет применяют данные о палеополе, получаемые при обработке намагниченных горных (лавовых) пород и осадочных отложений.

Измерения величины и направления остаточной намагниченности вулканических (лавовых) пород, а также образцов из печей для обжига, очагов и других артефактов, не смещенных с места своего последнего обжига, дают информацию о наклонении, склонении и напряженности древнего поля. Частично ориентированные артефакты (кирпичи, основания или венчики керамических изделий) могут дать сведения о напряженности и наклонении древнего поля. Неориентированные фрагменты керамики дают сведения только о напряженности древнего поля.

Получаемые данные о геомагнитном поле прошлых эпох имеют погрешности, часто превышающие допустимые величины. Чтобы получить данные с удовлетворительной точностью, прибегают к различным методам корректировки – увеличивают число образцов в коллекциях, применяют различные методы математической статистики и теории погрешностей.

Обширные коллекции образцов могут быть получены на территориях стран, где возникли очаги древних цивилизаций (Египет, Месопотамия, Финикия, Малая Азия, Кавказ, крито-микенская цивилизация, цивилизации майя, ацтеков и инков и др.).

Перед началом проведения исследований обычно производят предварительную датировку другими методами (археологический, радионуклидный, термолюминесцентный и др. методы датирования), чтобы заранее иметь представление о временном отрезке, которому принадлежит исследуемая коллекция образцов.

Совсем недавно группой ученых из университетов Манчестера и Эдинбурга был предложен новый метод датировки керамики (регидроксиляционное датирование), основанный на зависимости количества поглощенной керамикой воды от ее возраста. Сначала образец взвешивается на точных весах, затем производится его сушка по специальной методике.

После окончания сушки определяется потеря веса образца при высокотемпературном нагреве из-за удаления связанной воды из пор образца. По разности значений первоначального веса и веса после сушки, а также по скорости испарения связанной воды определяется возраст керамики.

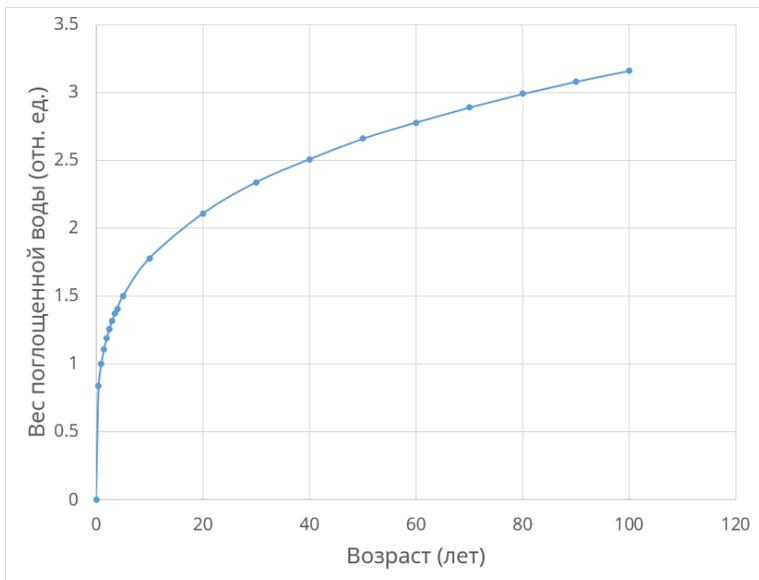


Рис. 6 – Характер кривой регидроксиляционного датирования

Исследования показали, что метод регидроксиляционного датирования имеет высокую точность. Вполне возможно, что этот новый метод будет использоваться в археомагнитных исследованиях для предварительной датировки керамики, однако есть ограничения, связанные с тем, что в процессе высокотемпературной сушки разрушается древняя намагниченность образца.

Если можно будет выделить несколько образцов из общей коллекции для метода регидроксиляционного датирования, то применение его в предварительных оценках возраста вполне может быть оправдано.

ОПОРНЫЕ АРХЕОМАГНИТНЫЕ КРИВЫЕ

Основным методом палео- и археомагнитных исследований является метод последовательных нагревов Телле, при которых в образце горной породы или керамики постепенно разрушается часть древней намагниченности, замещаемая намагниченностью, возникающей в современном поле. По характеру перемагничивания образца определяют информацию о древнем геомагнитном поле.

Помимо метода нагревов, применяют и другие методы, например, метод перемагничивания образца в переменном магнитном поле, а также и другие методы измерений.

Измерения остаточной намагниченности образцов горных пород и древней керамики производятся с помощью

высокочувствительных магнитометров (астатические магнитометры, рок-генераторы, магнитомодуляционные измерители, сверхчувствительные низкотемпературные СКВИД-магнитометры).

Результаты исследований обычно представляют в виде графика значений параметров поля, отложенных на временной шкале. Такие графики называются кривыми векового хода или кривыми вековых вариаций геомагнитного поля. Временные графики, построенные на базе большого количества проверенных данных измерений (или вычислений) называются опорными археоманитными кривыми.

Накладывая результаты измерений на временную шкалу опорных археоманитных кривых, можно определить возраст исследуемых образцов. Так происходит археоманитное датирование древней керамики и других изделий из обожженной глины.

На Рис. 7–9 приведены опорные археоманитные кривые векового хода модуля напряженности, наклонения и склонения геомагнитного поля на территории Грузии за последние 430 лет.

В качестве археоманитных данных взяты значения параметров геомагнитного поля, рассчитанные по модели IGRF-13.

Место наблюдения: Душетская магнитная обсерватория (Грузия).

Широта / Долгота: (42.0831° N / 44.7000° E).

