

Библиотека
«Математическое просвещение»
Выпуск 24

А. И. Дьяченко

МАГНИТНЫЕ ПОЛЮСА ЗЕМЛИ



Издательство Московского центра
непрерывного математического образования
Москва • 2003

УДК 550.38
ББК 26.21
Д93

Аннотация

Географические полюса нашей планеты располагаются в Арктике и Антарктиде. А куда мы в конце концов придём, если будем идти по компасу точно на север? На северный географический полюс? Нет, магнитный северный полюс не совпадает с географическим. И в разные годы стрелка компаса может привести нас в разные места: магнитные полюса, в отличие от географических, не стоят на месте!

В брошюре рассказывается о магнитном поле Земли, об истории изучения магнитных полюсов, а также об истории перемещения полюсов и нынешнем их движении.

Текст брошюры подготовлен по материалам лекции, прочитанной автором 5 октября 2002 года на Малом мехмате для школьников 7—8 классов.

Брошюра рассчитана на широкий круг читателей: школьников, студентов, учителей.

*Издание осуществлено при поддержке
Департамента образования г. Москвы
и Московской городской Думы.*

ISBN 5-94057-080-1

© А. И. Дьяченко, 2003.
© МЦНМО, 2003.

Антон Иванович Дьяченко.

Магнитные полюса Земли.

(Серия: «Библиотека „Математическое просвещение“»).

М.: МЦНМО, 2003. — 48 с.: ил.

Редактор *Р. О. Алексеев.*

Техн. редактор *М. Ю. Панов.*

Лицензия ИД № 01335 от 24/III 2000 года. Подписано в печать 6/V 2003 года.
Формат бумаги 60×88 $\frac{1}{16}$. Бумага офсетная № 1. Печать офсетная. Физ. печ. л. 3,00.
Усл. печ. л. 2,93. Уч.-изд. л. 3,81. Тираж 0000 экз. Заказ 0000.

Издательство Московского центра непрерывного математического образования.
119002, Москва, Г-2, Бол. Власьевский пер., 11. Тел. 241 05 00.

Отпечатано с готовых диапозитивов
в ФГУП «Производственно-издательский комбинат ВИНТИ».
140010, г. Люберцы Московской обл., Октябрьский пр-т, 403. Тел. 554 21 86.

Спросите любого человека, где находятся полюса Земли, и он безошибочно укажет вам на две противоположные точки планеты в Арктике и Антарктиде. О них знают даже дети — простой школьный глобус, и тот продырявлен в этих полюсах металлической осью. Вопрос посложнее: куда мы в конце концов придём, если будем точно следовать указаниям стрелки компаса. Не будет ничего удивительного, если даже образованный человек ошибочно ответит: «на северный полюс». К сожалению, о существовании магнитных полюсов, которые в реальности не совпадают с географическими, люди знают гораздо хуже. И уж совсем редко в качестве ответа вы услышите встречный вопрос: «в какое время?». Будьте уверены, такой собеседник прекрасно разбирается в проблеме. Оказывается, в разные годы стрелка компаса приведёт нас в различные точки планеты — магнитные полюса, в отличие от географических, не стоят на месте!

В ГЛУБЬ ВЕКОВ

История знакомства человечества с магнитным полем Земли уходит в такую древность, что вряд ли мы когда-нибудь точно установим момент, когда люди впервые научились пользоваться магнитной стрелкой. Одно из первых достоверных письменных упоминаний о «магнитной игле, которая может свободно вращаться» приходит из китайской энциклопедии, составленной Гуи-Чинем в 121 г. н. э. Есть свидетельства и постарше. Древний китайский рисунок, датируемый 220 г. до н. э., изображает изящный компас, сделанный в виде небольшой ложечки, свободно вращающейся посередине отлитой из бронзы квадратной пластины (рис. 1). Пластина эта называлась небесным столиком. На ней были нанесены 8 триграмм, 24 направления, связанных с созвездиями, и 28 лунных секторов. О том, что ложечка действительно использовалась в качестве компаса, историки узнали из манускрипта эпохи династии Хань, написанного в 83 г. н. э. В нём говорилось, что ручка такой ложки всегда выбирает только южное направление горизонта.



Рис. 1. Китайский компас в виде ложечки из магнетита, помещённой на бронзовую пластину (220 г. до н. э.). Квадрат символизирует Землю, круг в центре — небеса. В центре круга часто изображали Большую Медведицу.

Множество китайских легенд повествует о том, что ещё до нашей эры мастера Востока владели секретом изготовления чудесных повозок с установленными на них человеческими фигурками

с указывающей на юг вытянутой рукой. Интересно, что и легендарные китайские фигурки, и магнитные ложки указывали именно на юг, а не на север. Дело в том, что истинный северный магнитный полюс, т. е. то место, где силовые линии магнитного поля Земли «выходят на поверхность», располагается как раз в южном полушарии, а истинный южный магнитный полюс, где они «уходят под землю» — в северном. Но так уж исторически сложилось, что южный магнитный полюс для удобства стали называть северным, и наоборот. Этому правила будем придерживаться и мы.

Вот интересный фрагмент из библиотеки старинной летописи китайского фольклориста Су Матзена, которой как минимум две тысячи лет:

«Идут караваны по бескрайним гобийским пескам. Направо, налево — унылые жёлтые барханы. Солнце скрыто жёлтой пеленой пыли. Далёк путь из императорских пагод на берегах Янцзы до минаретов кушанских царств. Трудно пришлось бы караванщикам, если бы не было в караване белого верблюда. Белого верблюда с его бесценным грузом. Бесценным, хотя это не золото, не жемчуг и не слоновая кость. Защищённый деревянной резной клеткой, между горбами белого верблюда совершает свой путь через пустыню глиняный сосуд, в котором на пробке плавает в воде небольшой продолговатый кусок намагниченного железа. Края сосуда выкрашены в четыре цвета. Красный обозначает юг, чёрный — север, зелёный — восток и белый — запад...».

А что европейцы? Узнали ли они о компасе из Китая или додумались сами — этого мы точно не знаем. В труде английского монаха Александра Некэма «О природе вещей», написанном, вероятно, в Париже в 1190 г., о магнитной игле говорится уже как об известном феномене. По-видимому, некоторые европейские мореплаватели в то время уже умели пользоваться этим инструментом. Ещё в конце I тысячелетия н. э. на южных берегах Гренландии появились первые поселения викингов, прибывших сюда на длинных остроносых дракарах. Для этого им пришлось пересечь Атлантику (через Исландию), а сделать это без помощи компаса едва ли возможно. Тем не менее считается, что повсеместное использование компаса как навигационного инструмента началось в Старом Свете лишь в XIII—XIV вв.

Один из самых замечательных европейских научных трудов той эпохи, касающихся магнетизма, — письмо, написанное в 1269 г. военным инженером Петрусом Перегрини своему коллеге во время армейских манёвров в Италии. В нём излагались практические наблюдения и теоретические размышления, касающиеся магнетизма, включая такие понятия как магнитные полюса, притяжение и отталкивание. Перегрини, в частности, придерживался мнения, что стрелка компаса указывает на Полярную звезду, хотя

общепринятым в то время взглядом на причину её удивительного поведения было поверье об огромной магнитной горе, находящейся где-то на северном полюсе и притягивающей к себе стрелку компаса из любой точки Земли. Вплоть до конца XVI столетия моряки свято верили в существование этой горы и считали, что для заблудившихся в арктических водах кораблей она представляет серьёзную опасность: ведь сделаны они не только из дерева и канатов — одних гвоздей и заклёпок сколько!

Перегрини допускает ту же ошибку, что и современный человек, называющий географический полюс точкой, куда указывает стрелка компаса. Отклонение магнитной стрелки от направления на Полярную звезду в большинстве мест на земном шаре слишком велико, чтобы оставаться незамеченным. Величина этого расхождения называется магнитным склонением данного места. При всём несовершенстве первых компасов китайцы заметили это явление ещё в XII в.

Обычно считается, что для Старого Света феномен магнитного склонения открыл Христофор Колумб во время своего первого плавания в Америку в 1492 г. В действительности же моряки центральной Европы знали о нём и раньше. Первое достоверное свидетельство об этом дают нам переносные солнечные часы XV столетия (рис. 2). Такие часы совмещали в себе два инструмента: компас и собственно солнечные часы. Сделаны они так для того, чтобы при установке в любом месте Земли их можно было правильно сориентировать по сторонам горизонта. Так вот, конструкция этих часов, изготовлявшихся в Германии ещё в середине XV столетия, ясно говорит нам о том, что их создателям явление магнитного склонения было уже известно. Конечно, для правильной ориентации часов моряки должны были знать его в местах, где пролегли их маршруты. И в самом деле, оказалось, что на немецких мореходных картах того времени магнитное склонение уже отмечено.

Со временем картирование магнитных склонений стало для мореплавателей важной задачей, и в 1530-х гг. португальцы разработали для этого специальный метод, основанный на наблюдениях



Рис. 2. Солнечные часы, полуденная ось которых смотрит строго на север, показывают точное местное солнечное время. Для правильной ориентации переносных солнечных часов необходимо знать магнитное склонение, т. е. угол между направлением на истинный север и направлением, указываемым стрелкой компаса в данной местности.

Солнца. Пионером этого метода был морской офицер Жан де Кастро (1500—1548). В его на редкость аккуратных бортовых журналах за 1538—1541 гг. содержится целый ряд высокоточных измерений магнитных склонений. Впоследствии этот метод широко использовался во время многочисленных морских путешествий, и именно благодаря картам того времени, дающим нам в руки целый ряд замеров магнитного склонения (геофизик бы добавил — с длинной базой), мы можем сегодня с достаточной точностью реконструировать картину геомагнитного поля начиная с 1500-х гг.; в частности, косвенным образом установить приблизительное местоположение магнитных полюсов в те эпохи.

«ЗЕМЛЯ — БОЛЬШОЙ МАГНИТ»

Ближе к концу XVI столетия стало очевидно, что стрелка компаса может дать нам ещё одну характеристику магнитного поля. Обладая, помимо горизонтальной, ещё одной степенью свободы — вертикальной, она почти во всех точках земного шара (за исключением магнитного экватора) установится наклонно, т. е. сделает то, чего никогда бы не сделала аналогичная немагнитная стрелка. Эту вторую характеристику магнитного поля в выбранной точке земной поверхности называют магнитным наклоном данного места (рис. 3). Её открыл в 1576 г. англичанин Роберт Норман, экспери-

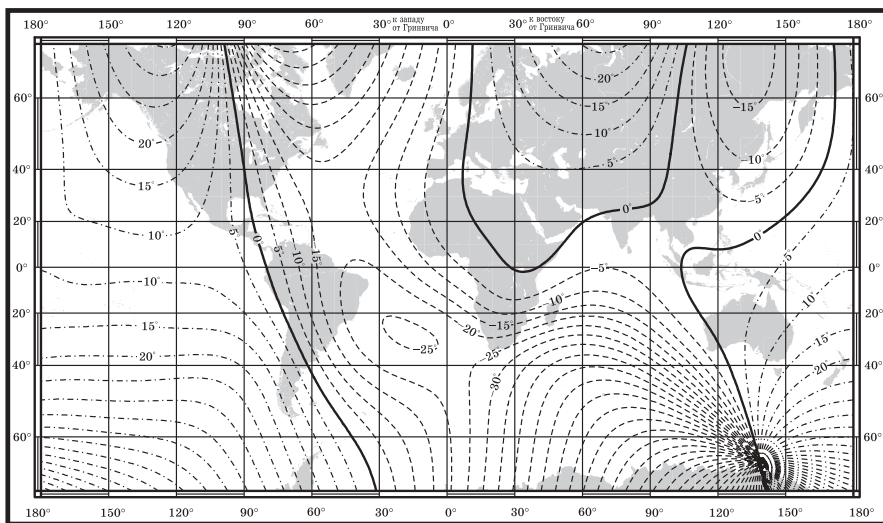


Рис. 3. Карта магнитных склонений на 2000 г. по всемирной магнитной модели WMM-2000. Интервал между соседними контурами равен 5°. Штрих-пунктиром обозначено положительное (восточное) магнитное склонение, пунктиром — отрицательное (западное) магнитное склонение.

ментируя с плавающей в жидкости магнитной иглой (рис. 4). Потрясённый открытием, он ещё целых пять лет изучал этот феномен, прежде чем опубликовал результаты своих наблюдений в книге «Новое притяжение».

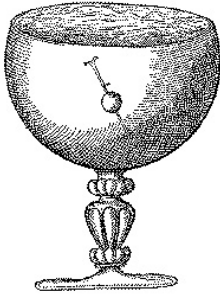


Рис. 4. С помощью плавающей в жидкости магнитной иглы английский исследователь Роберт Норман в 1576 г. обнаружил явление магнитного наклона.

С этого момента в руках исследователей оказались уже и магнитное склонение, и магнитное наклонение, и знание сил, которые действуют между магнитами. Этого было вполне достаточно, чтобы сделать самый важный вывод о магнитном поле Земли, и он не замедлил появиться. В книге, опубликованной в 1600 г. в Лондоне, была наконец высказана революционная мысль о том, что Земля сама по себе — огромный магнит. В магнитной горе больше не было необходимости! Эта книга, известная под названием «О магните, магнитных телах и о великом магните — Земле», была опубликована английским физиком Уильямом Гильбертом (1544—1603) за год до его назначения личным доктором английской королевы Елизаветы I. Используя крошечную модель

Земли, сделанную из природного магнитного материала, он показал, что её свойства удивительно совпадают с теми, которые в реальности наблюдали исследователи на разных широтах. Сегодня лабораторную установку, моделирующую Землю с её магнитным полем, физики называют «таррелла», что в переводе с итальянского означает буквально «маленькая земля». Гильберт также заметил, что у его тарреллы имеется два полюса, т. е. места, в которых магнитная стрелка должна установиться точно вертикально (рис. 5). Так родилось понятие истинных магнитных полюсов, фактически, Гильберт дал их определение, которое с тех пор уже не менялось.

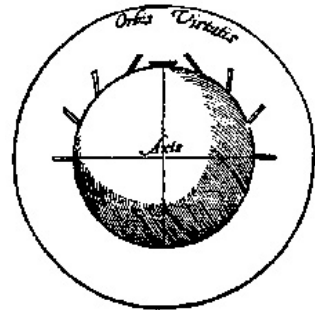


Рис. 5. Эскиз Гильберта демонстрирует, как ориентируются магнитные иглы на поверхности тарреллы. На магнитном экваторе они ложатся горизонтально, но по мере удаления от него наклоняются всё сильнее и сильнее, до тех пор, пока не достигнут полюса. Здесь они устанавливаются перпендикулярно поверхности.

Его книга привлекла внимание многих современников, в частности, очень похвальные отзывы о ней дали Галилей и Кеплер. Однако Церковь отнеслась к ней весьма строго — в книге поддерживалась гелиоцентрическая картина мира. Сегодня появление книги Гильберта «О магните...» считается рождением

геомагнетизма как систематической дисциплины. С этого времени Земля получила два совершенно новых атрибута: северный и южный магнитные полюса. Они располагались где-то в Арктике и Антарктике, но где точно — тогда ещё никто не знал.

