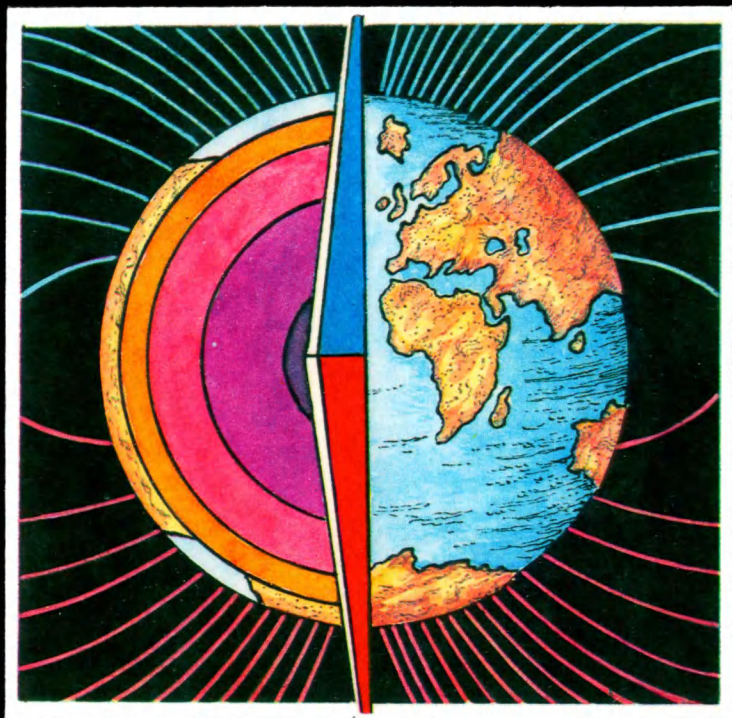
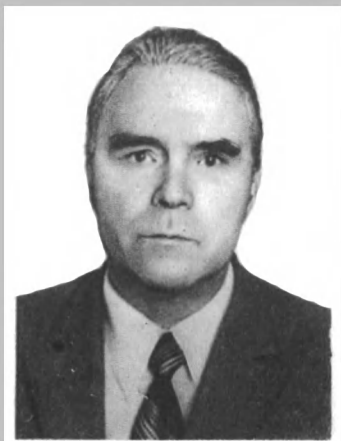


В. И. Почтарев
Б. З. Михлин

ученые
ДЭ
школьники

Тайна намагниченной Земли





**ВИКТОР ИВАНОВИЧ ПОЧТА-
РЕР** — доктор физико-матема-
тических наук, профессор. Ро-
дился в 1914 г. в Ленинграде.
Учился в ФЗУ, работал слесарем
на Ленинградском станко-
строительном заводе им. Я. М.
Свердлова. Затем поступил и
окончил Ленинградский госу-
дарственный университет. Уча-
ствовал в ряде экспедиций,
производя определения эле-
ментов магнитного поля Зем-
ли. Участник Великой Оте-
чественной войны.
С 1956 г. — директор Ленин-
градского отделения Института
земного магнетизма, ионосферы
и распределения радиоволн
АН СССР.

Награжден орденами Красной
Звезды, «Знак Почета», меда-
лями «За оборону Ленингра-
да», «За победу над Германией
в Великой Отечественной вой-
не 1941—1945 гг.», «За доблест-
ный труд в Великой Отечест-
венной войне 1941—1945 гг.».



**БЕРКА ЗУСЬЕВИЧ МИХ-
ЛИН** (1920—1985 гг.) — кан-
дидат технических наук, спе-
циалист в области геомаг-
нитных измерений и их ис-
пользования для решения науч-
ных и технических задач.
Б. З. Михлин окончил Ле-
нинградский горный институт
им. Г. В. Плеханова, был сотруд-
ником Центрального научно-
исследовательского института
при Ленинградском политех-
ническом институте им.
М. И. Калинина. Он — автор
8 книг и более 50 изобре-
тений.

**В. И. Почтарев
Б. З. Михлин**

Библиотечка
Детской
энциклопедии



Тайна намагниченной Земли

Редакционная
коллегия:

И. В. Петрянов

(главный редактор)

И. Л. Кнуляц

А. Л. Нарочницкий



Москва
«Педагогика» 1986

ББК 26.21
П65

Рецензенты:

доктор физико-математических наук
В. П. Головков,
доктор физико-математических наук
Г. В. Молочнов

Почтарев В. И., Михлин Б. З.

П65 Тайна намагниченной Земли. — М.: Педагогика, 1986. — 112 с., ил. — (Б-чка Детской энциклопедии «Ученые — школьнику»).

40 коп.