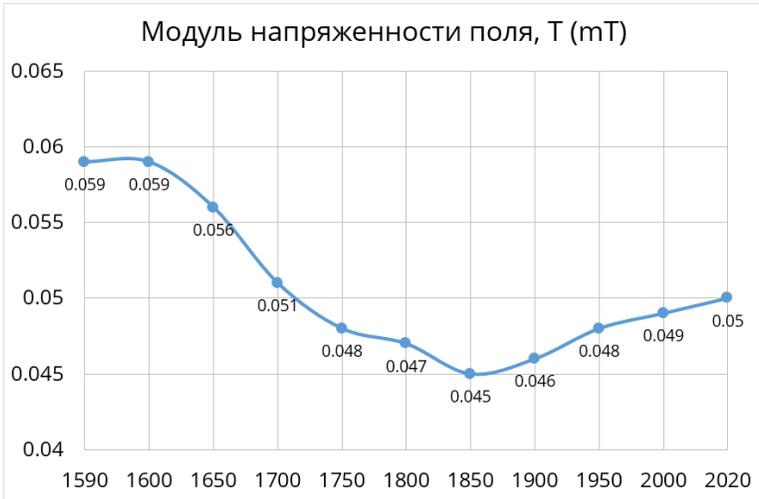


Рис. 7 – Вековой ход модуля напряженности

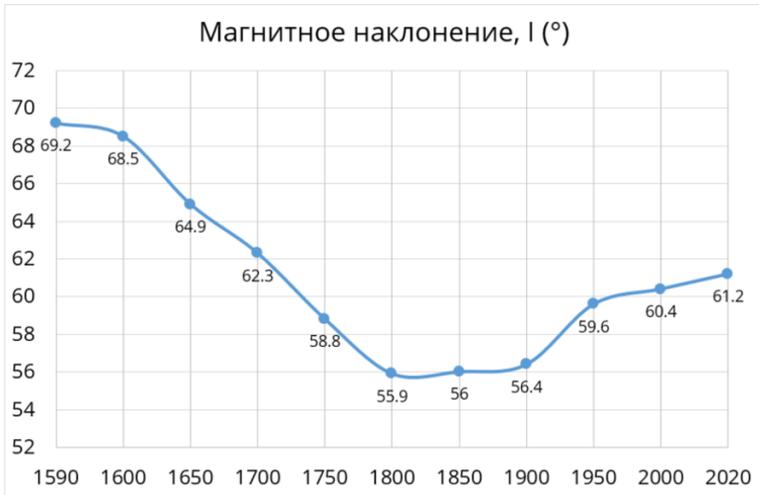


Рис. 8 – Вековой ход магнитного наклонения

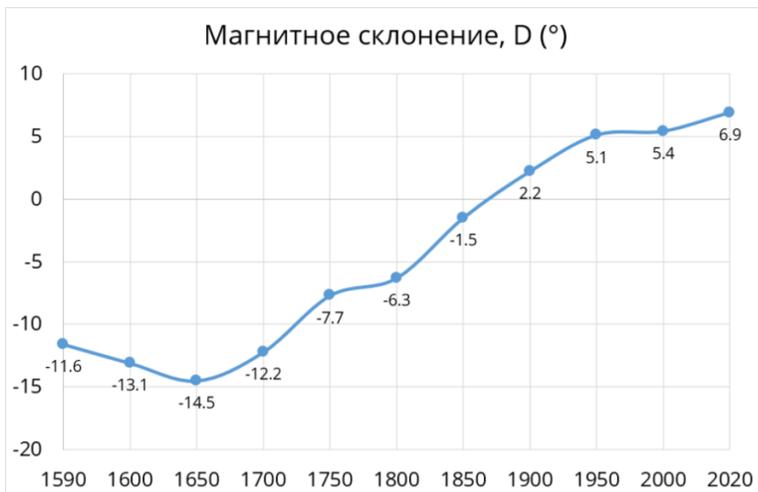


Рис. 9 – Вековой ход магнитного склонения

Магнитное наклонение за весь рассматриваемый период наблюдения не изменило своего знака (к земному центру), а магнитное склонение изменило свой знак с минуса на плюс в 1870 году (Табл. 1):

Параметр	Напряженность поля	Магнитное наклонение	Магнитное склонение
Макс. значение	59,134.5 нТ	69.193°	+6.135°
Мин. значение	45,162.4 нТ	55.629°	-14.740°
Средняя скорость изменения	45.1 нТ/год	0.0393°/год	0.0813°/год
Смена знака	Нет	Нет	Да

Табл. 1 – Характеристики опорных археомагнитных кривых для региона Грузии (1590–2020 гг.)

Используя данные модельного поля (в нашем случае IGRF-13), можно построить опорные археомагнитные кривые практически для любой области земного шара. К сожалению, существующие численные модели поля рассчитаны на короткий временной интервал (всего несколько сотен лет), поэтому их применение в построении опорных археомагнитных кривых для больших промежутков времени ограничено.

Существуют попытки применения методов сферического гармонического анализа к массивам данных археомагнитных объектов и вулканических пород, однако полученные археомагнитные модели имеют в основном оценочный характер при анализе возраста древней керамики.

В Приложении приведены графики опорных археомагнитных кривых для различных регионов, рассчитанные по модели (IGRF-13).

ПЕРЕМЕЩЕНИЕ МАГНИТНЫХ ПОЛЮСОВ ЗЕМЛИ

Современное геомагнитное поле в первом приближении эквивалентно полю эксцентричного диполя с магнитным моментом равным $2.2 \cdot 10^8$ А/м, ось которого смещена на 540 км от центра Земли в сторону Тихого океана. Сейчас ось земного диполя наклонена к оси вращения Земли на 10° и пересекает земную поверхность в точке с координатами $79^\circ 32'$ с.ш. и $71^\circ 34'$ з.д. (модель IGRF-2000) в Гренландии (южный геомагнитный полюс). Магнитный полюс прецессирует относительно географического с периодом ~ 1200 лет.

Пример. Чтобы создать реальную модель земного магнитного диполя, нужно через круговой контур диаметром, равным земному, пропустить ток порядка 600 млн ампер.

Перемещение магнитных полюсов Земли уже давно вызывает пристальный научный интерес. Первые измерения координат геомагнитного полюса в Северном полушарии были произведены в 1831г. и показали его местоположение в арктической зоне Канады.

Дальнейшие наблюдения показали его непрерывное перемещение в сторону российского арктического побережья, скорость его перемещения в период с 1990 по 2005 г. увеличилась с 0–15 км/год до современной скорости 50–60 км/год.

В конце октября 2017 года магнитный полюс в Северном полушарии пересек международную линию перемены дат (меридиан, отстоящий от гринвичского на 180°), пройдя в пределах 390 км от географического полюса, и теперь движется на юг.