Гильберт заложил тот фундамент, на котором можно было начинать строить. Медленно, но верно стала вырисовываться полная картина земного магнитного поля. В 1701 г. после длительного путешествия по Атлантике английский астроном Эдмон Галлей (1656—1742) опубликовал первую настоящую карту магнитных склонений (рис. 6), покрывшую весь Атлантический океан (по экономическим и военным причинам англичанам была важна беспрепятственная навигация именно в этом районе). Ещё раньше, в XVII столетии стал очевиден другой, крайне важный факт — магнитное поле не постоянно, и склонение из года в год постепенно меняется. Отсюда вытекало, что нужно не только картировать земное магнитное поле, но и обновлять эти карты со временем. Несмотря на это, первая карта Галлея (рис. 6) завоевала такую популярность у моряков, что использовалась и через сто лет после своего опубликования. К концу XVIII столетия она лишилась уже не только первой, но и вообще всякой свежести, однако привязанность моряков оказалась сильнее: карту правили, но не выбрасывали.

Вскоре после выхода в свет книги Гильберта моряки стали всё чаще и чаще заплывать в высокие приполярные широты. Это позволяло измерять магнитное поле Земли гораздо ближе к магнитным полюсам, чем раньше. Очевидно, эти измерения заронили мысль о нахождении точного местоположения северного магнитного полюса. Галлей, например, придерживался мнения, что он лежит где-то к северу от Шпицбергена. Это было грубой ошибкой, но Галлея легко оправдать, — дело в том, что стрелка компаса в действительности указывает отнюдь не на магнитный полюс, а всего лишь выравнивается вдоль горизонтальной компоненты магнитных силовых линий в данной местности. Если бы Земля была идеальным дипольным магнитом (ах, если бы!), между этими двумя направлениями не было бы никакой разницы. Но она им далеко не является, и разница велика! Иными словами, строго следуя показаниям стрелки компаса, вы в конце концов действительно придёте к магнитному полюсу, но сделаете это не по прямой, а по сложной изогнутой линии. Поэтому любые попытки судить о местоположении северного магнитного полюса по показаниям компаса в далёких от него точках без учёта сложной структуры земного магнитного поля приводят к огромным ошибкам. У Галлея было ещё очень мало данных (его вины в этом нет), отчего судить о полюсе ему пришлось «слишком издалека».

Справедливости ради надо заметить, что эту ошибку Галлей совершил не первым, и не последним. Впервые это сделал знаме-

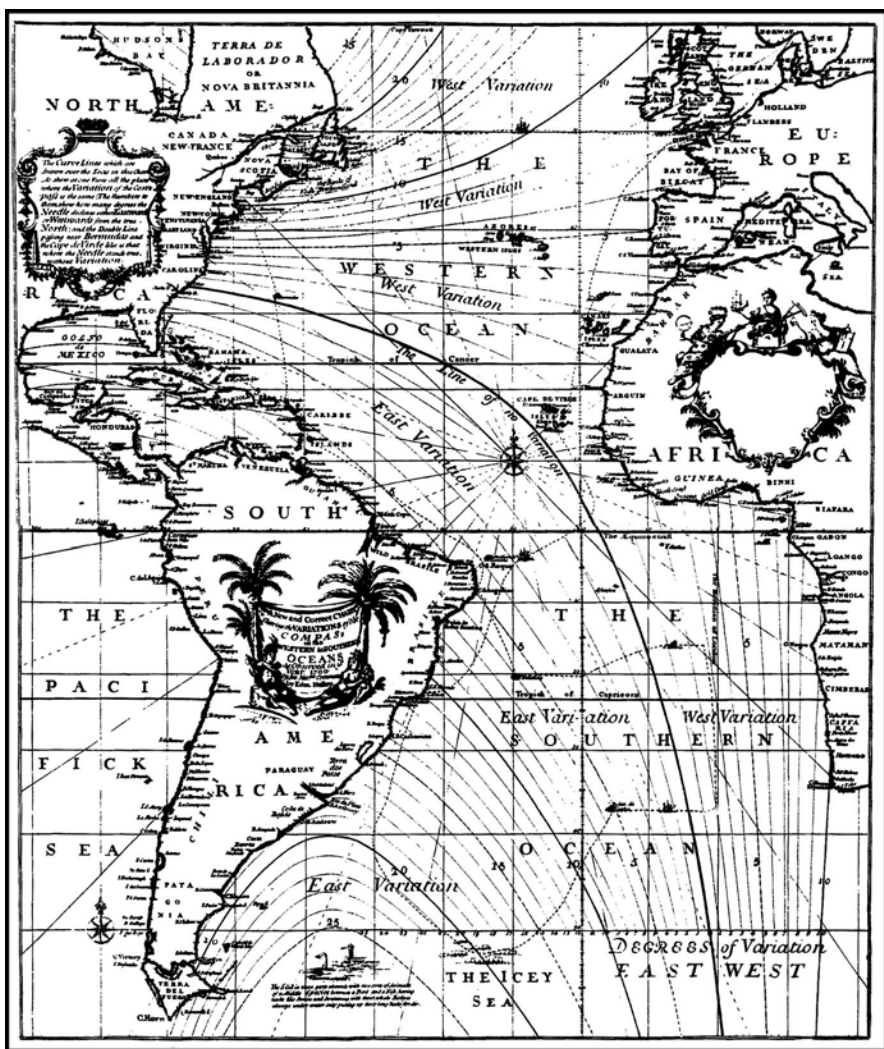


Рис. 6. Предварительная версия карты магнитных склонений, опубликованной в 1701 г. Эдмоном Галлеем после атлантического путешествия на судне «Парамур». На этой карте хорошо видно, что 300 лет назад линия нулевого магнитного склонения в западном полушарии («The Line of no Variation») проходила приблизительно посередине Атлантического океана, а не через Америку, как сегодня. Это объясняется постепенным западным дрейфом элементов геомагнитного поля.

нитый фламандский картограф Герард Меркатор ещё в 1546 г. (!). В то время Гильберту было всего лишь два года, и понятия геомагнитного поля просто ещё не существовало. Общепринятая гипотеза

о том, что где-то на севере находится некий магнитный полюс (магнитная гора в представлении моряков), который притягивает стрелку компаса непосредственно, подтолкнула Меркатора к мысли найти на карте точку пересечения направлений стрелки компаса из разных, удалённых друг от друга мест северного полушария Земли. Эта точка была им найдена и нанесена на карту под названием полюса. Как вы понимаете, к магнитному полюсу Гильберта она имела очень далёкое отношение.

Также неправильно считать, что эпоха XVI—XVII столетий явилась лебединой песней таких «геометрически находимых» магнитных полюсов. Действительность оказалась куда интереснее: они не вымерли, и ту же «ошибку», но уже сознательно, учёные продолжают совершать и в наши дни. За этими полюсами закрепилось название «виртуальных», а вот кто и зачем ими пользуется мы расскажем чуть дальше.

СТАНОВЛЕНИЕ ГЕОМАГНЕТИЗМА

В 1811 г. Датское Королевское научное общество объявило о вознаграждении любого, кто ответит на вопрос: «Может ли магнитное поле Земли быть описано только одной магнитной осью, или нужны несколько?». Одним из тех, кто прислал ответный трактат, был молодой норвежец Кристофер Ханстин (1784—1873). Его ответ привлёк внимание и даже помог ему в 1816 г. занять кресло профессора в университете Кристиании (старое название Осло). Вскоре о Ханстине знали почти во всём мире. Его трактат, отвечающий на датский вызов, был опубликован в 1819 г. в полном объёме под заголовком «Исследования магнетизма Земли». В нём были собраны почти все наблюдения магнитного поля, сделанные к тому времени, вместе с картами и попыткой построить математическую модель, которая воспроизводила бы результаты наблюдений при помощи системы дипольных магнитов внутри Земли. Вывод Ханстина был таков: одного магнита явно недостаточно, требуется как минимум два. Получается всего четыре магнитных полюса. Из них два новых должны быть где-то в Сибири и в юго-восточной части Тихого океана; при этом два первичных полюса Ханстин расположил на далёком севере Канады и в восточной Антарктике.

Мысль Ханстина о четырёх магнитных полюсах появилась в истории не впервые. Достоверно известно, что более чем за сто лет до него всё тот же Галлей, изучая известные к тому времени магнитные данные, пришёл к аналогичному выводу. Есть ещё более раннее свидетельство, но оно уже граничит с фантастикой: как утверждает Ларри Ньюитт из геологической службы Канады в своей работе «Местоположение северного магнитного полюса в 1994 г.», существует одна карта, сделанная рукой... Меркатора,

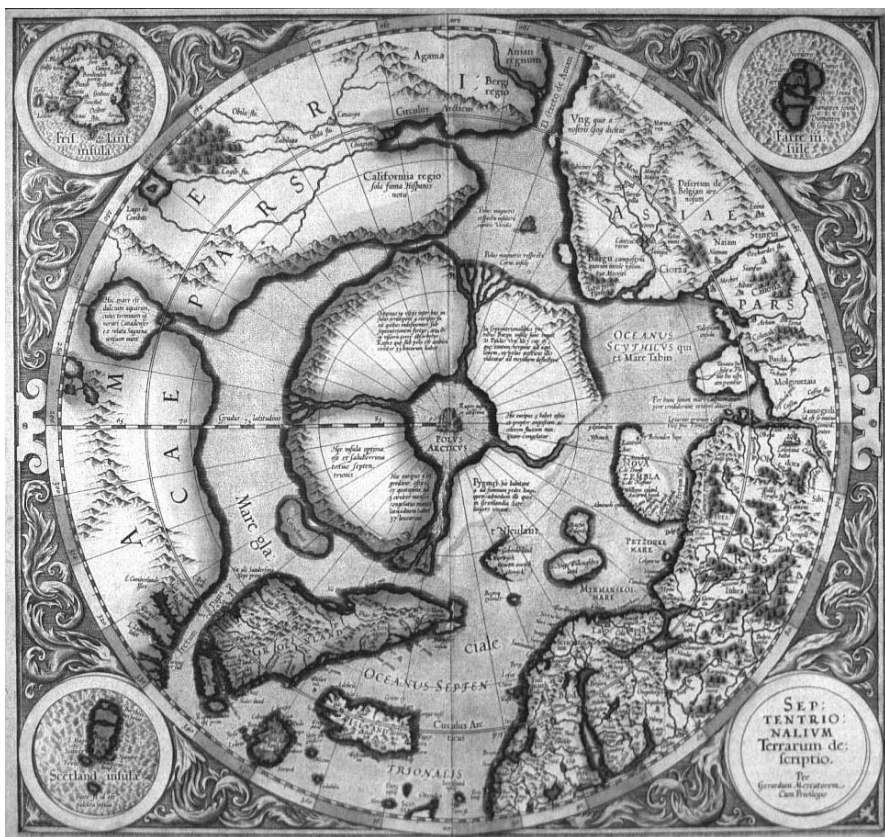


Рис. 7 Знаменитая карта Герарда Меркатора (1589 г.) изображает околополярные области в виде огромного материка, разделённого четырьмя протоками. В его центре Меркатор изобразил высокую Чёрную гору, окружённую водным бассейном округлой формы. Как вы думаете, что это?

на которой в северном полушарии обозначено два магнитных полюса. И это во времена-то «магнитной горы» (рис. 7)! Если это не ошибка, то мы, возможно, несколько недооцениваем своих предков. В любом случае было бы крайне интересно взглянуть на эту карту и узнать, где на ней находится второй полюс.

Кристофер Ханстин сразу попал почти в десятку. В его работе было правильно указано не только местонахождение двух главных магнитных полюсов, но и приблизительное положение двух крупнейших мировых магнитных аномалий, которые он в своей работе называл «полюсами второго, малого диполя». Особенно интересовало Ханстина магнитное поле в Сибири. В 1826—1828 гг. он совершил труднейшее по тем временам путешествие в глубины



ны на нём в момент пролёта над Бразильской аномалией: слишком сильны наводки в детекторах телескопа. Длительность непрерывной экспозиции на Хаббле (12 часов, или восемь полных орбитальных оборотов) ограничена именно ей. За пол-оборота Земли эта ужасная область обязательно однажды окажется под его орбитой, поэтому каждый день строго по два раза телескоп вынужден простаивать без работы!

Вернёмся к трактату Ханстина. Другим важным его аспектом стала попытка математического моделирования магнитного поля Земли. Имея такую модель, можно было в принципе вычислять склонение, наклонение и силу магнитного поля в любой наперёд заданной точке земной поверхности. Однако модель Ханстина прослужила не долго: великий немецкий математик Карл Фридрих Гаусс (1777—1855) взялся за эту проблему с присущей ему педантичностью и в 1838 г. дал такое математическое описание земного магнитного поля, которое используется и в наши дни. Гаусс решил не заниматься гаданием на тему того, что у Земли внутри и сколько там магнитов, — «это дело физиков, а не математиков» (между прочим, геофизики приступили к разрешению загадки физической природы магнитного поля Земли лишь спустя столетие после работы Гаусса). Вместо этого он разработал чисто эмпирическую модель, которая всего-навсего наилучшим образом описывает реальные наблюдения. В гауссовой модели обошлось без двух добавочных полюсов Ханстина — они были распределены, или «размазаны», по неоднородностям одного биполярного поля.

СЕВЕРО-ЗАПАДНЫЙ МОРСКОЙ ПУТЬ НА ВОСТОК

С осознанием сложности структуры магнитного поля Земли пришло и понимание того, что найти истинный магнитный полюс можно только проведя прямые измерения на месте. К счастью, оказалось, что в этот момент история науки чрезвычайно удачно пересеклась с историей общества — если бы не это совпадение, открытие северного магнитного полюса задержалось бы, возможно, на целое столетие. Совершенно независимо от геофизики, развитие мировой торговли заронило в умы европейцев мечту-догадку о том, что где-то за северной оконечностью Америки, возможно, пролегает короткий морской путь из Европы в Восточную Азию. Своими корнями эта мечта уходит ещё в первое столетие после открытия Америки Колумбом.

Северо-западный морской путь на Восток так и оставался не более чем мечтой купцов и географов вплоть до начала XIX в. Но постепенно северные побережья Америки картировались всё глубже и глубже, пока, наконец, не появились первые проблески надежды. Одним из многих, кто отважно служил этому делу, был

опытный исследователь полярных областей, английский мореплаватель Джон Росс (1777—1856). В мае 1829 г. на небольшом пароходе «Виктория» всего с 19 членами экипажа на борту он отплыл от берегов Англии, надеясь, наконец, пройти вожделенным путём до Восточной Азии и воплотить мечту в реальность. Подобно многим путешественникам до него, Росс исследовал многочисленные фьорды арктического побережья Канады, и уже к октябрю этого года «Виктория» оказалась пленницей льдов. Четыре долгих года продолжалась борьба со льдами, то отпускавшими путешественников в короткие летние месяцы, то снова зажимавшими зимой, и всё же главная цель экспедиции — северо-западный морской путь — так и осталась недостижимой. Однако эта неудавшаяся с точки зрения торговой Европы попытка Росса оказалась бесценной для всей последующей геофизики...

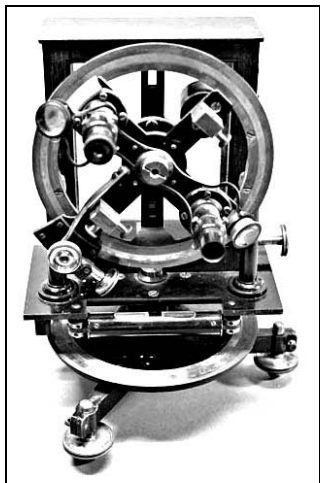


Рис. 9. Магнетометр XIX столетия (прибор для определения магнитного склонения и наклонения). Оба измерительных круга — вертикальный и горизонтальный — имеют цену деления всего 1'.