В книге рассказывается о современных исследованиях природы магнитного поля Земли. Читатели узнают о физической сущности земного магнетизма, его изменениях в пространстве и времени, что не только поможет школьникам в изучении физики, но и существенно расширит их представление о нашей планете.

Для старшеклассников.

П 4802020000-041 76-86
005(01)-86

ББК 26.21

© Издательство «Педагогика», 1986 г.

Много столетий естествоиспытатели стремятся понять, почему у земного шара есть магнитное поле, что представляют собой его могучие источники, как глубоко они запряты в недрах Земли. И для современных ученых это по-прежнему в значительной мере остается тайной. Между тем, разгадав ее, удалось бы не только решить важнейшую познавательную задачу, но и больше узнать об образовании и развитии нашей планеты, а также о возникновении и эволюции других планет Солнечной системы.

С давних времен земное магнитное поле интересовало самых выдающихся ученых. Оно поражало их воображение как уникальное явление природы, использование которого сулило большие возможности для решения ряда важных практических задач. Первостепенной из них была ориентация относительно стран света при далеких путешествиях, особенно при пасмурной погоде, когда не видно Солнца или звезд и направление движения нельзя определить по светилам. Тогда правильный путь мог указать лишь магнитный компас, удивительный по простоте навигационный инструмент. Он и открыл путь в океан.

«Магнитный компас — прибор маленький, но без него Америка не была бы открыта!» — говорят моряки, и это не такое уж большое преувеличение. Он создал эпоху в кораблевождении и ныне не потерял своего значения.

В конце XIX в. и особенно в XX в. геомагнитное поле широко изучалось как с целью его использования в навигации, так и для решения других важных задач — поиска месторождений железных руд и иных полезных ископаемых, изучения внутреннего

строения Земли, установления геологического возраста горных пород.

Изучению природы геомагнитного поля в настоящее время уделяется большое внимание. Ученые пытаются получить ответы на вопросы: когда и как родилось магнитное поле земного шара? Почему оно существует миллиарды лет? Как это поле будет изменяться в будущем? О достигнутых результатах мы и расскажем вам, касаясь главным образом геофизической стороны проблемы. Однако не меньший интерес представляют и пути познания, которые выбирали ученые, чтобы получить эти результаты.

Конечно, наука создается учеными всех рангов, но наибольший вклад в ее развитие принадлежит, бесспорно, самым выдающимся из них. Глубокое понимание значения знания для человечества, вдохновенное стремление к нему, постоянный титанический труд корифеев науки — яркие примеры для подражания. Поэтому мы расскажем вам о естественных испытателях, труды которых оставили заметный след в истории учения о земном магнетизме.

Проблемы природы магнитного поля Земли — это проблемы, относящиеся к фундаментальным знаниям, а они — существо науки.

«Мне представляется, что, овладевая фундаментальными знаниями, специалист поднимается на высочайшую ступень понимания предмета, откуда уже открываются магистрали науки, ее самые оживленные перекрестки, открываются горизонты будущих открытий» — так точно и образно сказал академик Рем Викторович Хохлов, обращаясь к молодежи.

Хочется надеяться, что наша книга поможет тем, кто решил посвятить себя науке, сделать первый — пусть пока очень небольшой шаг в овладении фундаментальными понятиями и законами естествознания, относящимися к геомагнетизму.

Многовековая школа земного магнетизма

Удивительная история магнитной стрелки. «...Идут караваны по бескрайним пескам пустыни Гоби. Солнце скрыто желтой пеленой пыли. Далеко от берегов Янцзы до кушанских царств, и нет к ним видимых хоженных троп. Трудно, ох как трудно пришлось бы караванщикам, если бы они не захватили с собой белый глиняный горшок, который они берегут пуще всех своих дорогих грузов, хотя нет в нем ни золота, ни жемчуга, ни слоновой кости. В сосуде на деревянном поплавке лежит коричневый камень, «любящий железо». Он, поворачиваясь, все время указывает путникам сторону юга, а это, когда закрыто Солнце или не видно звезд, спасает их от многих бед, выводя к колодцам и направляя по верному пути».

Вот такая запись была сделана в одной китайской летописи почти 4 тыс. лет тому назад. Оказывается, уже тогда в Китае была известна способность естественного магнита устанавливаться одним концом на юг, а противоположным — на север, и эта способность «особого камня» использовалась путешественниками для ориентации на суше по странам света.

В древних летописях Китая имеются сведения о том, что 300—400 лет до н. э. магнитный компас использовался также и на кораблях, совершавших далекие плавания.

В энциклопедии, составленной китайскими учеными во II в., есть такое определение естественного магнита: «Магнит — это камень, который дает направление железной игле», т. е. может намагничивать иглу так, что она приобретает свойство устанавливаться по направлению магнитного меридиана.