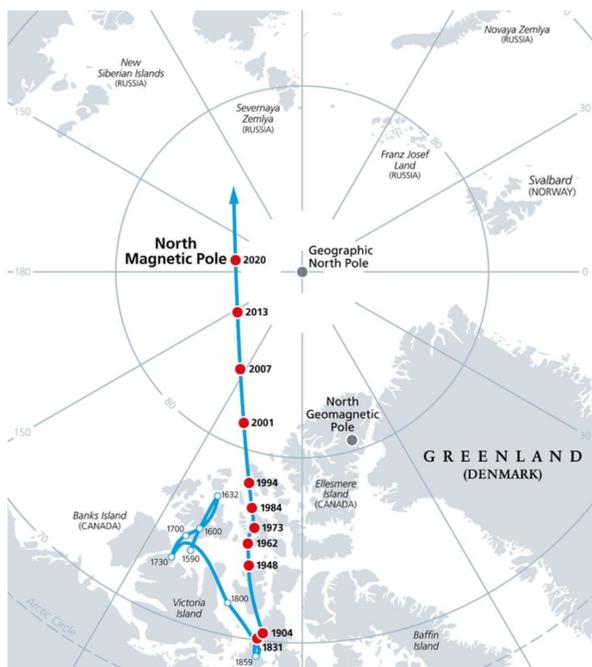


Рис. 10 – Перемещение магнитного полюса в Северном полушарии (1831–2020). Точками красного цвета показаны координаты, вычисленные по модели IGRF

По последним данным спутниковых наблюдений за магнитосферой Земли миссии Swarm Европейского космического агентства обнаружено, что положение магнитного полюса в Северном полушарии в каждый конкретный момент времени определяется взаимодействием магнитных потоков глубинных отрицательных аномалий геомагнитного поля, формирующихся у ядра Земли.

Один из таких потоков в Северном полушарии отходит в сторону Канады, а другой – в сторону Сибири.

Ряд простых моделей, описывающих этот процесс, показывает, что в течение следующего десятилетия магнитный полюс в Северном полушарии продолжит движение по своей нынешней траектории, продвинувшись еще на 390–660 км в сторону Сибири.

Английский мореплаватель Джон Росс (1777–1856) в мае 1829 года на небольшом пароходе «Виктория» отправился к арктическому побережью Канады, пытаясь найти северо-западный путь из Европы в Восточную Азию. В октябре 1830 года льды сковали «Викторию» у восточной оконечности полуострова Бутия (Boothia Peninsula) Канадского Арктического архипелага. Зажатый во льдах экипаж «Виктории» вынужден был остаться на зимовку.

Молодой помощник капитана Джеймс Кларк Росс (1800–1862) воспользовался этим случаем и решил произвести магнитные измерения. В течение всего времени зимовки Джеймс ходил по побережью с магнитометром и производил замеры. Построив карту магнитных измерений, Джеймс понял, где нужно искать точку с вертикальным направлением магнитного поля.

Весной 1831 года он вместе с несколькими членами экипажа «Виктории» прошёл 200 км в сторону западного побережья полуострова Бутии и 1 июня 1831 года на мысе Аделаиды с координатами $70^{\circ} 05'$ с. ш. и $96^{\circ} 47'$ з. д. обнаружил, что магнитное склонение составило $89^{\circ} 59'$. Так впервые были определены координаты магнитного полюса в Северном полушарии.

Задача определения положения магнитного полюса в Южном полушарии имеет длинную историю. Первые геомагнитные измерения (измерения склонения) в Антарктическом регионе были выполнены в ходе второй кругосветной экспедиции Дж. Кука (1772–1775 гг.). Однако оценок местоположения магнитного полюса не делалось.

Первые приполярные магнитные измерения в Южном полушарии были выполнены в ходе кругосветной антарктической экспедиции русских мореплавателей Беллинсгаузена и Лазарева (1819–1821 гг.). Вскоре после экспедиции немецкий математик К. Гаусс рассчитал на основе сферического гармонического анализа нахождение магнитного полюса в точке с координатами 66° ю. ш., 146° в. д.

В 1841 году Джеймс Кларк Росс определил координаты магнитного полюса в Южном полушарии: $75^{\circ} 05'$ ю. ш., $154^{\circ} 08'$ в. д.

В 1840 году Джеймс Кларк Росс отправился на судах «Эребус» и «Террор» в свое знаменитое путешествие к магнитному полюсу в Южном полушарии. 27 декабря корабли Росса впервые встретились с айсбергами и уже в новогоднюю ночь 1841 года пересекли Южный полярный круг.

9 января утром Росс неожиданно для себя обнаружил впереди по курсу свободное ото льда море. Он открыл море, которое впоследствии было названо его собственным именем, – море Росса. Справа по курсу обнаружилась гористая, покрытая снегом земля, которая вынуждала корабли Росса двигаться на юг и которая, казалось, не собиралась кончаться. Эта земля впоследствии была названа именем Королевы Виктории.

Идя вдоль побережья, Росс постоянно производил магнитные измерения. Вскоре корабли приблизились к огромной бесконечной ледяной стене высотой 50 метров. Это была кромка шельфового ледника, носящего ныне имя Росса.

В середине февраля 1841 года после 300-километрового плавания вдоль кромки шельфового ледника Росс принял решение прекратить дальнейшие поиски и вернуться назад.

Россу удалось измерить магнитное наклонение в очень многих точках вокруг побережья Земли Виктории и установить тем самым положение магнитного полюса с высокой точностью. Росс указал такие координаты магнитного полюса: $75^{\circ} 05'$ ю. ш., $154^{\circ} 08'$ в. д. Минимальное расстояние, отделявшее корабли его экспедиции от этой точки, составляло всего 250 км. Именно измерения Росса нужно считать первым достоверным определением координат магнитного полюса в Антарктиде, в Южном полушарии.

Достичь магнитный полюс в Южном полушарии и провести инструментальные измерения удалось только 16 января 1909 года Британской антарктической экспедиции под руководством Эрнеста Шеклтона (экспедиция «Нимрода»). Далее положение ЮМП определялось в 1912, 1931, 1951, 1962 гг.

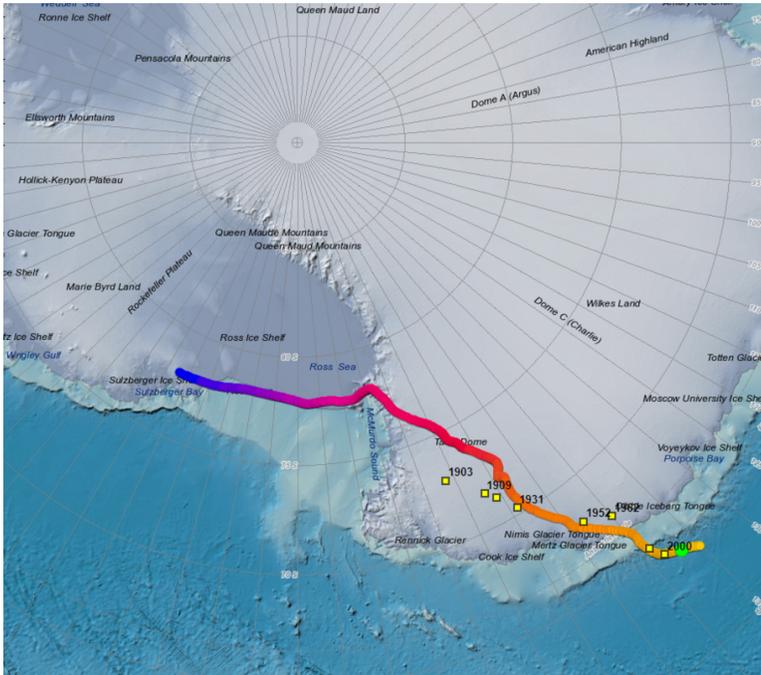


Рис. 11 – Перемещение магнитного полюса в Южном полушарии

ГЕОМАГНИТНЫЕ ИНВЕРСИИ

Инверсии геомагнитного поля были открыты сравнительно недавно и явились неожиданностью для ученых-геофизиков.