Зиму 1830—1831 гг. «Виктория» встретила у восточной оконечности неизвестного ранее полуострова (Джон Росс назвал его Земля Бутия в честь спонсора экспедиции Феликса Бута). Зажатая в паковых льдах у побережья, «Виктория» вынуждена была остаться здесь на зимовку. Помощником капитана в этой экспедиции был молодой племянник Джона Росса Джеймс Кларк Росс (1800—1862). В то время было уже обычным делом брать с собой в путешествия все необходимые инструменты для магнитных наблюдений (рис. 9), и Джеймс воспользовался этим. На протяжении долгих зимних месяцев он ходил по побережью Бутии с приборами и проводил магнитные наблюдения. Он понимал, что северный магнитный полюс должен быть где-то поблизости — магнитная стрелка неизменно показывала очень большие наклонения. Нанося на карту измеренные значения, он вскоре понял, где следует искать эту уникальную точку вертикального направления магнитного поля. Весной 1831 г. Джеймс Росс вместе с несколькими членами экипажа «Виктории» прошли две сотни километров пешком в сторону западного побережья Бутии, чтобы достичь этого места, и 1 июня 1831 г. их замысел успешно осуществился: на западном побережье Бутии, на мысе Аделаиды с координатами $70^{\circ}05'$ с. ш. и $96^{\circ}47'$ з. д. Джеймс измерил магнитное наклонение

89°59'. Для всех практических целей этой точности было более чем достаточно.

Так, в 1831 г. местоположение северного магнитного полюса было впервые установлено непосредственно, а «неудачная» экспедиция Росса прославилась на века. Что же касается попыток найти вожденный северо-западный морской путь на Восток, исследователи продолжали поиски в XIX столетии со всё усиливающимся рвением вплоть до 1840-х гг., когда произошла страшнейшая трагедия, вошедшая в историю как «катастрофа Франклина». Тогда в заполярной тундре, неподалёку от магнитного полюса, погибли 138 человек. В 1845 г. они отправились на двух испытанных ледовыми морями судах «Эребус» и «Террор», надеясь пройти северо-западным морским путём под руководством опытного английского полярного исследователя Джона Франклина. То, что осталось от этой экспедиции, было обнаружено в 1850-х гг. на берегу острова Кинг-Уильям. В живых не осталось ни одного свидетеля, и всё же Жюль Верн в своей книге «Путешествие и приключения капитана Гаттераса» описывает тайну гибели экспедиции в таких подробностях, будто участвовал в ней сам. Говорят, писатели могут писать всё, что им вздумается, но эта книга дышит какой-то особой достоверностью, а местами и вовсе больше напоминает бортовой журнал, чем роман...

ПРЯМО ПО КУРСУ — АНТАРКТИДА

«Эребус» и «Террор», которые навсегда остались лежать на дне фиордов Северной Канады, уже успели сыграть в истории науки выдающуюся роль. Именно на них в 1840 г. повзрослевший Джеймс Кларк Росс отправился в своё знаменитое путешествие к южному магнитному полюсу.

27 декабря корабли Росса впервые встретились с айсбергами и уже в новогоднюю ночь 1841 г. пересекли южный полярный круг. В поисках магнитного полюса Росс принял решение идти более восточным курсом, чем это сделали годом раньше две другие полярные экспедиции, ведомые американцем Чарльзом Уилксом и французом Дюмоном д'Юрвилем. Это счастливое решение стало началом целой череды выдающихся открытий Росса.

Очень скоро «Эребус» и «Террор» оказались перед паковыми льдами, неподвижно и угрожающе растянувшимися от края до края горизонта. Справа по курсу (на западе) лежало море Дюмона д'Юрвиля. Оттуда 18 января 1840 г. французская экспедиция уже видела очертания земли, которую Дюмон назвал в честь своей жены Землёй Адели. Погода была не самой лучшей, и всё же 5 января Росс решил бросить корабли вперёд, прямо на льды, и углубиться настолько, насколько это будет возможным. Уже после часа

труднейшего штурма корабли неожиданно вышли в более свободное ото льда пространство (паковый лёд сменился разбросанными там и тут отдельными льдинами). Росс решил идти дальше, хотя время от времени «Эребус» и «Террор» сотрясали удары такой силы, что на их месте обычный, не укрепленный надлежащим образом корабль просто развалился бы на куски.

Ранним утром 9 января экипаж обоих судов можно было увидеть на палубах с округлившимися глазами: впереди простиралось свободное ото льда море! Росс был потрясён. Он не упёрся, подобно другим, в какую-нибудь землю, а продолжал вместо этого миль за милей набирать широту по чистой воде. Это было первым открытием Росса в этом путешествии, и он не отказал себе в удовольствии плыть по морю, носящему... собственное имя.

11 января прямо по курсу показалась земля. Сперва Росс даже подумал, что это ледовый мираж, однако через несколько часов пути стало ясно, что корабли огибают с востока гористую, покрытую снегом землю. Экипаж был в приподнятом настроении, но Росс не разделял эту радость в полной мере. Временами он покусывал губы, ибо прекрасно понимал, что на его пути к магнитному полюсу земля может стать непреодолимым препятствием, и оттого желал бы её вовсе не видеть, или увидеть где-нибудь в другом месте. Но она, похоже, кончаться не собиралась; впрочем, у этого обстоятельства была и другая, приятная сторона, которую Росс, конечно же, упускать не собирался. Он наконец получил возможность открывать самые южные земли во славу Британского королевства, и тем самым вернуть Англии первенство в этом вопросе, которое после бесстрашного кругосветного путешествия Фаддея Фаддеевича Беллинсгаузена целых 20 лет удерживала Россия. Горный хребет, возвышающийся на 2 500 м по правому борту, Росс назвал хребтом Адмиралти; он раздавал названия направо и налево, не пропуская ни одной вершины. 12 января Росс высадился на одном из двух островов около побережья (о. Позешен — от англ. «владения») и водрузил на нём флаг. Земля, простиравшаяся за ними, была названа «Землёй Королевы Виктории».

А между тем поведение компаса становилось всё более странным. Росс, обладавший богатым опытом магнитометрических измерений, понял, что до магнитного полюса осталось не более 800 км — так близко к нему ещё никто не приближался. Оставив позади о. Позешен, корабли пошли дальше, и через несколько дней пути стало очевидно, что Росс опасался не зря: магнитный полюс находился где-то справа, а земля упорно направляла корабли всё дальше и дальше на юг. Пока путь был открыт, Росс не сдавался. Ему было важно по крайней мере собрать как можно больше магнитометрических данных из разных точек побережья Земли Виктории. 27 января впереди появился новый остров,

названный в честь Франклина, а на следующий день экспедицию ожидал самый удивительный сюрприз за всё время этого многомесячного путешествия: на горизонте вырос огромный проснувшийся вулкан. Хукер, один из членов команды «Эребуса», бросился записывать свои впечатления в дневник:

«Открывшееся прямо по курсу побережье — один сплошной массив сверкающих ослепительной красотой снежных пиков. На закате вся эта масса заискрилась самыми нежными оттенками золотистого и алого цветов; вдобавок ко всему над ней висело тёмное облако дыма, окрашиваемого огнём, который столбом вырывался из жерла вулкана; одна сторона облака была черна как сажа, другая — играла всеми цветами солнца... Это было ни с чем не сравнимое и настолько удивительное зрелище, что волей-неволей нас всех наполнило чувство благоговейного трепета перед такими громадами, рядом с которыми мы были просто крошечными и беспомощными щепками. Неопишное ощущение величия Творца в неустанной работе Его рук». Пламя и дым вырывались из вершины главного пика. Этому вулкану Росс дал имя Эребус, а соседнему — потухшему и несколько меньшему — как вы уже догадываетесь, дал имя Террор.

Обойдя остров, Росс попытался идти ещё дальше на юг, но очень скоро перед глазами исследователей возникла совершенно невообразимая картина: вдоль всего горизонта, куда хватает глаз, простиралась белая полоса, которая по мере приближения к ней становилась всё выше и выше! Так может вести себя только отвесная стена, а никак не обычные льды. Когда корабли подошли к ней вплотную, стало ясно, что это именно так: огромная бесконечная справа и слева ледяная стена 50-метровой высоты, совершенно плоская сверху, без каких-либо трещин на обращённой к морю стороне стала непреодолимой преградой для кораблей (рис. 10). В середине февраля 1841 г. после 300-километрового плавания на восток вдоль ледяной громады Росс принял решение прекратить дальнейшие попытки найти лазейку. «Преодолеть эту стену у нас не больше шансов, чем перепрыгнуть клифы Дувра», — произнёс он, и всем стало ясно, что с этого момента впереди остаётся лишь дорога домой. Джеймс решил назвать ледяную стену Барьером Виктории, однако впоследствии весь этот ледник переименовали в шельфовый ледник Росса (к слову, Московская область легко уложится на нём добрый десяток раз).

Назвать эту экспедицию неудачной нельзя ни с какой точки зрения (особенно если учесть, что по возвращении повзрослевший племянник Джона Росса смог добавить к своему имени «Сэр»). Джеймсу удалось измерить магнитноеклонение из очень многих точек вокруг побережья Земли Виктории и установить тем самым положение южного магнитного полюса с высокой точностью:



Рис. 10. Панорама кромки шельфового ледника Росса.

75°05' ю. ш., 154°08' в. д. Минимальное расстояние, отделявшее корабли его экспедиции от этой точки, составило всего 250 км. Именно его измерения можно считать первым достоверным определением координат магнитного полюса в Антарктиде, ибо ни Чарльз Уилкс, ни Дюмон д'Юрвиль не приблизились к этому полюсу даже на сравнимое расстояние и тем более не сделали такого количества магнитных замеров в непосредственной близости от него. Координаты, измеренные Уилксом и д'Юрвилем, хотя они и приводятся в табл. 1 (с. 29), имеют скорее историческую, а не научную ценность: их местоположение на карте относительно других измерений за последние два столетия свидетельствует о крайне невысокой точности.

РУАЛЬ АМУНДСЕН

К началу XX в. уже были картированы почти все области, прилегающие к северо-западному морскому пути. Норвежскому полярному исследователю Руалю Амундсену (1872—1928) удалось наконец завоевать лавры первопроходца, совершив в 1903—1906 г. плавание из Осло, через берега Гренландии и Северной Канады до Аляски (рис. 11) на небольшом промысловом судне «Йоа». Эта экспедиция имела ещё одну, дополнительную цель, о которой Амундсен впоследствии написал: «Я хотел, чтобы моя детская мечта о северо-западном морском пути соединилась в этой экспедиции с другой, гораздо более важной научной целью: нахождением нынешнего местопо-

жения северного магнитного полюса». Он подошёл к этой научной задаче со всей серьёзностью и тщательно готовился к её выполнению. Вместе с инженером Густавом Вииком он изучал теорию геомагнетизма у ведущих специалистов Германии; там же приобрёл магнитометрические приборы специального изготовления. Практикуясь в работе с ними, летом 1902 г. Амундсен вместе с Алексом Стином из норвежской метеорологической службы объездил всю Норвегию.

К началу первой зимы своего путешествия в 1903 г. Амундсен достиг острова Кинг-Уильям, который находился совсем недалеко от магнитного полюса. Магнитноеклонение здесь составляло $89^{\circ}24'$. Решив провести зимовку на острове, Амундсен одновременно разбил здесь настоящую геомагнитную обсерваторию, которая выполняла непрерывные наблюдения в течении 19 мес. Это была поистине впечатляющая работа, особенно если учесть, что измерения фиксировались на фотографические пластинки, которые нужно было заменять и проявлять каждый день! Весна 1904 г. была посвящена наблюдениям «в поле» с целью определения координат полюса настолько точно, насколько это было возможно. Задача была далеко не такой простой и требовала терпения, ибо производимые Солнцем возмущения магнитосферы (магнитные бури) постоянно смещали полюс в какую-нибудь сторону. В целом всё это занятие напоминало охоту на приведение в тундре. И всё же, несмотря на эти трудности, Амундсен достиг успеха и обнаружил, что средняя точка магнитного полюса сместилась к северу по отношению к той точке, в которой его нашла экспедиция Росса.

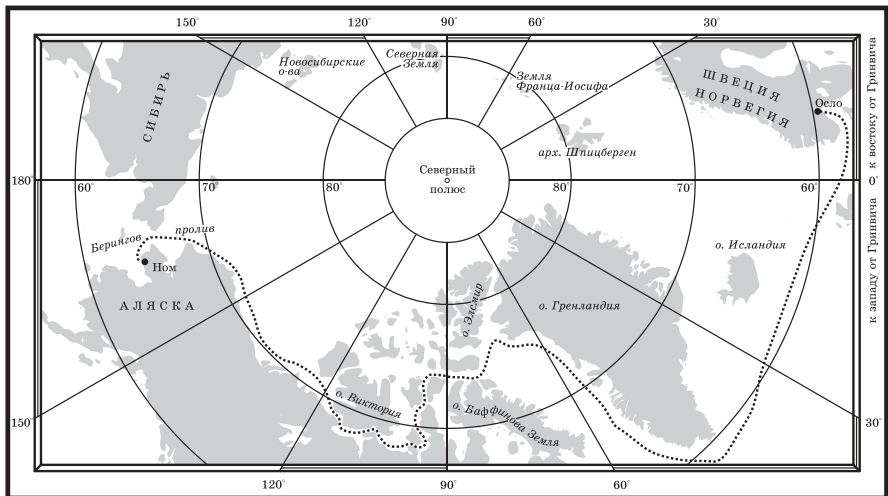


Рис. 11. Маршрут экспедиции Руаля Амундсена 1903—1906 гг. На маленьком судне «Йоа» ему удалось впервые пройти северо-западным морским путём.

В принципе, экспедиция Амундсена могла бы прославиться за одно только это, но впереди ещё оставалась главная часть маршрута. Летом 1905 г. лагерь свернули, и «Йоа» достаточно быстро проплыла финальную часть пути. Тем не менее, Амундсену пришлось провести ещё одну зиму в Арктике, на этот раз на северном побережье Аляски. То, что научные цели играли большую роль для экспедиции, было продемонстрировано ещё раз: магнитная обсерватория была возведена заново и всю зиму 1905—1906 гг. на Аляске проводились магнитные наблюдения. Эта зимовка стоила жизни ближайшему сподвижнику Амундсена Густаву Виику.

Несмотря на все трудности пути, к лету 1906 г. Амундсен уже мог праздновать победу: после 400-летней борьбы северо-западный морской путь был наконец освоен. Материалы магнитных и других научных наблюдений были упакованы и отправлены в Норвегию. Там они пролежали до 1929 г., пока наконец их аккуратно не обработали уже другие учёные, сделав доступными научной общественности. В итоге оказалось, что с 1831 г. по 1904 г. магнитный полюс переместился на 46 км к северу. Несколько забегая вперёд, скажем, что существуют данные, говорящие о том, что за этот 73-летний период северный магнитный полюс не просто немного переехал на север, а скорее описал небольшую петлю. Где-то к 1850-м гг. он окончательно прекратил своё движение на юго-восток и лишь потом начал новое путешествие на север, продолжающееся и сегодня.

НЕСПОКОЙНЫЙ ХАРАКТЕР ПОЛЮСОВ

В следующий раз местоположение северного магнитного полюса было определено в 1948 г. Эра многолетних экспедиций в Канадские фьорды закончилась: теперь до места можно было добраться всего за несколько часов — по воздуху. На этот раз Полю Серсону и Джеку Кларку пришлось переместиться за полюсом уже на остров Принца Уэльского. Максимальное наклонение $89^{\circ}56'$ они смогли измерить на берегу озера Аллен. Учитывая другие измерения поблизости от озера, было установлено, что со времён Амундсена полюс «уехал» уже на целых 400 км. С тех пор точное местоположение северного магнитного полюса определяется канадскими учёными регулярно с периодичностью около 10 лет (последующие экспедиции состоялись в 1962, 1973, 1984, 1994 и 2001 гг., рис. 12). А неподалёку от точки его пребывания в 1950-х гг., на о. Корнуоллис в местечке Резолют-Бей ($74^{\circ}42'$ с. ш., $94^{\circ}54'$ з. д.) была построена геомагнитная обсерватория, которая является важнейшей базой всех подобных экспедиций до наших дней.

Резолют-Бей — одно из самых северных поселений Канады — предоставило кров всего паре сотен отважных душ. Популярная надпись на футболках его обитателей гласит: «Резолют — это ещё

не край света, но отсюда его уже вполне можно увидеть». Путешествие на магнитный полюс — это всего лишь короткая прогулка на аэроплане от Резолют-Бей. С развитием средств сообщения в XX столетии этот удалённый городок всё чаще и чаще стал посещаться туристами, а «магнитное» притяжение полюса приводит сюда людей с самыми необычными целями: начиная от страстного желания увидеть белых медведей и кончая поисками... живого Деда Мороза.

Во время подготовки к полевым наблюдениям магнитного полюса в 1984 г. Ларри Ньюитт с коллегами неожиданно увидели идущую к ним в гости пару молодожёнов с горящими глазами. «Когда они узнали, что мы собираемся на полюс, они попросили нас захватить их с собой, — рассказывает Ньюитт. — Мы спросили о цели. В ответ новобрачные объяснили, что они хотят провести там свой медовый месяц и зачать ребёнка». Конечно, на полюс их никто не взял, и медовый месяц молодым пришлось провести в другом месте. Но сегодня пары, убеждённые в том, что это место каким-то чудесным образом способствует рождаемости (или чему-то ещё), стали намного смелее. Они фрахтуют небольшие самолёты аккуратно до этой притягательной точки, ставят там палатки прямо на льду и доводят своё дело до конца. Ньюитт ничего не сказал о каком-нибудь ощутимом влиянии магнитного полюса на человека, однако, будучи учёным, всё же добавил: «Было бы интересно последить за такими „полярными“ детьми десятков-другой лет».

Ко времени проведения следующей экспедиции в апреле—мае 1994 г. северный магнитный полюс сместился уже очень далеко на север, поэтому Ларри Ньюитт вместе с Чарльзом Бартоном из Австралийской геологической службы решили установить

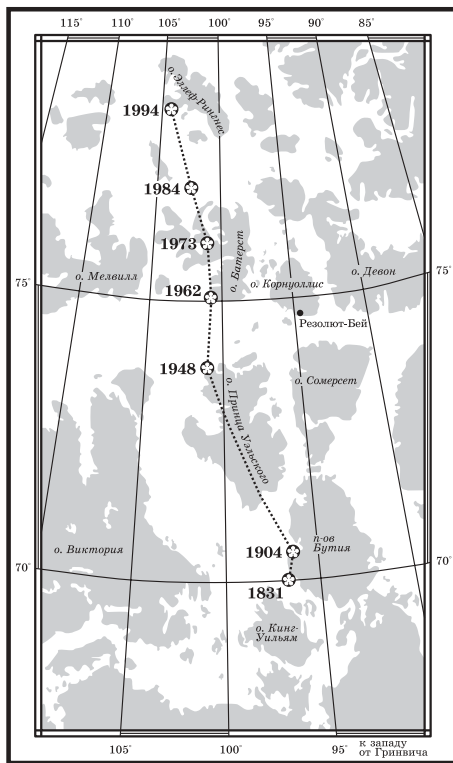


Рис. 12. Маршрут северного магнитного полюса среди островов северной Канады. Звездочками отмечены точки, в которых его положение определялось экспедициями.

временную магнитную обсерваторию на о. Лохид — неподалёку от предсказанного геофизиками положения магнитного полюса на этот год. В их задачу входило не только точное определение его координат, но и мониторинг короткопериодических колебаний магнитного поля поблизости, происходящих в результате суточных перемещений магнитного полюса. Важно понимать, что говоря о магнитных полюсах Земли, мы на самом деле говорим о неких усреднённых точках. Ещё со времени экспедиции Амундсена стало ясно, что даже на протяжении одних суток магнитный полюс не стоит на месте, а совершает небольшие «прогулки» вокруг этой средней точки (рис. 13).

Первичная причина таких перемещений, конечно, Солнце. Потoki заряженных частиц от нашего светила входят в магнитосферу Земли и порождают в ионосфере электрические токи. Те, в свою очередь, порождают вторичные магнитные поля, которые возмущают земное. В результате этих возмущений магнитные полюса и вынуждены совершать свои ежесуточные прогулки. Их амплитуда и скорость естественным образом зависят от силы возмущений, но в той или иной степени они присутствуют всегда. Маршрут таких прогулок близок к эллипсу, причём, северный полюс обходит

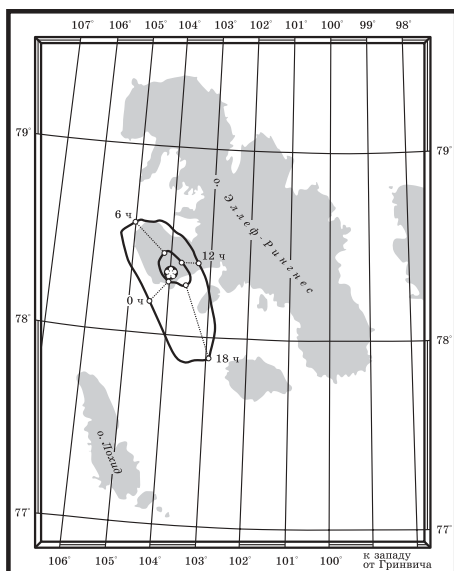


Рис. 13. Суточный путь, проходимый северным магнитным полюсом в спокойный день (внутренний овал) и в магнитно-активный день (внешний овал) по результатам экспедиции 1994 г.

его по часовой стрелке, а южный — против. Последний также более устойчив: даже в дни магнитных бурь он уходит от средней точки не более чем на 30 км; северный же в такие дни может уйти и на все 65 км. В спокойные дни размеры суточных эллипсов для обоих полюсов существенно сокращаются.

Среднее положение северного магнитного полюса в 1994 г. Ньюитт и Бартон определили в точке с координатами $78^{\circ}18'$ с. ш. и $104^{\circ}00'$ з. д. Он находился уже на территории о. Эллеф-Рингнес — последнего острова на пути магнитного полюса в арктические воды. Его смещение относительно исходной точки Джеймса Росса стало весьма внушительно — почти 1000 км, и ему вот-вот предстояло рас-

прощаться с Канадскими островами. Скорость его движения продолжала неуклонно расти и достигла к тому времени уже 15 км/год. Где-то до 1970 г. она десятилетиями держалась на отметке около 9 км/год, но после этого времени северный магнитный полюс стал стремительно ускоряться. Это стало, пожалуй, одной из самых интригующих загадок геофизики нашего времени. Ввиду этого динамике магнитных полюсов Земли мы посвятим отдельную главу.

Один очень важный штрих в портрете неуловимых магнитных полюсов до сих пор ещё так и не обрисован. Если бы дело было только в его блужданиях, Амундсену в начале столетия не пришлось бы так долго за ним гоняться. Но, как мы уже сказали, работа Амундсена напоминала охоту за приведением в тундре, и это — не метафора, а скорее реальность. Отслеживая перемещение полюса по «эллипсу», мы можем нанести на карту полный контур его суточного движения, а затем выбрать в нём среднюю точку. Но это было бы слишком просто. Дабы усложнить задачу, полюс всегда пускается в страшную хитрость и в изобилии порождает... двойников.

Поставьте себя на место Амундсена. Как бы вы поступили, если один ваш помощник сообщил вам, что ровно в полдень он измерил магнитное наклонение в некоторой точке и получил значение 90° , а вслед за ним к вам пришёл второй помощник и сообщил то же самое о совершенно другой точке? А за первыми двумя пришёл бы третий, четвёртый... и все говорили бы о своих уникальных находках в тот же самый пресловутый полдень! Это не выдумка, а ещё одно реальное свойство полюса — появляться, как привидение, в нескольких точках одновременно. На практике часто оказывается, что «измеренный» магнитный полюс строго вертикального поля — это не одна точка, а скорее целая область, в которой существуют множество отдельных полюсов с наклонением 90° . Причина заключается в том, что на направление (и силу) магнитного поля над любой точкой поверхности оказывают дополнительное влияние ещё и небольшие локальные магнитные поля, порождённые собственной намагниченностью пород земной коры и осадочного чехла. В результате говорить о местоположении полюса с точностью до 1 км в большинстве случаев не имеет смысла. Размеры реального пятна полюсов-двойников могут сами по себе иметь поперечник несколько километров.

ЮЖНЫЙ МАГНИТНЫЙ ПОЛЮС

Исторически с измерением координат южного магнитного полюса дело всегда обстояло несколько сложнее. Во многом виновата его труднодоступность. Если от Резолют-Бей до северного

магнитного полюса можно добраться на маленьком аэроплане за несколько часов, то от южной оконечности Новой Зеландии до побережья Антарктиды надо лететь более 2000 км над океаном. Кроме того, южный магнитный полюс покинул территорию ледяного материка уже в 1960-х гг. — гораздо раньше, чем это сделал северный. А проводить измерения на воде много труднее, чем на земле (или на льду, как это приходится делать в последнее время канадским геофизикам). Ларри Ньюитт, например, считает, что из всех состоявшихся к этому времени экспедиций к южному магнитному полюсу, абсолютно надёжные данные дали лишь три: в 1912, 1952 и 2000 гг. Возможно, мнение Ньюитта слишком сурово, но проблема существует, а отсутствие хороших обзоров в печати по соответствующим антарктическим экспедициям только усугубляет ситуацию. Чтобы оценить труднодоступность южного магнитного полюса, мы вернёмся в самое начало XX столетия.

Очень долго после Джеймса Росса никто не осмеливался в поисках магнитного полюса уходить вглубь Земли Виктории. Одними из первых это сделали члены экспедиции английского полярного исследователя Эрнеста Генри Шеклтона (1874—1922) во время его знаменитого путешествия 1907—1909 гг. на старом и очень медленном китобойном судне «Нимрод». Шеклону пришлось остановить свой выбор на нём из-за дешевизны, но, тем не менее, судно обладало главным качеством полярного корабля — крепкостью. После капитального ремонта и дополнительного укрепления металлическими перегородками 30 июля 1907 г. «Нимрод» вы-

шел из доков. Лишь к 16 января 1908 г. судно вошло в море Росса — даже под всеми парами эта «черепеха», как называли её матросы, едва развивала скорость в 6 узлов. Слишком толстые паковые льды у побережья Земли Виктории, обильно усыпанные то тут, то там гигантскими айсбергами, не давали возможности найти подход к берегу. Запасы угля были ограничены, корабль давал течь. Необходимость выгрузить всё снаряжение и разбить лагерь прежде чем корабль уйдёт назад поставила Шеклтона в трудную ситуацию. Он не видел другой возможности, кроме как взять курс на залив Мак-Мёрдо и там во что бы



Рис. 14. «Нимрод», остановленный паковыми льдами в заливе Мак-Мёрдо.

то ни стало пробиться к берегу. Корабль повернул на запад и 28 января вошёл в залив.

В полночь скованное льдами море остановило «Нимрод» в 30 км от береговой линии у мыса Ройдс на восточном побережье острова Росса (рис. 14). На лёд был брошен якорь, а утром началась выгрузка вещей. Осмотр лошадей был неутешителен: все они были в очень плохой форме, а одну из них по кличке Нимрод даже пришлось пристрелить. Первое происшествие случилось уже 31 января: когда экипаж занимался выгрузкой вещей, готовясь к их переносу на землю, неожиданно со снастей соскользнул большой крюк и ударил одного из членов команды, Макинтоша, прямо в глаз. Испытывая адскую боль, Макинтош всё же смог добраться до только что снятого с корабля домика картографа (и одновременно врача экспедиции) Маршала и тут же был осмотрен. Стало ясно, что глаз необходимо удалить немедленно. Используя для обезболивания хлороформ, Маршалл провёл операцию прямо на льду.

Все вещи были перенесены в безопасное место на берегу лишь к 12 февраля. Температура опустилась до -25° . Мачты корабля обледенели и выглядели издалека серыми, а нос корабля был одет в настоящий пиджак из замёрзших брызг. Вскоре «Нимрод» взял курс обратно на Новую Зеландию, а оставшимся на берегу полярникам потребовалось ещё несколько недель, чтобы превратить свои пустые скорлупки в достаточно удобные и функциональные домики. Пятнадцать смельчаков учились есть, спать, общаться, работать и вообще жить в этих невероятных условиях.

К марту Солнце уже едва поднималось над горизонтом: впереди была долгая полярная зима. Обычные дневные обязанности превратились в настоящие события: вынести мусор и угли, да принести свежей воды, особенно во время пурги, стало настоящим испытанием на выносливость. Ночные дежурства проходили с двухнедельной периодичностью. От них были освобождены только двое: кок Уильям Робертс (по понятным причинам) и геолог Брокльхёрст, пальцы ног которого всё ещё оставались чёрными после обморожения (позже Маршалу пришлось провести ещё одну операцию и ампутировать их). Это обморожение стало следствием первого достижения экспедиции: шесть человек во главе с пятидесятилетним профессором Эджвортом Дэвидом совершили восхождение на уснувший вулкан Эребус. 10 марта 1908 г. на высоте 3794 м над уровнем моря они достигли вершины и измерили открывшийся кратер: его поперечник оказался равным 805 м, а глубина — 274 м. На дне кратера находилось озеро расплавленной лавы. Это озеро существует и сегодня, а сам Эребус является одним из редких вулканов, демонстрирующих долговременные лавовые озёра (рис. 15). Даже в уснувшем состоянии он не умирает совсем, с его вершины всегда поднимается тонкая струйка горячего пара;



Рис. 15. Даже в спокойном состоянии Эребус не умолкает совсем. С его вершины всегда поднимается струйка пара, говорящая о том, что в любую минуту вулкан может проснуться. 10 марта 1908 г. поднявшиеся на вершину члены экспедиции Шеклтона обнаружили в чаше кратера озеро расплавленной лавы, из которого валил пар.

а 17 сентября 1984 г. вулкан снова стал извергаться, выбрасывая вулканические бомбы. Он и сегодня остаётся предметом интенсивных геологических исследований.

Всю зиму (в южном полушарии она наступает одновременно с нашим летом) члены экспедиции занимались научными исследованиями: метеорологией, геологией, наблюдением полярных сияний, измерением атмосферного электричества, изучением моря через трещины во льду и самих льдов. Кроме того, оставались ещё медицинские заботы и уход за лошадьми и собаками. Особенно трудно было животным. Даже крепкие сибирские пони слабели на глазах — для жизни в таких условиях они были совершенно не приспособлены, ведь средняя температура зимой в окрестности Эребуса близка к -60° ! Биолог экспедиции Джеймс Мюррей смастерил как-то специальные санки, которые через трещины во льду можно было опускать прямо на дно моря и доставать оттуда множество всякой рыбы, рачков и других морских животных. Когда он устроил первую рыбалку, оказалось, что за то время, пока он поднимал улов на лёд и доносил его до домика, живность промёрзла насквозь, до стеклянного состояния. (К ещё большему удивлению Мюррея, вся эта тварь снова ожила, как только оттаяла в тепле.)