Инверсии магнитного поля Земли хорошо датированы, особенно за последние 5 млн лет. Датировки произведены как с помощью изотопных радиологических методов, т. е. с получением абсолютного возраста породы, так и с помощью методов относительной геохронологии, т. е. палеонтологических методов.

В инверсиях геомагнитного поля нет явной периодичности, судя по палеомагнитной шкале инверсий бывали периоды стабильности поля длительностью от 20 миллионов лет до 70 миллионов лет, а иногда полюса менялись местами через 30–40 тысяч лет. Правда, за последние несколько миллионов лет частота инверсий составляла 4–5 раз за один миллион лет, то есть в среднем каждые 200–250 тысяч лет. В то же время ближайшая к нам смена произошла около 780 тысяч лет назад.

Временные интервалы преобладания какой-либо одной полярности получили название геомагнитных эпох, и части из них присвоены имена выдающихся геомагнитологов Брюнеса, Матуямы, Гаусса и Гильберта. В пределах эпох выделяются меньшие по длительности интервалы той или иной полярности, называемые геомагнитными эпизодами.

Сейчас мы живем в эпоху прямой полярности Брюнеса, названную так в честь геофизика Бернарда Брюнеса, открывшего явление геомагнитных инверсий.

С момента последней своей инверсии уже достаточно долго магнитное поле Земли сохраняет свою нынешнюю полярность и, судя по последним геофизическим данным, сила магнитного поля Земли все еще превосходит необходимый для инверсии уровень. Однако, нынешнее убывание общего магнитного момента Земли и поведение магнитных полюсов приводят к мысли о возможной очередной инверсии.

Известно, что в периоды инверсий магнитный момент поля уменьшался почти в десять раз ниже нормы. И сейчас эта величина стабильно падает, за последние 150 лет магнитный момент уменьшился примерно на 10 процентов. Стоим ли мы на пороге очередной инверсии?.. Сегодня наука не имеет достаточно данных, чтобы предсказать, когда произойдет очередная инверсия.

На Рис. 12 показан пример шкалы инверсий палеополя или магнитохронологической шкалы для позднего кайнозоя.

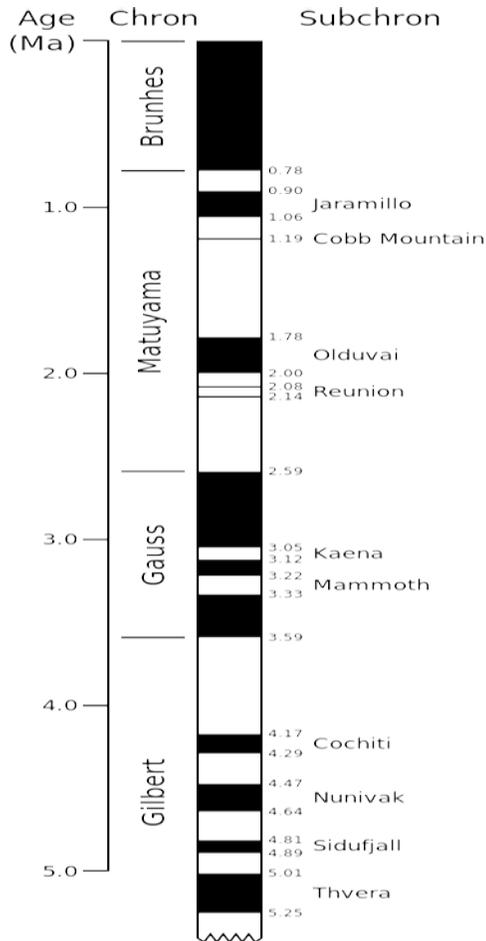


Рис. 12 – Шкала инверсий палеополя (поздний кайнозой)

Периоды прямой полярности (соответствующей современной) обозначены черным цветом, обратной полярности – белым цветом. Возраст указан в миллионах лет.

И все же, с помощью данных об инверсиях и вековых вариациях геомагнитного поля мы получаем возможность судить об изменении характеристик внутреннего ядра и мантии Земли. На сегодняшний день это один из немногих научных инструментов в изучении глубинных земных процессов, недоступных прямому наблюдению.

Перед началом инверсии напряженность дипольного поля сначала уменьшается из-за разрушения системы электрических токов в жидком ядре, образующих это поле. В середине процесса инверсии остается недипольная часть поля при полном или частичном исчезновении ее дипольной части. Затем система электрических токов начинает постепенно восстанавливаться, и вместе с этим начинает расти дипольная составляющая.

Процесс инверсии сложен, в некоторых случаях дипольная часть при инверсии сохраняется, и в конце процесса дипольная часть резко меняет свой знак на противоположный. Иногда процесс распада главного диполя приводит к появлению эксцентричного диполя, наличие эксцентричной части в зависимости от степени отклонения изменяет характер процесс инверсии.

Характеристики подобного процесса различны от инверсии к инверсии в зависимости от суммарной дипольной системы (остаточная часть главного диполя и возникающий эксцентричный диполь).