Конечно, к весне люди уже оказались достаточно вымотанными, хотя главные цели экспедиции были всё ещё впереди. 29 октября 1908 г. одна группа во главе с самим Шеклтоном отправилась в запланированное путешествие к Южному географическому полюсу. Несмотря на хорошую подготовку её участников, экспедиция так и не смогла до него дойти. «Конец пути уже маячит перед глазами, но мы сможем идти ещё от силы дня три, не больше; все слабеют на глазах», — писал в своём дневнике Шеклтон. 9 января 1909 г. всего в 180 км от Южного географического полюса ради спасения голодных и измученных людей он решает оста-

вить флаг экспедиции здесь и повернуть группу обратно. «Я подумал, дорогая Эмили, что тебе будет лучше иметь рядом с собой живого осла, чем мёртвого льва», — сказал он своей жене после возвращения.

На обратном пути ему пришлось совершить почти невозможное, чтобы спасти людей. По договорённости «Нимрод» должен был ждать людей в заливе Мак-Мёрдо только до 1 марта. За четыре дня до срока стало ясно, что шансов добраться до корабля всем вместе нет никаких. Шеклтон и ещё один член группы решились совершить отчаянный марш-бросок, чтобы успеть до отплытия. Практически без сна, за двое суток они сумели добиться невозможного. В итоге были спасены все. Отношение полярников к Шеклтону лучше всего выражено словами члена экспедиции на «Нимроде» Раймонда Пристли: «Хочешь быстро и чётко достигнуть цели — зови Амундсена; нужно провести научные исследования — ищи Скотта; но когда не знаешь, что делать, и ничто уже не помогает — вались на колени и моли о Шеклтоне».

Вторая группа полярников во главе с Эджвортом Дэвидом независимо от группы Шеклтона отправилась в путешествие длиной 2000 км к Южному магнитному полюсу. Их было трое: Эджворт Дэвид, Моусон и Маккей. В отличие от первой группы они не имели никакого опыта полярных исследований. Выйдя 25 сентября, они уже к началу ноября выбились из графика и из-за перерасхода пищи вынуждены были сесть на строгий паёк. Антарктида преподавала им суровые уроки; голодные и обессиленные, они проваливались почти в каждую расселину во льду. Начиная с 5 ноября им пришлось ограничить свой рацион всего лишь одним бисквитом на завтрак и одним на обед. Для разделения пищи они использовали следующий метод: выполняющий роль повара клал на крышку посуды три бисквита, а затем, указав на один из них, спрашивал отвернувшегося товарища: «Чей?». Эта простая на вид процедура позволяла избегать ненужных конфликтов. На крошки сперва просто не обращали внимания, однако через несколько дней бисквиты стали ломать прямо над кружками! Кто-то из них после экспедиции, уже на корабле, заметил: «Прежде я даже близко не мог себе представить, как божественно прекрасен один только кусочек этого бисквита».

11 декабря Эджворт провалился в трещину всего в шести метрах от палатки. Держась за края с обеих сторон, он висел до тех пор, пока не подоспел с ледорубом Моусон и не вытащил его наверх. На следующий день пришла очередь Маккея. Устроив охоту на королевских пингвинов, он провалился так глубоко, что оказался по пояс в воде. 20 декабря на волосок от смерти оказался третий член группы. Это случилось во время перехода. Эджворт слышал позади себя лёгкий треск и, оглянувшись, увидел, что

там, где только что шёл Моусон, никого нет. Они с Маккеем мгновенно подбежали к этому месту и в ужасе остолбенели: Моусон висел в глубокой трещине, удерживаемый лишь ремнями, привязанными к нартам. Надо отдать должное Моусону, он не растерялся. Стараясь показать товарищам, что повода для беспокойства уже нет, он стал внимательно изучать кристаллы льда на окружающих его стенках расселины... Эджворт в своём дневнике записал: «После этого эпизода мы стали глядеть себе под ноги более чем внимательно, однако трещины были просто вездесущи. Дважды, когда наши нарты оказывались на вершине ледяных куполов, они скатывались по другую сторону прямо к расселине так, что одна салазка оказывалась в пропасти, а однажды и вовсе едва не исчезли в ней целиком... Случись им туда провалиться, они уволокли бы с собой нас всех — их вес достигает почти трети тонны».

Поднимающееся всё выше и выше солнце и мороз играли с ними злые шутки. Правая щека Моусона и кончик носа Дэвида были обморожены, в то время как руки Дэвида были напрочь сожжены солнечными лучами. Холод сдирал кожу с их губ. Моусон каждое утро просыпался со слипшимся от крови ртом. Вдобавок Маккей начал страдать сильной снежной слепотой. Стараясь хоть как-то его поддержать, товарищи в день Рождества предложили ему в утешение покурить вместо табака высушенную норвежскую траву, которую они использовали для шнурования ботинок...

15 января 1909 г. компас Моусона показал отклонение магнитного поля от вертикали всего в пределах 15'. Оставив почти всю поклажу на месте, воодушевлённые, они одним броском в 40 км достигли магнитного полюса. Здесь они установили флаг, положили на лёд фотокамеру и гордо выстроились перед ней в шеренгу (рис. 16). С помощью верёвки Дэвид спустил затвор. «Настоящим заверяю, что эта область, где теперь находится южный магнитный



Рис. 16. Дэвид, Моусон и Маккей на южном магнитном полюсе 15—16 января 1909 г.

полюс, переходит во владение Англии», — объявил он (это случилось всего через шесть дней после того, как где-то в другой части Антарктиды Шеклтон повернул свою группу обратно). Совершенно измученные, но ещё окрылённые успехом, они также одним переходом вернулись к оставленным вещам и уснули мёртвым сном. Достигнув цели, они думали уже только о том, чтобы не сбить-

Измеренные на месте координаты северного
и южного магнитных полюсов

Северный магнитный полюс							
Год	Координаты		dS (км)	V_{cp} (км/год)	S (км) ¹	Расстояние от Северного полюса (км)	Экспедиция
	с. ш.	з. д.					
1831	70°05'	96°46'	—	—	—	2215	Джон и Джеймс Росс
1904	70°31'	96°34'	60 ²	0,8 ²	60	2167	Амундсен
1948	73°54'	100°54'	404	9,2	464	1790	Серсон, Кларк
1962	75°06'	100°48'	136	9,7	600	1657	Лумер, Доусон
1973	76°00'	100°36'	106	9,6	706	1557	Найблетт, Шарбоне
1984	77°00'	102°18'	122	11,1	828	1446	Ньюитт, Найблетт
1994	78°18'	104°00'	153	15,3	981	1301	Ньюитт, Бартон
2001	81°18'	110°48'	359	51,3	1340	967	Ньюитт, Мандея, Оргевал
Южный магнитный полюс							
Год	Координаты		dS (км)	V_{cp} (км/год)	S (км) ³	Расстояние от Южного полюса (км)	Экспедиция
	ю. ш.	в. д.					
1840	75°20'	132°20'	×	×	×	×	Дюмулин, Купверт (д'Юрвиль)
1840	71°55'	144°00'	×	×	×	×	Уилкс
1841	75°05'	154°08'	—	—	—	1659	Джеймс Росс
1899	72°40'	152°30'	×	×	×	×	Берначчи, Колбек
1903	72°51'	156°25'	×	×	×	×	Четвинд
1909	72°25'	155°16'	×	×	×	×	Моусон, Дэвид, Мак- кей (Шеклтон)
1912	71°10'	150°45'	448	6,3	448	2094	Вебб, Бэйдж, Харли ⁴
1931	70°20'	149°00'	×	×	×	×	Кеннеди
1952	68°42'	143°00'	404	10,1	852	2369	Майо ⁴
1962	67°30'	140°00'	×	×	×	×	Барроус, Нэнли
1986	65°20'	139°10'	×	×	×	×	Квилт, Бартон
2000	64°40'	138°07'	497	10,4	1349	2817	Бартон ⁴

¹ От положения полюса в 1831 г.² Истинное смещение и средняя скорость неизвестны, так как в этот промежуток времени северный магнитный полюс описал некоторую петлю.³ От положения полюса в 1841 г.⁴ Экспедиции к южному магнитному полюсу, данные которых Ларри Ньюитт из Геологической службы Канады считает наиболее достоверными.

ся с обратной дороги (где оставлены съестные припасы) и тем самым остаться живыми.

Таким образом Дэвид, Моусон и Маккей оказались первыми людьми, ступившими на южный магнитный полюс, который в тот день оказался в точке с координатами 72° 25' ю. ш., 155° 16' в. д. (в 300 км от точки, измеренной Россом). Из всего сказанного очевидно, что ни о какой серьезной измерительной работе здесь даже

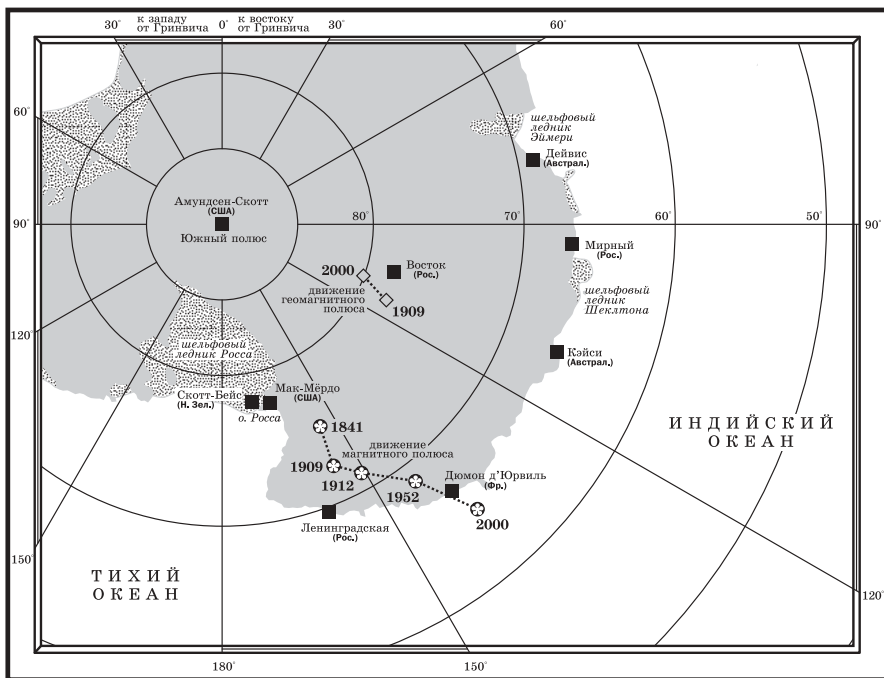


Рис. 17. Смещение южного магнитного и геомагнитного полюсов в XX столетии.

не было и речи. Вертикальное наклонение поля было зафиксировано лишь однажды, и это послужило сигналом не к дальнейшим измерениям, а лишь к скорейшему возвращению на берег, где экспедицию уже ожидали тёплые каюты «Нимрода». Такое определение координат магнитного полюса нельзя даже близко сравнить с работой геофизиков в арктической Канаде, по несколько дней ведущих магнитные съёмки из нескольких точек, окружающих полюс. Учитывая подвижный характер магнитных полюсов, понятно, почему Ньюитт с таким скептицизмом относится к некоторым подобным экспедициям в Антарктиду.

Впрочем, последняя экспедиция 2000 г. была проведена на очень высоком уровне. Поскольку южный магнитный полюс уже давно сошёл с материка и находится в океане, эта экспедиция проходила на специально оборудованном судне. Измерения показали, что в декабре 2000 г. южный магнитный полюс находился напротив побережья Земли Адели в точке с координатами $64^{\circ} 40'$ ю. ш., $138^{\circ} 07'$ в. д. Отсюда до географического полюса около 2810 км, и это расстояние со временем продолжает увеличиваться (табл. 1, рис. 17).

СЕМЬ МАГНИТНЫХ ПОЛЮСОВ И МАГНИТНЫЕ МОДЕЛИ

Если бы на картах не забывали наносить местоположение магнитных полюсов, возможно, люди бы лучше знали о их существовании. Но как показала практика, карты, на которых это было бы сделано грамотно, — огромная редкость.

Чаще всего это бывает просто точка с надписью рядом «Северный (или Южный) магнитный полюс». Как вы уже понимаете, это настоящее безобразие. Как минимум рядом должна стоять дата, на которую это положение даётся. В противном случае вам придётся искать дату выпуска карты из печати, которая тем не менее не может гарантировать, что вы получите истинный год отмеченного магнитного полюса. Вам остаётся надеяться на то, что картографы позаботились о самых свежих координатах магнитных полюсов. Опять же практика показывает, что это не так: расхождение может быть и десятилетним.

Допустим, дата на карте указана. Разумеется, отмеченная точка обозначает усреднённое местоположение магнитного полюса на этот год. Можно ли сказать, что это всё? Оказывается, нет! Следующий вопрос: какого полюса? Всё, что мы до сих пор называли словами «магнитные полюса», оказывается лишь одной их разновидностью, хотя и самой интересной. В реальности их существует множество, и лишь настоящие геофизики понимают смысл каждого. Мы расскажем только о самых главных. А те два, о которых до сих пор говорили и о существовании которых догадался ещё Гильберт, мы будем с этого места называть «истинными».

Итак, *истинные магнитные полюса Земли* — это точки (вернее, небольшие области), в которых силовые линии магнитного поля абсолютно вертикальны. Поиски этих полюсов *in situ**), как вы уже поняли, дело очень хлопотное. А поскольку для многих практических и научных задач необходимо знать их точное местоположение на каждый год, геофизики давно уже научились следить за их перемещением, не устраивая трудных ежегодных полярных экспедиций. Эта задача решается путём построения математических моделей магнитного поля Земли. Мы уже говорили, что имея хорошую модель земной магнитосферы, можно с высокой точностью определять склонение, наклонение и напряжённость магнитного поля в любой точке планеты (ради этого они, собственно, и создаются). В частности, можно указать и точки с наклонением 90° , т. е. магнитные полюса. От точности конкретной модели зависит степень совпадения определяемых ей значений с реальными параметрами магнитного поля.

*) «На месте» — лат.

Геомагнитное поле, измеренное в любой точке земной поверхности, само по себе является комбинацией нескольких магнитных полей, порождаемых разными источниками.

Главное поле. Более 95% измеряемого на поверхности Земли магнитного поля генерируется во внешнем жидком ядре планеты. Эта часть геомагнитного поля часто называют главным полем. Главное поле меняется во времени очень медленно. Говоря о его динамике, чаще всего называют общий западный дрейф его аномалий и изменение полного магнитного момента планеты.

Внешние источники. Токи, текущие в ионосфере и магнитосфере Земли, тоже вносят свой вклад в геомагнитное поле, он может достигать 2% (≈ 1000 нТл во время магнитных штормов, ≈ 50 нТл в спокойные дни). Вариации поля от этих источников гораздо динамичнее: вспомните, как скоротечны магнитные бури.

Другие источники. Сюда входят местные магнитные аномалии земной коры, вызванные природной или остаточной намагниченностью горных пород; электрические токи, текущие в коре или верхней мантии, и другие локальные источники. В некоторых точках планеты они играют очень существенную роль и в ограниченной области могут даже изменить направление геомагнитного поля на противоположное. Но в общем поле планеты сильные локальные аномалии встречаются редко, поэтому в целом их вклад в геомагнитное поле оказывается на уровне 1—2%.

Математические модели, о которых сейчас пойдёт речь, моделируют именно главное поле Земли и его вековые вариации. Процедура приближения модельного поля к главному полю называется разложением на сферические гармоники. В этой процедуре главная компонента геомагнитного поля аппроксимируется двойным рядом квазинормированных (по Шмидту) присоединённых функций Лежандра $P_n^m(x)$ с парой коэффициентов для каждой функции — g_n^m и h_n^m :

$$V(r, \theta, \varphi) = R_3 \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n \left(\frac{R_3}{r} \right)^{n+1} (g_n^m \cos m\varphi + h_n^m \sin m\varphi) P_n^m(\cos \theta).$$

Получаемая величина V , как легко заметить, является скалярной и представлять вектор магнитного поля в выбранной точке, разумеется, не может. Её называют геомагнитным скалярным потенциалом. Напряжённость магнитного поля B получается из геомагнитного потенциала V путём взятия градиента с обратным знаком: $B = -\nabla V$.

Сам по себе двойной ряд функций, являясь бесконечным, не может служить формулой для практических вычислений, поэтому в конкретной модели он обрезается на некотором члене степени N . В этом случае в сумме участвуют только члены степени $n \leq N$ и порядка $m \leq n$. Выбор предельной степени разложения

вместе с удачным выбором коэффициентов сферических гармоник g_n^m и h_n^m (называемых «коэффициентами Гаусса» в честь великого Гёттингенского математика, впервые разработавшего эту технику приближения геомагнитного поля) и определяет точность построенной модели. Полная таблица этих коэффициентов, публикуемая для конкретной эпохи, полностью определяет некоторую модель главного поля Земли на этот момент времени.

Существует великое множество геомагнитных моделей; они создаются различными геофизическими организациями. Существуют, к примеру, региональные геомагнитные модели, описывающие главное поле Земли только для отдельно взятых стран (их территорий, разумеется). Глобальные модели тоже имеют разное назначение. Одни не очень точны, зато работают на больших временных интервалах (так называемые исторические модели), другие имеют прецизионную точность, но требуют постоянного уточнения. Среди этого множества моделей выделяют некоторые глобальные модели, которые принимаются международными коллективами геофизиков в качестве универсальных и общеупотребимых. Остановимся на одной из самых известных.

Каждые пять лет избранный комитет Международной ассоциации геомагнетизма и аэронавтики (подразделение V, рабочая группа 8) утверждает набор коэффициентов Гаусса, наилучшим образом согласующийся с текущими магнитометрическими данными целой сети магнитных обсерваторий (а сегодня и искусственных спутников Земли). Эта модель, в полной её форме, использует разложение на сферические гармоники с глубиной вплоть до функций Лежандра 10-й степени и порядка (всего получается 120 коэффициентов Гаусса). Утверждая этот набор коэффициентов, комитет тем самым утверждает то, что называется «международным эталонным геомагнитным полем» («International Geomagnetic Reference Field», IGRF), которое будет действительно на следующее пятилетие. Поскольку главное поле само постепенно меняется, должны меняться и коэффициенты. Для учёта этих вариаций комитет публикует также дополнительную таблицу из 80 поправок (до 8-й степени и порядка), которые вычисляются на основании скорости изменения параметров поля в год публикации. Эта таблица используется для линейной экстраполяции основных коэффициентов модели в последующие 5 лет с момента её опубликования. Поскольку сама скорость изменения параметров поля тоже может варьироваться, комитет категорически не рекомендует пользоваться «просроченными» моделями. Из-за этого, в частности, сама аббревиатура IGRF всегда сопровождается цифрой года публикации, например: IGRF-00 — это модель 1900 г., принятая на период 1900—1905 гг. Исторически это было первое принятое комитетом международное эталонное геомагнитное поле. IGRF-95 — это

предпоследняя модель 1995 г., принятая на срок 1995—2000 гг.; сегодня она уже устарела. В ноябре 1999 г. была опубликована самая последняя модель IGRF-2000, которой и рекомендуется пользоваться сейчас всем учёным.

Часто встречается несколько другая аббревиатура — DGRF. Эта модель появляется на свет уже после истечения пятилетнего срока какой-то IGRF модели и описывает то, как поле вело себя в реальности. Она строится на основе геомагнитных наблюдений за прошедшее пятилетие и является уточнением IGRF. Её аббревиатура так и расшифровывается — «уточнённое эталонное геомагнитное поле» («Definitive Geomagnetic Reference Field»). К ней тоже обязательно добавляется цифра года — года той модели IGRF, которую она уточняет.

Предельная степень и порядок используемых в разложении коэффициентов естественным образом ограничивает точность модели на малых участках земной поверхности. Для международного эталонного геомагнитного поля используются члены до 10-й степени и порядка включительно; это значит, что в них учитываются сферические гармоники с длиной волны приблизительно до 2000 км. Гармоники более высоких порядков опускают, поэтому детали геомагнитного поля на меньших масштабах представляться этой моделью очевидным образом не могут. Геофизики считают, что члены ряда, начиная где-то с 12-й—14-й степени и порядка, порождаются главным образом аномалиями в земной коре или токами в верхней мантии, а значит, не являются элементами главного поля Земли как таковыми.

Если говорить в общем, хорошие современные модели, такие как IGRF или «всемирная магнитная модель» («World Magnetic Model», WMM), имеют точность в пределах 30' для магнитного склонения и наклонения и в пределах 0,2 мкТл по интенсивности. Но существуют, хотя и редко, аномалии с отклонением более 10° от этих моделей. Чаще встречаются локальные магнитные аномалии в 3—4°, но, как правило, в очень ограниченных областях.

Из сказанного выше в частности следует, что никакая модель не может указать координат истинных магнитных полюсов с абсолютной точностью, ибо локальные аномалии в той или иной степени всегда влияют на их положение. Отсюда возникает новое понятие — *модельный магнитный полюс*, который является той точкой поверхности, в которой конкретная модель предсказывает область с наклонением 90°. Пользуясь, например, для нахождения этих областей моделью IGRF, мы получим так называемые модельные магнитные полюса международного эталонного геомагнитного поля. В 1994 г. среднее положение истинного северного магнитного полюса было 78°18' с. ш., 104°00' з. д. Однако модельный северный магнитный полюс в том же году (согласно DGRF-90) распола-

Таблица 2

Координаты северного магнитного полюса
на 1 января 2001 г.

	С. ш.	В. д.
Измерения на месте	81°18'	110°48'
Модель IGRF	81°00'	110°00'
Модель WMM	81°12'	110°24'
Модель CGRF («Canadian Geomagnetic Reference Field»)	81°18'	110°24'

гался в точке с координатами 78°42' с. ш., 104°42' з. д. Разница в 47 км хорошо иллюстрирует влияние как местных магнитных аномалий, так и наводимых надземными токами полей. Для южного магнитного полюса в декабре 2000 г. расхождение между измеренным и модельным значением по IGRF-2000

оказалось совсем незначительным: всего 11 км. Но здесь нужно учитывать, что с момента публикации IGRF-2000 прошёл всего год; модель очень свежая и коэффициенты ещё не сильно «ухали».

Как видно, модельные полюса могут с неплохой точностью приближать истинные (табл. 2, рис. 18), а для своего вычисления не требуют экспедиций на место; нужны лишь данные стационарных магнитных обсерваторий и специализированных спутников. Тем не менее на картах около точки магнитного полюса необходимо всегда указывать его истинную природу. Если для истинных и модельных полюсов вертикального наклона разница не так уж и велика, то сейчас мы познакомимся с магнитными полюсами ещё одного рода, которые могут отстоять от истинных более чем на 30° по долготе! Эту разницу малой уже никак не назовёшь.

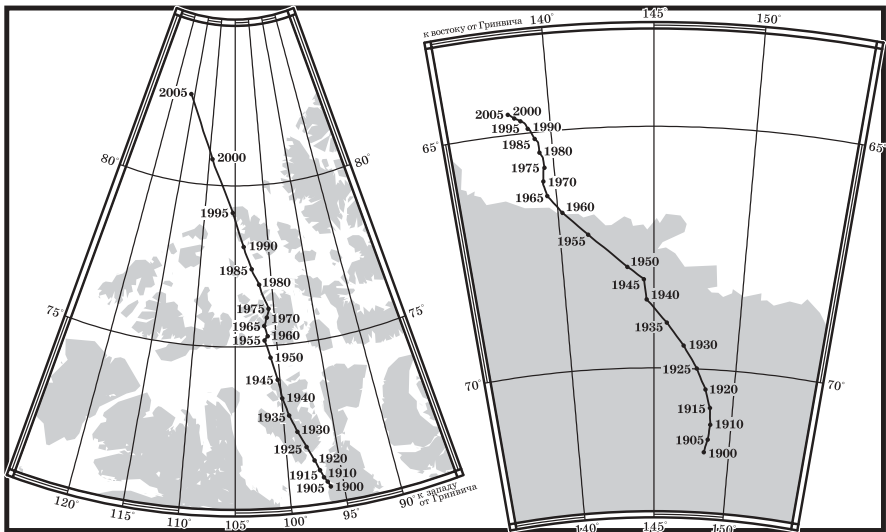


Рис. 18. Маршруты модельных магнитных полюсов за XX столетие. 1945—1995 — DGRF, 1995—2000 — WMM-90 (исправленная), 2000—2005 — WMM-2000.

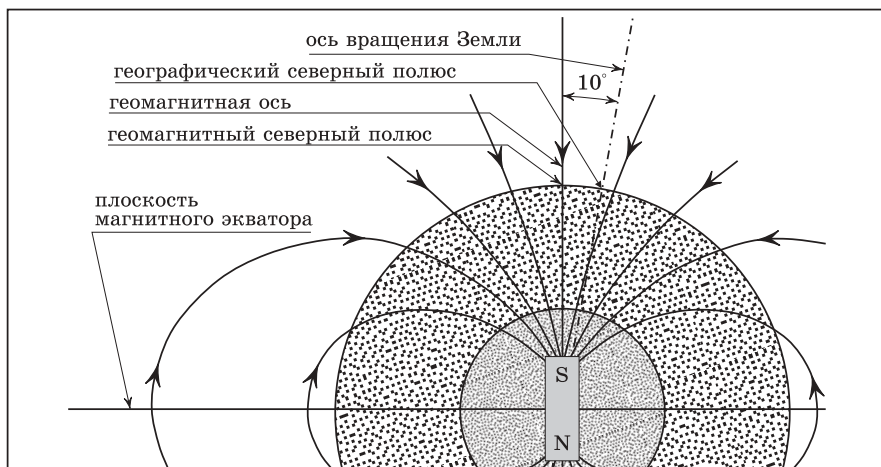


Рис. 19. Эта классическая схема геоцентрического диполя Земли прекрасно иллюстрирует суть. Но обратите внимание на единственное число на схеме — 10° . «Окаменевшее» в старых учебниках (и в нашем сознании) число $11^\circ 30'$ уже давно не отвечает действительности. Сегодня ось магнитного диполя планеты стремительно возвращается к оси её вращения. Кстати, истинные магнитные полюса не очень-то солидарны с геомагнитными. В какой-то степени это можно понимать как «демонстрацию силы» недипольных компонент геомагнитного поля.

У описанного выше двойного ряда функций Лежандра есть замечательное свойство. Если мы обрежем его на степени $n=1$, то полученная сумма всего только из трёх членов уже даст нам в среднем более 90% вклада в главное поле Земли (хотя эта величина, конечно, колеблется от места к месту). Такая упрощённая модель описывает поле воображаемого идеального геоцентрического диполя, наклонённого на 10° к оси вращения планеты и служащего первым приближением к реальному геомагнитному полю. Геофизики называют его дипольной компонентой главного поля. Все остальные слагаемые при $n \geq 2$ образуют так называемые недипольные компоненты, которые можно рассматривать просто как возмущения дипольной компоненты главного поля планеты. Оказалось, что очень полезно установить координатную систему, связанную с геоцентрическим диполем. Геофизики называют её «геомагнитной координатной системой». А две симметричные точки, в которых ось этого диполя прокалывает поверхность планеты, называют *геомагнитными полюсами* Земли, или полюсами геоцентрического диполя (рис. 19, табл. 3, 4). К примеру, в середине 1996 г. модель IGRF-95 помещала их в точках с координатами $79^\circ 18'$ с. ш., $71^\circ 30'$ з. д. (пролив Смит около Гренландии) и $79^\circ 18'$ ю. ш., $108^\circ 30'$ в. д. (недалеко от российской антарктической станции Восток). Разница только по долготе между ними и истинными

Координаты северного геомагнитного полюса и магнитный момент геоцентрического диполя планеты¹

Модель, год	С. ш.	В. д.	Момент M (10^{15} Тл·м ³)	Модель	С. ш.	В. д.	Момент M (10^{15} Тл·м ³)
1550	86°54'	25°54'	9,54	DGRF-55	78°28'	69°10'	8,05
1600	84°36'	29°42'	9,36	DGRF-60	78°31'	69°28'	8,02
1650	83°00'	37°42'	9,18	DGRF-65	78°32'	69°51'	8,00
1700	81°42'	45°24'	9,00	DGRF-70	78°35'	70°11'	7,97
1750	79°54'	54°36'	8,84	DGRF-75	78°41'	70°28'	7,94
1800	79°12'	59°00'	8,61	DGRF-80	78°49'	70°46'	7,91
1850	78°30'	64°24'	8,47	DGRF-85	78°58'	70°54'	7,87
1900	78°30'	68°00'	8,27	DGRF-90	79°08'	71°07'	7,84
DGRF-45	78°28'	68°32'	8,08	IGRF-95	79°18'	71°25'	7,81
DGRF-50	78°28'	68°51'	8,07	IGRF-2000	79°32'	71°34'	7,79

¹ До 1990 г. — реконструкция по Бартону, 1989.

За последние четыре с половиной столетия полюс наклонного диполя Земли сместился по долготе на 45° к западу. Средняя скорость смещения около 6' в год. Это одно из проявлений общего западного дрейфа магнитного поля Земли.

Таблица 4

Коэффициенты сферических гармоник геомагнитного поля (коэффициенты Гаусса) в модели IGRF-2000 (нТл)

Коэффициент	Порядок m	Степень n			
		1 дипольная компонента	2 квадрупольная компонента	3 октупольная компонента	4
g_n^m {	4				110
	3			715	-405
	2		1672	1253	251
g_n^0 {	1	-1728	3072	-2290	787
	0	-29615	-2267	1341	935
	1	5186	-2478	-227	272
h_n^m {	2		-458	296	-232
	3			-492	119
	4				-304

Коэффициент g_1^0 является доминирующим в разложении главного поля на гармоники. Он определяет величину эффективного дипольного момента вдоль оси вращения планеты. Соединяя три коэффициента степени 1, мы получим наклонный дипольный момент M ($R_3 = 6\,371\,200$ м — радиус Земли):

$$M = R_3^3 \sqrt{(g_1^0)^2 + (g_1^1)^2 + (h_1^1)^2} =$$

$$= 6\,371\,200^3 \sqrt{(-29\,615)^2 + (-1728)^2 + 5186^2} = 7,79 \cdot 10^{15} \text{ Тл} \cdot \text{м}^3.$$

Координаты северного геомагнитного полюса вычисляются следующим образом:

$$\text{широта } \lambda = \arctg \frac{g_1^0}{\sqrt{(g_1^1)^2 + (h_1^1)^2}} = \arctg \frac{-29\,615}{\sqrt{(-1728)^2 + 5186^2}} =$$

$$= -79^\circ 32' \text{ ю. ш. (или } 79^\circ 32' \text{ с. ш.)},$$

$$\text{долгота } \varphi = \arctg \frac{h_1^1}{g_1^1} = \arctg \frac{5186}{-1728} = -71^\circ 34' \text{ в. д. (или } 71^\circ 34' \text{ з. д.)}.$$

магнитными полюсами огромна. Для южного магнитного полюса сюда добавляется ещё и значительная разница по широте.