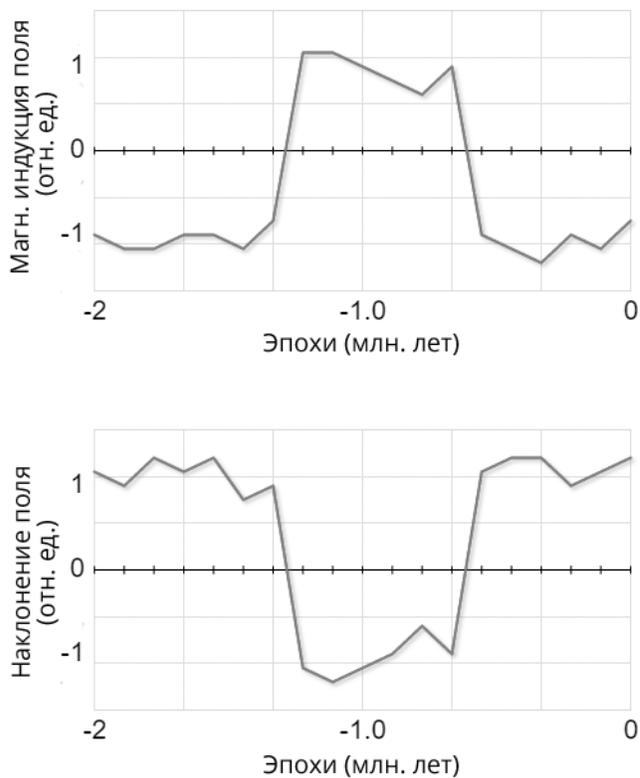


Рис. 13 – Схематическое изображение процесса инверсии

Важным параметром инверсии, зависящим от места наблюдения, является скорость перемещения виртуального полюса.

Для мест наблюдения, близко расположенных к эксцентричной части дипольной системы, перемещение полюса происходит плавно, а для отдаленных мест наблюдения процесс перемещения полюса происходит скачкообразно.

Группа ученых из Тайваньского университета опубликовала результаты исследования, предполагающие, что магнитное поле Земли может менять направление намного быстрее, чем считалось ранее. Ученые изучили слои годового роста сталагмита в пещере Саньсин, расположенной на юго-западе Китая.

При анализе магнитных свойств отдельных слоев были обнаружены две фазы с более слабым магнитным полем во временных промежутках между (104±1) тыс. и (95±4) тыс. лет назад. На более позднем этапе магнитный полюс переместился с Аляски в Антарктиду, После этого магнитное поле снова переключилось на нормальную, современную полярность (Yu-Min Chou et al. 2018).

Ярким примером существования периодических инверсий геомагнитного поля является система океанических полос прямой и обратной полярности. Полосы прямой и обратной полярности (положительные и отрицательные магнитные аномалии) прослеживаются симметрично по обе стороны от срединно-океанических хребтов и следуют параллельно их оси.

Спрединг океанов происходит в среднем со скоростью несколько сантиметров в год.

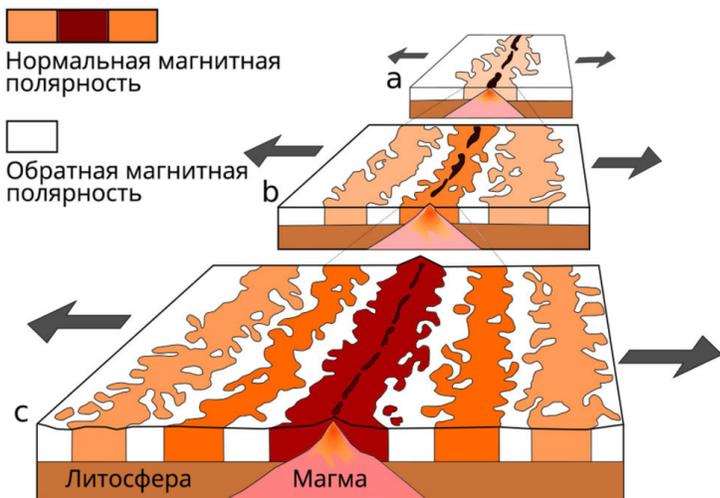


Рис. 14 – Система океанических полос прямой и обратной полярности

Новая океаническая кора, непрерывно образующаяся на гребне срединно-океанического хребта, охлаждается и стареет по мере удаления от гребня хребта с расширением морского дна:

- а) спрединговый хребет около 5 миллионов лет назад,
- б) около 2–3 миллионов лет назад,
- в) на сегодняшний день.

После смены полярности прежняя напряженность магнитного поля восстанавливается по геологическим меркам очень быстро – за первые десятки тысяч лет. По некоторым прогнозам, этого времени вполне достаточно, чтобы на Земле погибло все живое.

Инверсии магнитного поля рассматриваются в качестве одной из вероятных причин эпизодов массовых вымираний в биосфере. В частности, исчезновение динозавров в конце мелового периода совпадает с инверсией магнитного поля в ту эпоху. Инверсий в истории Земли, конечно, было намного больше, чем эпизодов массового вымирания, но такая гипотеза тоже имеет право на жизнь.

Несмотря на предсказания подобной судьбы жизни на Земле, при резком уменьшении магнитного поля нашей планеты в действительности, похоже, нет значимой корреляции между инверсиями магнитного поля и темпами вымирания биосферы.

Даже во время полного обращения магнитное поле не исчезает полностью. Остаточный магнетизм все еще обеспечивает некоторую защиту, и одной атмосферы Земли достаточно, чтобы защитить жизнь от наиболее вредных воздействий космической радиации.

Тем не менее, современная электроника (как на поверхности Земли, так и на космической орбите), устойчивая радиосвязь, урожайность, погода — подвержены высокому риску при воздействии частиц солнечного ветра и космической радиации.

Инверсии невозможно предсказать, поскольку прошлые инверсии магнитного поля кажутся распределенными во времени случайным образом. Инверсии в среднем происходят с периодом около 1 миллион лет, а продолжительность инверсии составляет в среднем 5000 лет.

За последние 600 миллионов лет произошло более тысячи инверсий. Это ставит перед нашей цивилизацией новые вызовы, поскольку технологии должны быть готовы справиться с такими изменениями.

Для примера, на Солнце инверсии магнитного поля Солнца происходят регулярно, в среднем каждые 11 лет.

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ

ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ ГЕОПОЛЯ НА БИОСФЕРУ

Устойчивость земной биосферы зависит от следующих основных факторов:

- мощности солнечного излучения,
- состояния магнитного поля Земли
- и содержания кислорода в атмосфере.

Модели атмосферы на различных этапах эволюции Земли показывают, что на первичном этапе существования Земли кислород практически отсутствовал, наиболее обильным атмосферным газом являлся углекислый газ CO_2 .

В результате фотодиссоциации водяных паров под действием ультрафиолетового излучения в атмосферу Земли стал поступать кислород O_2 .

С появлением разнообразных водорослей фотодиссоциация как основной механизм пополнения атмосферы

кислородом сменяется процессами фотосинтеза. Масса воздушного кислорода впервые достигла современной 320–220 млн лет и более никогда уже не опускалась ниже этого уровня.

По мере накопления кислорода в атмосфере в результате фотохимических реакций при взаимодействии ультрафиолетовой части излучения Солнца с кислородом начал создаваться озоновый слой. Создались условия для образования стабильного озонового экрана, поглощающего значительную часть ультрафиолетового излучения Солнца, защищая тем самым от него жизнь на поверхности Земли от губительных внешних воздействий.

Наличие озонового слоя на высотах 18–50 км – один из главных факторов существования на Земле высокоорганизованных форм жизни.

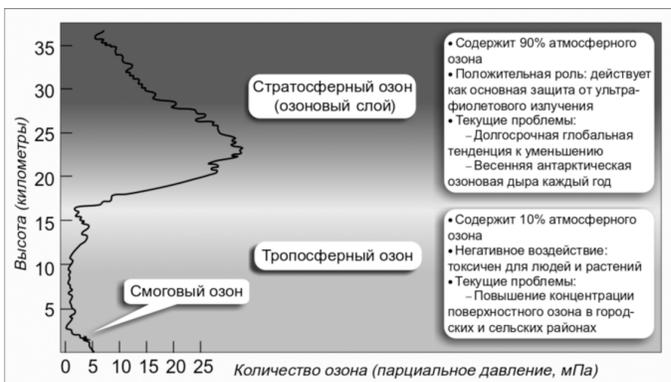


Рис. 15– Распределение озона по высоте

Результатом взаимодействия солнечного излучения (его еще называют солнечным ветром) с геомагнитным полем в околоземном пространстве является магнитосфера.

С дневной стороны поток солнечного ветра сжимает магнитосферу, на ночной стороне силовые линии магнитного поля вытягиваются в хвост диаметром 30–40 радиусов Земли и длиной по некоторым данным свыше 100 земных радиусов.

Внутренняя часть магнитосферы до расстояний примерно от трех до пяти земных радиусов называется плазмосферой. Плазмосфера расположена в пределах внешнего дипольного геомагнитного поля.

Геомагнитное поле удерживает, как в ловушке, потоки частиц солнечной радиации и космического излучения, которые образуют радиационные пояса Земли.



Рис. 16 – Радиационные пояса Земли

Солнечный ветер, воздействуя на верхний разреженный слой атмосферы, возбуждает переданный молекулам электрический заряд и инициирует выброс энергии в виде светового излучения, образуются так называемые полярные сияния.

Молекулы кислорода придают излучению желтый и зеленый цвета, а азот — красный и фиолетовый.



Рис. 17 – Полярное сияние

Полярное сияние является одним из самых красивых явлений природы и наблюдается только в авроральных овалах, окружающих магнитные полюса Земли.

Из-за дополнительной ионизации в ионосфере появляются значительные электрические токи, магнитные поля которых искажают геомагнитное поле. Эти процессы прямо влияют на погоду и здоровье людей. Через полярные сияния и связанные с ними процессы в околоземном пространстве космос воздействует на биосферу Земли.

Космические воздействия в виде ионизирующих корпускулярных и электромагнитных излучений, особенно в условиях уменьшения геомагнитной защиты, могут оказаться определяющими в проблеме радиационной безопасности биосферы.

Естественному радиационному фоновому облучению, идущему от природных радионуклидов, подвергаются все живые организмы Земли. Однако с увеличением внешнего радиационного воздействия суммарный радиоактивный фон значительно увеличивается.

В последнее время популярным стало обсуждение глобального воздействия на биосферу в различные геологические периоды потока космических лучей больших энергий и гамма-излучения, образованного при взрывах близких сверхновых.

Считают, что часть наследственных изменений (мутаций) у животных и растений связана с повышенным радиоактивным фоном и может привести к резкому уменьшению отдельных популяций или их исчезновению.

Выделяют пять великих массовых исчезновений, или вымираний. Около 443 млн лет назад завершилось великое ордовикское вымирание. За 3,3–1,9 млн лет исчезло 57% родов, 86% видов организмов. Великое девонское вымирание (359 млн лет назад) длилось не более 2 млн лет, вымерло 35% родов и 75% видов. Во время великого пермского вымирания (258,3 млн лет назад), которое продолжалось не более нескольких десятков тысяч лет, погибло 56% родов и 96% видов. Великое триасовое вымирание проходило в несколько этапов, длилось около 16 млн лет и завершилось около 200 млн лет назад исчезновением 47% родов и 80% видов. Великое меловое вымирание произошло около 65 млн лет назад. В этот период погибло 40% родов и 76% видов. Ученые по-разному оценивают его продолжительность – от года до 2,5 млн лет.

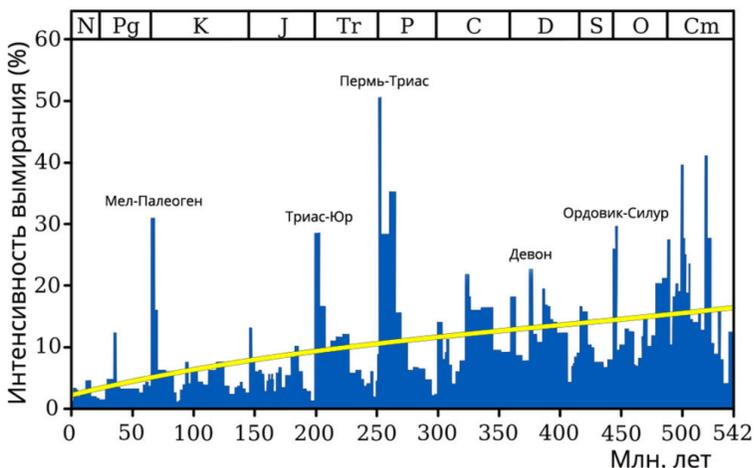


Рис. 18 – Пять крупнейших вымираний в истории Земли

За последние 540 миллионов лет на Земле было зафиксировано пять событий массового вымирания – периодов, когда планета потеряла большинство своих видов за относительно короткий геологический промежуток времени.

Ряд исследователей считает, что причиной массовых вымираний, в частности великого ордовикского вымирания, был мощный гамма-всплеск, вызванный взрывом сверхновой в относительной близости от Солнечной системы.

Многочисленные эффекты воздействия космической среды на биосферу наиболее ярко проявляются во время магнитных бурь. Магнитные бури часто приводят к нарушениям радиосвязи, к сбоям и блокировке радионавигационных систем, к появлению ошибок в системах навигации GPS и ГЛОНАСС, а также, по мнению некоторых специалистов, могут воздействовать на живые организмы, в том числе и людей.