Геомагнитная координатная система полностью определяется положением одного из её полюсов и выбором нулевого меридиана — по соглашению в качестве такового выбирают тот, который проходит через южный географический полюс. Эту координатную систему чаще всего используют учёные, изучающие солнечно-земные связи и магнитосферу планеты в целом. Для них недипольная компонента главного поля Земли, которая особенно сильно проявляется у поверхности планеты, не играет никакой роли. Это легко объяснить. Дипольная компонента поля ($n=1$) убывает как r^{-2} , квадрупольная ($n=2$) — как r^{-3} , октупольная ($n=3$) — как r^{-4} и т. д. Следовательно, чем дальше мы удаляемся от центра планеты, тем меньший вклад в общее геомагнитное поле вносят недипольные компоненты. Интересно, что кольца полярных сияний — северный и южный авроральные овалы — центрируются уже главным образом вокруг геомагнитных, а не истинных магнитных полюсов, хотя нижняя их граница опускается до высоты всего 100 км.

Таблица 5

Положение центра эксцентричного диполя Земли и координаты его полюсов

Модель	Положение центра				Сев. полюс		Юж. полюс	
	X (км)	Y (км)	Z (км)	d (км)	С. ш.	З. д.	Ю. ш.	В. д.
DGRF-45	-355,24	175,47	92,33	406,83	80°54'	83°52'	75°31'	121°05'
DGRF-50	-359,03	190,67	101,29	418,95	81°02'	84°23'	75°23'	120°41'
DGRF-55	-362,59	203,52	110,75	430,30	81°09'	84°56'	75°15'	120°17'
DGRF-60	-365,90	214,78	122,42	441,58	81°18'	85°34'	75°11'	119°59'
DGRF-65	-368,77	223,78	133,56	451,57	81°24'	86°16'	75°08'	119°37'
DGRF-70	-373,13	230,96	146,40	462,60	81°32'	87°04'	75°06'	119°24'
DGRF-75	-378,57	237,02	159,83	474,38	81°41'	87°59'	75°07'	119°17'
DGRF-80	-385,41	247,49	170,21	488,63	81°53'	89°03'	75°07'	119°10'
DGRF-85	-391,78	258,51	178,73	502,26	82°09'	90°03'	75°09'	119°11'
DGRF-90	-396,49	270,82	185,88	514,87	82°23'	91°03'	75°11'	119°03'
IGRF-95	-400,51	282,84	192,87	526,89	82°39'	92°12'	75°14'	118°52'
IGRF-2000	-401,86	300,25	200,61	540,27	83°03'	93°30'	75°34'	118°66'

X, Y, Z — положение эксцентричного диполя в прямоугольных декартовых координатах (начало координат находится в центре Земли, ось X проходит через точку 0° д., 0° ш., расположенную на гринвическом меридиане, ось Y — через точку 90° з. д., 0° ш., ось Z направлена к Северному полюсу), $d = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}$. Его проекция из центра Земли на её поверхность в 2000 г.:

$$\text{широта } \lambda = \arcsin \frac{Z}{d} = \arcsin \frac{200,61}{540,27} = 21,80^\circ \text{ с. ш.,}$$

$$\text{долгота } \varphi = 90^\circ - \arctg \frac{X}{Y} = 90^\circ - \arctg \frac{-401,86}{300,25} = 143,23^\circ \text{ в. д.}$$

Эта точка находится в северо-западной части Тихого океана, у северной оконечности Марианских островов.

Помимо вышеназванных магнитных полюсов встречаются и другие. Давайте, например, зададимся вопросом: действительно ли геоцентрический диполь представляет главное поле Земли лучше всех других диполей? Ответ отрицателен. Дело в том, что магнитное поле Земли в целом несимметрично. Если при разложении на сферические гармоники сразу сместить начало координат из центра геоида таким образом, чтобы минимизировать вклады членов степени $n=2$, можно построить

модель, дипольная компонента которой представляет главное поле Земли ещё точнее. Такую модель называют эксцентричной. А смещённый диполь, наилучшим образом совпадающий с главным полем планеты, называют эксцентричным диполем магнитного поля Земли. Математически нетрудно показать, что поле эксцентричного диполя можно получить и в обычной геоцентрической модели — суммированием поля центрального диполя (члены степени $n=1$) и квадрупольной компоненты поля (члены степени $n=2$). Иными словами, первые восемь членов ряда ($n \leq 2$) геоцентрической модели полностью определяют эксцентричный диполь Земли. Направление в пространстве и магнитный момент геоцентрического и эксцентричного диполей совпадают, однако центр последнего смещён относительно центра геоида на 540 км в направлении северной оконечности Марианских о-ов в Тихом океане (данные на 2000 г.), рис. 20, табл. 5. У этого диполя будут и свои, но уже несимметричные полюса на земной поверхности.

Теперь вы понимаете, почему на карте кроме даты важно правильно указывать и то, какой именно полюс обозначен. Если это один из модельных полюсов, в идеальном случае следует указать и ту модель, по которой он вычислялся.

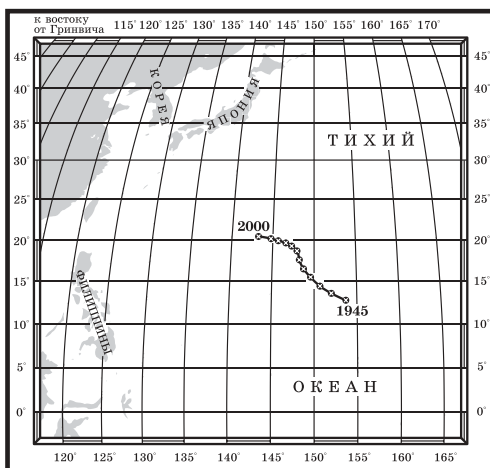


Рис. 20. Проекция центра эксцентричного диполя из центра Земли на её поверхность за период 1945—2000 гг. (DGRF/IGRF).

ДИНАМИКА ПОЛЮСОВ

Пришло время вернуться к истинным магнитным полюсам планеты и спросить себя: где же они находились раньше и куда движутся? Отдадим должное первым попыткам мореплавателей

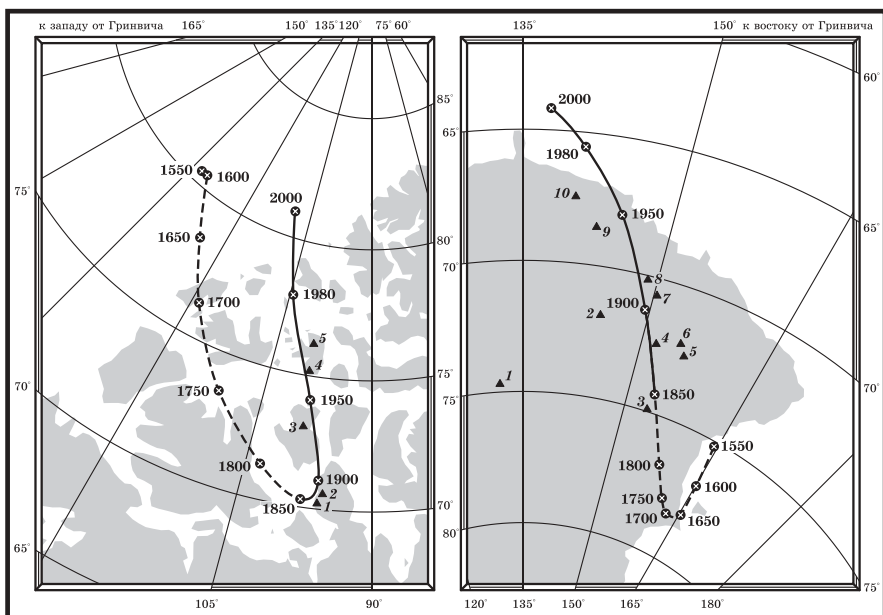


Рис. 21. Реконструкция дрейфа истинных магнитных полюсов за 450 лет. Пирамидками обозначены места, в которых положение магнитных полюсов определялось на месте.

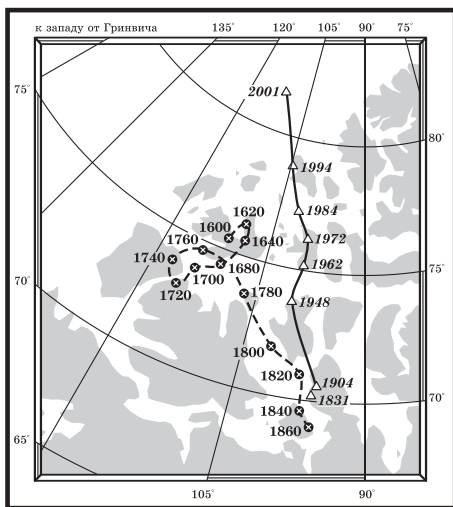


Рис. 22. Реконструкция дрейфа истинного северного магнитного полюса за период 1600—2001 гг. (по Л. Ньюитту).

картировать магнитные склонения ещё в XVI—XVIII вв. — именно благодаря им мы можем ответить на первую половину вопроса. Используя все наблюдения с 1500-х гг. до нашего времени и строя наилучшим образом соответствующие им модели магнитного поля Земли, учёные сумели реконструировать маршрут движения магнитных полюсов на этом интервале времени (рис. 21). Хорошо видно, что оба они совершили своего рода вольт-фас: северный после недолгой вылазки на территорию Канады приблизительно в середине XIX в. развернулся и теперь вновь уходит в Аркти-

ческие воды; южный же не спеша сближался со своим географическим тёзкой по западной окраине моря Росса, а где-то на рубеже XVII—XVIII веков внезапно взял курс на юго-восточную окраину Индийского океана (это произошло как раз около Эребуса). Однако, это лишь одна из возможных точек зрения. В 2002 г. Канадская геологическая служба опубликовала другую реконструкцию дрейфа истинного магнитного полюса по версии Ларри Ньюитта (рис. 22).

Обратите внимание, самое большое продвижение оба полюса сделали в XX столетии. Ещё более интересным оказалось их поведение на границе XX и XXI вв. Если южный магнитный полюс к нашему времени несколько снизил скорость своего дрейфа — в последние годы до 4—5 км/год, то северный испытывает такое ускорение, что геофизики теряются в догадках: к чему бы это? Приблизительно до 1971 г. он смещался более или менее равномерно со скоростью около 9 км/год, затем неожиданно стал ускоряться. К началу 1990-х гг. он проходил уже более 15 км за год, причём само ускорение тоже росло: от 0,22 км/год² в начале 1970-х до 2,21 км/год² в конце 1990-х.

Это ускорение многие геофизики связывают с так называемым геомагнитным толчком, произошедшем в 1969—1970 гг. Геомагнитный толчок — это сравнительно резкое изменение в скорости вековых вариаций одного или нескольких параметров магнитного поля Земли. Один из самых мощных геомагнитных толчков наблюдался в течение всего нескольких месяцев 1969—1970 гг. на многих магнитных

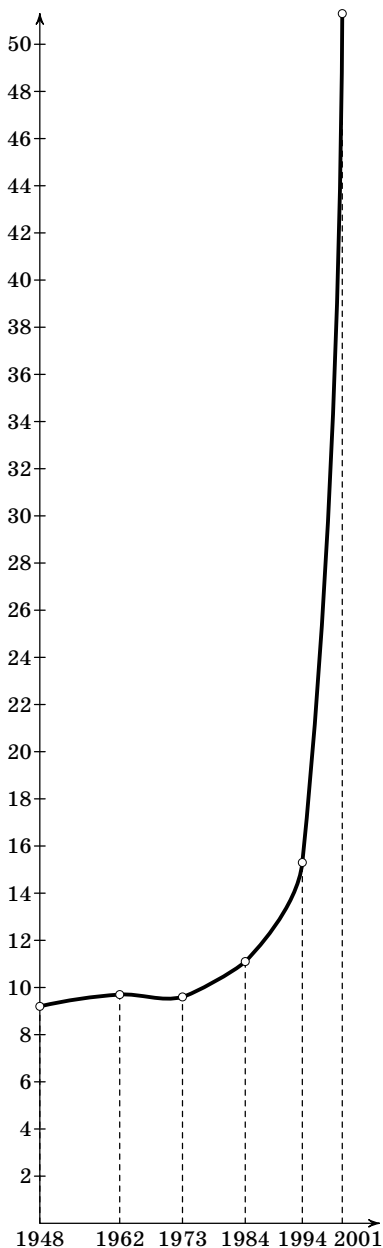


Рис. 23. Скорость дрейфа северного истинного магнитного полюса в 1948—2001 гг. (км/год).

станциях мира независимо. Другие наблюдались в 1901, 1913, 1925, 1978, 1991—1992 гг. Имеются свидетельства о том, что геомагнитный толчок имел место и около 1860 г. К сожалению, невозможно точно сказать, был ли переход северного магнитного полюса к ускоренному движению резким, но на графике скорости его дрейфа (рис. 23) хорошо видно, что если бы он действительно был именно таким, перелом бы пришёлся где-то на середину 1971 г. Это очень близко ко времени геомагнитного толчка 1969—1970 гг. Ларри Ньюитт считает, что последующие два толчка, возможно, связаны с дальнейшим ростом ускорения.

Тем не менее, всё, что проделывал северный магнитный полюс до 1990-х гг., можно смело назвать цветочками по сравнению с новым его ускорением, совершающимся сейчас, на стыке веков. Интересно, что около 1999 г. многими европейскими станциями зафиксированы признаки нового геомагнитного толчка, которые, похоже, обрели в последней трети XX столетия интригующее свойство — повторяться каждое десятилетие. Чтобы судить о его связи с новым ускорением северного магнитного полюса, нужно было всё-таки почаще следить за ним на месте. Обычай делать это раз в десять лет в свете новых событий явно устарел. Это вполне уяснил Ларри Ньюитт, ибо следующую экспедицию на место он готовится провести уже в 2003 г. Нынешняя скорость дрейфа этого полюса оценивается им сегодня в 40 км/год, и это явление, безусловно, требует внимательного изучения. Если он будет продолжать идти тем же курсом и теми же темпами, то к 2004 г. совсем покинет территорию Канады, затем пройдёт над Аляской и примерно через полвека окажется над Сибирью. Впрочем, Ньюитт предупреждает, что эти прогнозы могут и не оправдаться: очередной геомагнитный толчок может сбить эту скорость или направить бег полюса куда-нибудь ещё.

Из-за того, что северный магнитный полюс находится теперь в арктических водах, экспедиции учёных к нему должны совершаться в короткое весеннее окно. «Мы всегда выполняем подобную работу в мае, — рассказывает Ньюитт. — С одной стороны, нам необходим некоторый мороз, чтобы можно было посадить аэроплан где-то на льдине или на снегу. С другой — нужно, чтобы мороз был не очень сильным, иначе работать на открытом воздухе подолгу станет просто невозможно». Будем надеяться, что к весне 2003 г. появятся новые данные о реальной динамике дрейфа северного магнитного полюса.

Внимательный читатель, конечно же, заметил разницу в сделанной Ньюиттом оценке текущей скорости дрейфа северного магнитного полюса — 40 км/год, и формальной средней скорости из табл. 1 — более 50 км/год. Вот что говорит на этот счёт сам Ньюитт: «Никакой ошибки в вычислениях нет. Я сознательно сделал более консерва-

тивную оценку, принимая в расчёт 30-километровую неопределённость в определении положения полюса на месте. Я сделал это ещё и потому, что есть факты, свидетельствующие о том, что найденные нами координаты 1994 г. были несколько смещены на юг относительно истинного положения полюса в то время». В этом случае среднюю скорость на интервале 1984—1994 необходимо несколько увеличить, а на интервале 1994—2001 — уменьшить.

ЧТО БУДЕТ ДАЛЬШЕ!

Скорости обоих истинных магнитных полюсов в XX в. возросли. Вдобавок к этому на стыке XX и XXI вв. северный совершил новый рывок и теперь буквально «несётся на всех парах». Эксцентричный диполь Земли неуклонно удаляется от её центра со средней скоростью почти 3 км/год, и смещение это уже превзошло 500 км. Вместе с северным магнитным полюсом ощущаемое ускорение получили и геомагнитные полюса, которые до 1970 г. проходили не более 1—2 км в год, а сегодня за тот же срок убегают более чем на 5 км. Что их толкает?