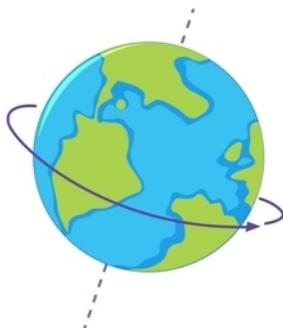
Хотя такое воздействие и не является катастрофой для большинства людей, но те, кто находятся в экстремальных ситуациях или страдают сердечной недостаточностью, психическими расстройствами, могут проявить вполне заметную реакцию на магнитные бури.

В настоящее время состояние околоземного магнитного поля непрерывно контролируется наземными средствами и многочисленными космическими аппаратами — спутниками гидро- метеорологического и гелиогеофизического назначения.

Их данные используются в различных расчетах, моделях и прогнозах космической погоды, и составляют рекомендации для населения в зонах повышенного риска.

Как всегда, любая точка зрения практически по любому вопросу находит как сторонников, так и противников, это касается и влияния космической погоды на человеческий организм. Противники этой теории утверждают, что геомагнитные, гравитационные и другие возмущения, которые оказывает на человека Луна, Солнце, другие планеты солнечной системы, незначительно влияют на организм человека, гораздо больший вред человеку доставляет ежедневные стрессы в обычной жизни — резкий подъем или спуск, воздушные перелеты, сильный шум, эмоциональные перенапряжения, несоответствие реальности желаниям человека, переутомления, отсутствие полноценного отдыха, недосыпание.

Тем не менее, следует не пренебрегать всеми перечисленными факторами воздействия космической среды на биосферу и стараться избегать их.



ЦЕНТРЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Центр прогнозов Института прикладной геофизики
Гидрометеослужбы РФ – официальный источник прогно-
зов в России.

(www.geospace.ru).

Space Environment Center, SEC – самый известный
центр космической погоды.

(<http://www.sec.noaa.gov/>)

SpaceWeather.com – коммерческая компания, пред-
ставляющая данные по космической погоде.

МИРОВЫЕ ЦЕНТРЫ ДАННЫХ

Мировой центр данных по СЗФ, Москва. В центре имеются данные по всем разделам солнечно-земной физики: солнечная активность и межпланетная среда, космические лучи, ионосферные явления, геомагнитные вариации и др. Здесь же имеется вход в интерактивную систему данных SPIDR.

*(<http://www.wdcb.ru/stp/index.ru.html>,
<http://clust1.wdcb.ru/spidr/>)*

Мировой центр данных в Японии. Оперативно представлены все индексы магнитного поля Земли: АЕ индекс с 1957 года, Dst индекс с 1957 года, ASY/SYM индекс с 1981 года, Кр индекс с 1932 года, список наиболее спокойных и возмущенных дней помесячно с 1932 года. Имеет ссылки со всеми ведущими центрами геофизических данных.

(<http://swdcdb.kugi.kyotou.ac.jp/>)

Национальный центр геофизических данных, США: раздел солнечно-земная физика. Модифицированный мировой центр данных в рамках большой сети центров данных в США, имеет ссылки на все центры США.

(<http://www.ngdc.noaa.gov/stp/stp.html>)

Мировой центр данных, Копенгаген, Дания. Классический центр данных, имеет большой архив данных по Гренландии, является подразделением Датского метеорологического института.

(<http://web.dmi.dk/projects/wdcc1/>)

Центр геомагнитных прогнозов и информации, Эдинбург, Англия. Ведущий европейский центр, имеет весь набор данных по СЗФ, а также является первым нодом системы Интермагнит.

(http://www.geomag.bgs.ac.uk/gifs/on_line_gifs.html)

СОЛНЕЧНО-ЗЕМНАЯ ФИЗИКА В РОССИИ

Москва, Институт космических исследований РАН. Ведущий институт России в области космических исследований, в том числе по солнечно-земной физике. Публикует сверхкраткосрочный прогноз геомагнитной активности по данным о параметрах солнечного ветра.

(<http://www.iki.rssi.ru>)

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова (ИЗМИРАН), Троицк.

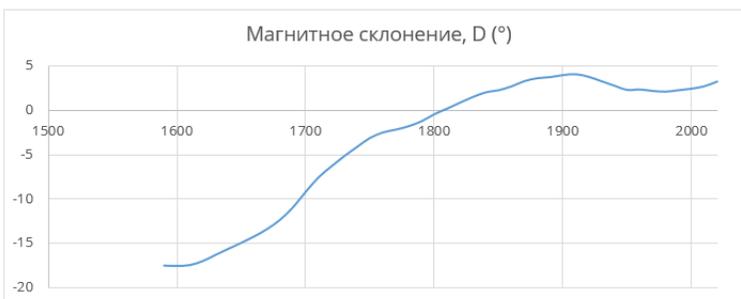
(<https://www.izmiran.ru/magnetism/>)

Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Пулково, Санкт-Петербург и др.

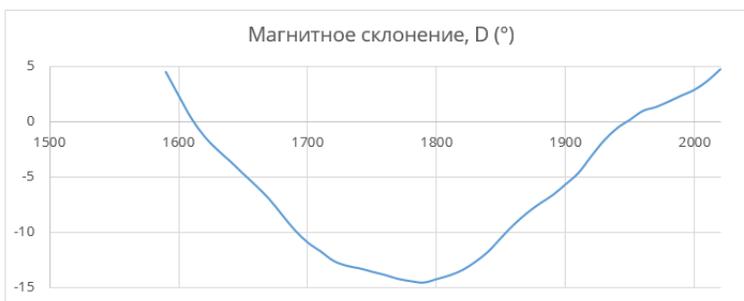
(<http://www.gao.spb.ru>)

ПРИЛОЖЕНИЕ

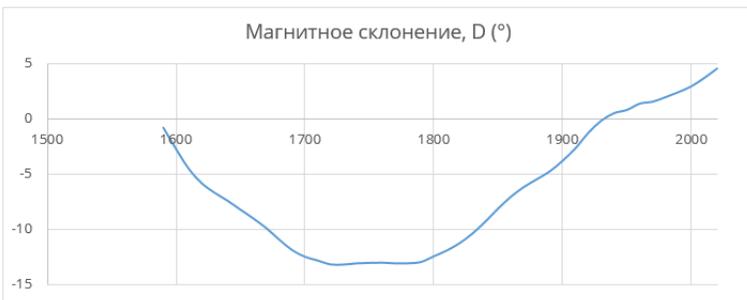
ОПОРНЫЕ
АРХЕОМАГНИТНЫЕ
КРИВЫЕ



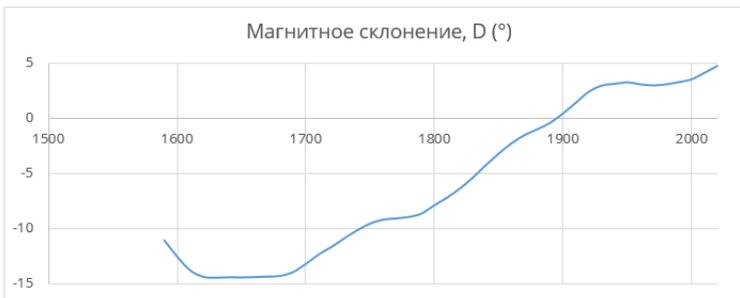
Точка наблюдения: Афганистан (Кабул)
 34.5553° N, 69.2075° E



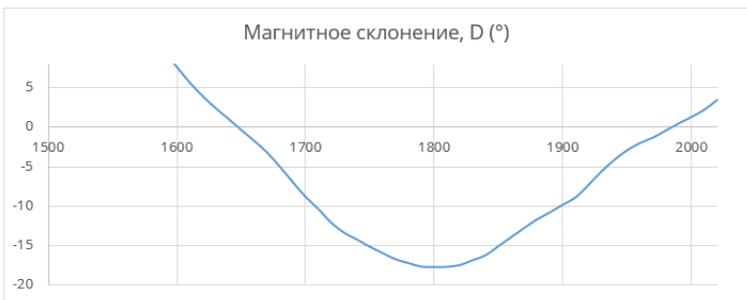
Точка наблюдения: Греция (Афины)
 37.9838° N, 23.7275° E



Точка наблюдения: Египет (Каир)
 30.0444° N, 31.2357° E



Точка наблюдения: Ирак (Багдад)
 33.3152° N, 44.3661° E



Точка наблюдения: Италия (Рим)
41.9028° N, 12.4964° E



Точка наблюдения: Китай (Пекин)
 39.9042° N, 116.4074° E



Точка наблюдения: Мексика (Мехико)
 19.4326° N, 99.1332° W



*Точка наблюдения: Россия (Москва)
55.7558° N, 37.6173° E*



Точка наблюдения: Украина (Киев)
 50.4501° N, 30.5234° E



Точка наблюдения: Франция (Париж)
 48.8566° N, 2.3522° E



Точка наблюдения: Япония (Токио)
 35.6762° N, 139.6503° E

ИЛЛЮСТРАЦИИ

Обложка:

alamy.com standard licence

Рисунки:

Рис. 1 – by brgfx freepik.com

Рис. 2 – by Victor Kharebov

Рис. 3 – 5 – ngdc.noaa.gov (public domain)

Рис. 6 – 9 – by Victor Kharebov

Рис. 10 – alamy.com standard license

Рис. 11 – ngdc.noaa.gov (public domain)

Рис. 12 – (Wiki, public domain)

Рис. 13 – by Victor Kharebov

Рис. 14 – (Wiki, public domain)

Рис. 15 – GNU Free Documentation License

Рис. 16 – 17 – (Wiki, public domain)

Рис. 18 – GNU Free Documentation License

Рис. 19 – by brgfx freepik.com

Опорные кривые – by Victor Kharebov.

ЛИТЕРАТУРА

Бурлацкая С. П. Археомагнетизм: Структура и эволюция магнитного поля Земли. М.: ГЕОС, 2007. – 344 с. (в пер.).

Джекобс Дж. Земное ядро. М.: Мир, 1979. – 305 с.

Дьяченко А. И. Магнитные полюса Земли. М.: МЦНМО, 2003. – 48 с.

Мизун Ю. Г. Космос и здоровье / Ю. Г. Мизун, П. Г. Мизун. – М.: Знание, 1984. – 144 с.

Нечаева Т.Б. Основные проблемы археомагнитного датирования. стр. 122 В кн.: Проблемы абсолютного датирования в археологии. М., 1972.

Осипов О. Д., Минлигареев В. Т., Максимочкин В. И. и др. Исследование дрейфа Южного магнитного полюса Земли и магнитного поля Мирового океана в кругосветной экспедиции ОИС ВМФ «Адмирал Владимирский» // Русское географическое общество. Сайт. 08.06.2020.

Паркинсон У. Введение в геомагнетизм М.: Мир, 1986. – 520с.

Трухин В. И. Конспект лекций по геомагнетизму. М.: Физический факультет МГУ, 2004. – 92с.

Трухин В. И. Геомагнетизм // В кн. Трухин В. И., Показеев К. Б., Куницых В. Е., Шрейдер А. А. Основы экологической геофизики. М.: Физический факультет МГУ, 2000, с. 30–39.

Храмов А. Н., Гончаров Г. И., Комиссарова Р. А. и др. Под ред. А. Н. Храмова. Палеомагнитология. Л.: Недра, 1982. – 312 с.

Яновский Б. М. Земной магнетизм. Л.: Изд. ЛГУ, 1978. – 590 с.

Campbell W. H. Introduction to Geomagnetic Fields. Cambridge: University Press, 1997. – 290 p.

Merril R. T., McElhinny M. W., Mc Faaden P. L. The Magnetic Field of the Earth. Academic Press, 1998. – 532 p.

Rohde, R. A. & Muller, R. A. 2005. Cycles in Fossil Diversity // Nature 434: 209–210.

Yu-Min Chou et al. 2018. Multidecadally Resolved Polarity Oscillations During a Geomagnetic Excursion. The Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS) 115: 8913–8918.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Магнитное поле Земли	5
Источники магнитного поля	5
Морфология вековых вариаций	7
Модели геомагнитного поля	12
Магнитные карты	14
Кривые векового хода	17
Предмет и методы исследований	17
Опорные археомагнитные кривые	20
Перемещение магнитных полюсов Земли	25
Геомагнитные инверсии	31
Экологические аспекты	40
Влияние изменений геополя на биосферу	40
Центры исследований	47
Мировые центры данных	48
Солнечно-земная физика в России	49
Приложение Опорные археомагнитные кривые	50

Виктор Харемов

Вековые вариации магнитного поля Земли
Научно-популярное издание

Автор в краткой и доступной форме излагает основные сведения об источниках и структуре вековых вариаций магнитного поля Земли. Изложены современные представления о характере вариаций геомагнитного поля и методах их изучения. Рассмотрены модели геополя и дрейф магнитных полюсов, экологические аспекты влияния изменений геополя на биосферу. Описана методика создания опорных кривых для археомагнитного датирования. Для самого широкого круга читателей, интересующихся современными науками о Земле.

ISBN 978-5-0059-5627-9



9 785005 956279 >