За предшествующие 450 лет наклон эксцентричного диполя (табл. 3) по отношению к оси вращения планеты сперва увеличивался от 3°06' до 11°30', а теперь снова стремительно уменьшается — со скоростью около 2'24" в год. Эта скорость близка к максимальной скорости изменения угла его наклона за весь изученный по историческим записям период. Старая цифра из любого учебника 11°30' уже давно не соответствует действительности. Сегодня можно говорить о наклоне магнитного диполя Земли всего на 10°.

Хотя геомагнитные полюса и приближаются к географическим, истинные магнитные полюса не очень-то с ними и солидарны. Эта ситуация выглядит странно. Южный попросту уходит всё дальше и дальше в Индийский океан, а северный, хоть формально и набирает широту, но направляется явно мимо географического полюса (к западу от него). Если его ничто не остановит, то при теперешней скорости он уже через 20 лет «пролетит» стороной и пойдёт прямым курсом на Сибирь.

Ещё удивительнее ведёт себя общий дипольный момент планеты M : он монотонно убывает; всего за 450 лет напряжённость магнитного поля Земли уменьшилась уже почти на 20%. Именно это беспокоит учёных больше всего. Археомагнитные данные говорят о том, что убывание M продолжается уже около двух тысячелетий, причём в последние века его величина падает особенно интенсивно. Магнитные измерения за последние два столетия показывают, что с 1829 г. до 1960-х гг. динамика магнитного момента Земли довольно точно описывается линейным законом:

$$M = (8,27 - 0,004t) \cdot 10^{15} \text{ Тл} \cdot \text{м}^3,$$

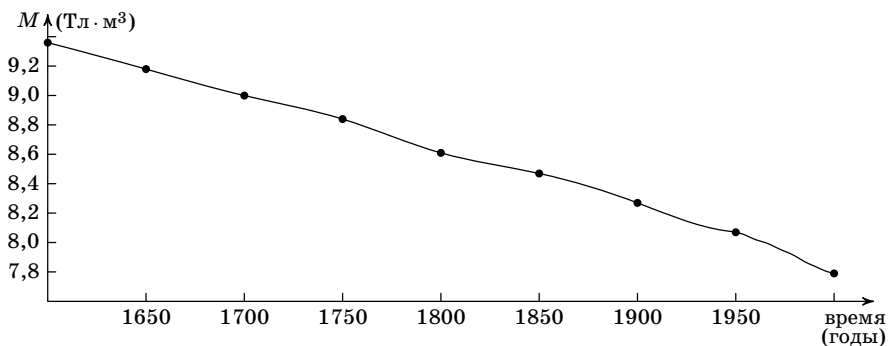


Рис. 24. Падение дипольного момента Земли за четыре столетия.

где t — это время в годах, отсчитываемое вперёд или назад от 1900 г. (рис. 24). Обратите внимание, такая динамика полностью обнуляет M всего за две тысячи лет. Приблизительно с 1970 г. ситуация ещё усугубилась. Коэффициент перед t возрос до 0,006, что сокращает срок обнуления M до каких-то 1200—1300 лет! Это уже не геологический, а реально обозримый исторический срок. Оценка просто ошеломляющая. Точные геомагнитные измерения со специализированных спутников за последнее десятилетие эту динамику полностью подтверждают. В этом заключается главная причина того, что всё чаще и чаще с уст учёных слетает слово «инверсия», которое пугает своей неизвестностью даже искушённых в науке о Земле людей. Мудрое правило гласит: хочешь знать будущее, изучай прошлое. Давайте оглянемся назад.

Геологи находят отпечатки магнитного поля Земли в самых разнообразных минералах и могут таким образом восстанавливать его историю за прошедшие миллионы лет. Палеомагнитные реконструкции, конечно же, описывают геомагнитное поле в древности очень грубо, не лучше, чем на уровне дипольного приближения, но и они позволили учёным установить удивительную вещь. Оказалось, что в истории Земли уже многократно происходили инверсии магнитного поля, т. е. полюса геомагнитного диполя менялись местами. За последние 5 млн. лет это происходило уже около 20 раз. Последняя такая инверсия случилась приблизительно 780 тыс. лет назад, и с тех пор уже достаточно долго магнитное поле Земли сохраняет свою нынешнюю полярность. Когда-то инверсия обязательно должна повторится снова. Возникает вопрос: когда?

За последние 100 млн. лет интервалы между инверсиями значительно варьировались: от десятков тысяч до миллионов лет. Какой-либо закономерности в их последовательности не видно, а продолжительность даже соседних периодов различной полярности может значительно отличаться. Длительные периоды време-

ни, в которые полярность магнитного поля планеты ориентирована преимущественно в какую-то одну сторону, геофизики называют эпохами, или хронами. К примеру, сейчас мы живём в эпоху прямой полярности Брюнеса, названную так в честь геофизика Бернарда Брюнеса, открывшего само явление инверсии геомагнитного поля. Она продолжается уже около 780 тыс. лет и, как хорошо видно на шкале геомагнитных инверсий (рис. 25), уже «откровенно затянулась». Предыдущая эпоха — эпоха обратной полярности — называется эпохой Матуямы, в честь другого пионера в области палеомагнетизма. За ней следует эпоха прямой полярности Гаусса, затем эпоха обратной полярности Гильберта и т. д. Внутри одной эпохи часто случаются относительно непродолжительные переполюсовки, называемые эпизодами, или субхронами. К примеру, в хроне Матуямы выделены три отчётливых эпизода: Харамильо, Олдувай и Реюньон.

В эпоху Брюнеса эпизодов полного обращения поля не обнаружено, зато геофизики хорошо знают, что за последние 780 тыс. лет магнитные полюса Земли временами совершали непродолжительные (тысячелетние) экскурсы в более южные широты. Конечно, в данном случае учёные говорят не об истинных магнитных полюсах, положение которых в прошлом неизвестно, а о геомагнитных. Причём в данном случае они прибавляют к их названию слово «виртуальные», подчёркивая этим, что реконструкция их в геологические эпохи производится только по палеомагнитным данным — магнитным склонениям и наклонениям, «застывшим» в минералах горных пород. Изучение этих минералов показало, что в эпоху Брюнеса виртуальные геомагнитные полюса совершили как минимум 14 экскурсов с отходом от полюсов вращения более чем на 45° . Иными словами, 14 раз геомагнитная ось значительно отклонялась от оси вращения планеты. В остальное время, судя по палеомагнитным данным, совпадение было очень хорошим. Усреднённое за несколько последних тысячелетий положение виртуальных геомагнитных полюсов тоже очень близко к географическим. Это наводит на мысль, что ситуация в последние

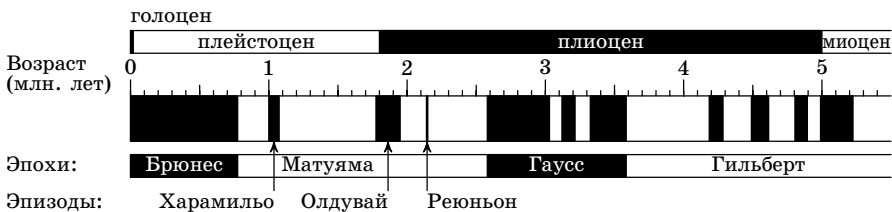


Рис. 25. Фрагмент шкалы инверсий магнитного поля Земли от нашего времени до окончания миоцена. Эта шкала была опубликована С. Канде и Д. Кентом в 1995 г. и используется сегодня большинством геофизиков мира, хотя постоянно уточняется.

столетия чем-то напоминает небольшой экскурс, который в наши дни стремительно завершается (угол наклона диполя Земли уменьшается); только вот смещение эксцентричного диполя да своеобразный характер истинных полюсов портят картину.

Интересные данные получили французские геофизики в 1993 г. в процессе палеомагнитного изучения кернов тихоокеанского дна, собранных по проекту глубоководного бурения. Оказалось, что смена полярности может оказаться гораздо менее хаотичным процессом, чем это считалось ранее. Остаточная напряжённость магнитного поля этих кернов, являющаяся отпечатком геомагнитного поля эпохи их образования, позволила увидеть определённую закономерность: сразу после переполюсовки магнитное поле Земли как бы перезаряжается до некоторого сравнительно высокого уровня, а затем на протяжении одного геомагнитного хрона постепенно убывает, хотя это убывание очень сильно маскируется колебаниями магнитного момента M на более коротких временных интервалах. Так продолжается до тех пор, пока уменьшающийся магнитный момент снова не открывает возможности новой инверсии.

Кроме того, французским учёным удалось обнаружить и так называемые ложные (или неудавшиеся) инверсии, во время которых всё происходит по тому же сценарию: геомагнитное поле ослабевает до некоторого уровня, затем следует настоящая перезарядка, во время которой общий магнитный момент планеты резко возрастает в несколько раз; только вот самой переполюсовки не происходит (рис. 26). Пример неудавшейся инверсии хорошо виден на графике: это случилось около 920 тыс. лет назад.

Получается, что сами по себе экскурсии явным образом не связаны с инверсиями — для последних необходимо именно ослабление поля до некоторого уровня. Говоря простым языком, во время инверсий поле не переворачивается, а как бы распадается; в течении нескольких тысячелетий происходит его перестройка, а затем достаточно быстро по геологическим меркам оно возрождается сразу с обратным направлением магнитного момента. Палеомагнитные данные также показывают, что к моменту инверсии происходит не полное исчезновение главного поля, а ослабление только его дипольной компоненты — квадрупольная, октупольная и другие недипольные составляющие, скорее всего, сохраняются. Получается, что в момент инверсии магнитное поле, хотя и очень слабое, всё же остаётся, только имеет очень сложную, недипольную природу с множеством вторичных полюсов. Такой сценарий безусловно несколько смягчает последствия для биосферы планеты, но нельзя забывать и о том, что помимо общей космической защиты, геомагнитное поле служит основой пространственной ориентации огромного числа живущих на Земле видов (перелёт птиц — это лишь самый известный пример). Кто знает, что будет с ними

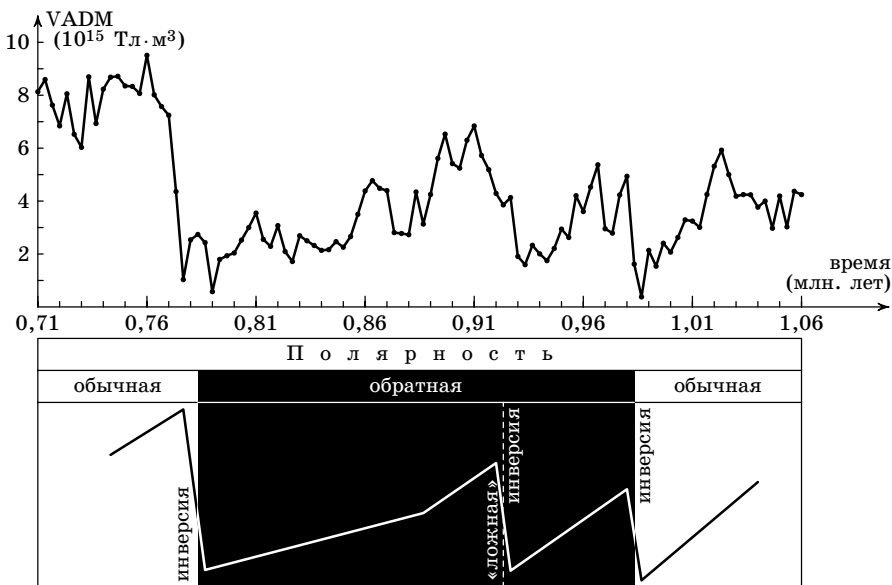


Рис. 26. Виртуальный осевой дипольный момент Земли (VADM).

в отсутствие дипольной компоненты поля? И как будет чувствовать себя человек в слабой и хаотичной перестраивающейся магнитосфере?

Интересно, что нынешнее убывание общего магнитного момента Земли носит именно такой характер — M убывает за счёт дипольного вклада. Это ещё один повод для размышления. А странное поведение истинных магнитных полюсов как раз является проявлением недипольной компоненты: если бы её не было вовсе, они, как легко понять, точно совпадали бы с геомагнитными.

Многие вышеизложенные факты часто приводят людей к кажущемуся очевидным выводу о том, что инверсия в ближайшие 1000—2000 лет неизбежна. В действительности это не так: вопрос гораздо сложнее. Мы ещё очень мало знаем о механизме поддержания магнитного поля Земли, можно сказать, почти ничего. Есть лишь гипотезы, не более. Венера — сестра Земли — во многом похожа на наш дом, однако полностью лишена своего магнитного поля. Почему? Точного ответа нет.

В результате мы не можем судить и о том, что лежит в основе магнитного пробуждения нашей планеты и что ожидает её в ближайшем будущем — даже при том, что неплохо научились отслеживать и фиксировать всё, что происходит (или происходило в прошлом) с её магнитным полем. Существование ложных инверсий —

это не главный фактор, мешающий сделать правильный прогноз. Ещё раз обратимся в прошлое. Как уже сказано, величина общего магнитного момента планеты убывает уже около двух тысяч лет. А что раньше? Оказывается, даже сегодняшний уровень поля ($M=7,8 \cdot 10^{15}$ Тл·м³) всё ещё остаётся гораздо выше, чем он был на протяжении большей части последних 50 тысячелетий. Кривая его динамики за последние 450 тыс. лет говорит о том, что около двух тысяч лет назад Земля просто прошла локальный максимум и теперь поле возвращается к своему среднему уровню. Почему так быстро — это другой вопрос, но всё же колебания похожей амплитуды были и в прошлом. Падение общего магнитного момента заканчивалось на некотором уровне и снова начинался рост.

Долгое время считалось, что усреднённый за последние 160 млн. лет магнитный момент планеты как раз близок к нынешнему, т. е. около $8 \cdot 10^{15}$ Тл·м³. Однако эта оценка не была подкреплена достаточным количеством измерений. Новые данные, полученные геофизиками к 1998 г. благодаря изучению новых образцов океанических базальтов, показали, что эту оценку нужно понизить до $(4,2 \pm 2,3) \cdot 10^{15}$ Тл·м³, т. е. почти до половины нынешнего. Эта величина близка к так называемому «мезозойскому дипольному минимуму» (среднее значение дипольного момента Земли в мезозое по палеомагнитным данным было ниже нынешнего). В свете новых данных вместо «мезозойского дипольного минимума» правильнее говорить о «современном дипольном максимуме». Получается, что поле в мезозое было просто средним, а величина M в эпоху Брюнеса колеблется существенно выше среднего значения. Этот факт говорит в пользу того, что сила магнитного поля Земли ещё намного превосходит необходимый для инверсии уровень.

Какие бы гипотезы ни строили сегодня ученые относительно поведения геомагнитного поля, очевидно одно — магнитное поле планеты пробудилось и проявляет какую-то активность. Вот только какую? Необычное поведение магнитных полюсов и резкое падение общей напряжённости поля — лишь её проявления. При этом не следует забывать, что наша Земля — лишь один из атомов в организме беспредельной Вселенной, взаимосвязь с которой может оказаться гораздо сложнее, чем представляется сегодня. Магнитосфера Земли погружена в гелиосферу — магнитную капсулу Солнечной системы, которая, в свою очередь, мчится в пространстве через неизведанные галактические магнитные поля. Думается, что понимание подобных взаимодействий позволит геофизике XXI века сделать качественный шаг вперёд.