Итак, уже в начале нашей эры китайские ученые нашли способ создавать искусственные магниты. Только через тысячу лет намагниченная игла будет применяться в компасах европейцами. Об этом сообщает в своем трактате, написанном в 1187 г., английский монах Александр Некэм. Он пишет: «В пасмурные дни или в темные ночи, когда не видно небесных светил, моряки намагничивают железную иглу, продевают ее сквозь соломинку, плавающую на воде, и таким образом определяют, где север».

В 1269 г. французский ученый и фортификатор Пьер де Мерикур, по прозвищу Перегрин, написал обстоятельный трактат о магнитах. Это был первый в Европе труд по магнетизму. Его мог написать только высокообразованный и одаренный ученый. Таким и был Перегрин. Известный философ того времени Роджер Бэкон в своих сочинениях не раз восторженно отзывался о нем как об ученом, «который знает все законы природы, умеет добывать минералы из руд и строить военные сооружения».

Перегрин подробно излагает в трактате свойства магнитного камня, дает указания, как находить у него полюсы и как намагничивать с его помощью железную иглу. Он приводит конструкции двух магнитных компасов. Один из них содержит плавающий магнит, а второй — «сухую» намагниченную систему, вращающуюся вместе с вертикальной осью. Примечательная особенность второго компаса — шкала, имеющая 360 делений, и специальная линейка, с помощью которой можно измерять азимуты светил.

В отличие от древних китайских естествоиспытателей, считавших, что стрелка магнитного компаса всегда притягивается к Полярной звезде, французский ученый полагал, что она «на самом деле поворачивается к полюсу». А это значит, что Перегрин пришел к исключительно важному выводу:



Компас Перегрина:

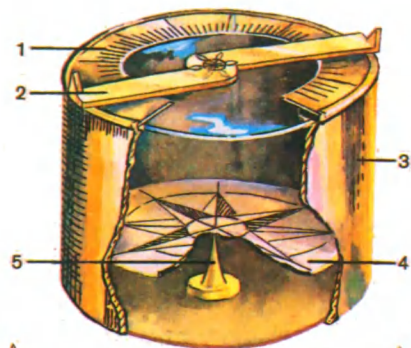
- 1 — шкала,
- 2 — линейка,
- 3 — корпус,
- 4 — картушка,
- 5 — шпилька.

земной магнетизм — причина поворота стрелки магнитного указателя направления! Не менее значительно и другое его утверждение: «Полюсы магнитных камней получают силу от полюсов мира», т. е. от магнитных полюсов Земли.

По-видимому, мысль о том, что Земля сама создает силу, действующую на стрелку магнитного компаса, высказана впервые Перегрином. И приходится только удивляться его прозорливости, так как другие ученые пришли к ней через несколько столетий.

Конструкции магнитных компасов, изобретенных Перегрином, не были применены в его время. Это можно объяснить тем, что трактат ученого был опубликован лишь 300 лет спустя.

В начале XIV в. конструкция магнитного компаса была значительно усовершенствована, и заслуга в этом приписывается итальянцу Флавио Жиойя. Вот как, по рассказам его соотечественников, это произошло.



Компас Флавио Жиойя:

- 1 — шкала,
- 2 — линейка,
- 3 — указывающая стрелка,
- 4 — намагниченная игла,
- 5 — ось.



...Давным-давно, еще в те далекие времена, когда город Амальфи стоял на берегу моря, жил в нем молодой моряк по имени Флавио Жиойя. Всегда жизнерадостный и словоохотливый, он стал грустным и молчаливым, получив отказ синьора Доминико выдать за него замуж свою единственную дочь, голубоглазую красавицу Анжелику. Всем был хорош юный Флавио, но не мог дать отец согласия на его брак со своей любимицей. На это была веская причина. Однажды капитан Доминико сбился с курса в густом тумане, и его корабль разбился о скалы. Чудом спасся капитан, один из всей команды. Вступив на берег, он поклялся, что его дочь будет принадлежать только тому, кто придумает прибор, который позволит безошибочно находить верный путь в море, когда полностью скрыто Солнце или не видно на небе звезд. Долго думал юноша над этой, казалось, неразрешимой задачей и наконец нашел способ, как построить такой прибор. В награду он получил свою любимую, а судоводители — надежный и точный магнитный компас.

Эта трогательная легенда не была беспочвенной

Картушка компаса
XIV в.



выдумкой наделенных ярким воображением итальянских моряков, а возникла в связи с достоверными сведениями о том, что еще шесть столетий тому назад искусный ювелирный мастер Флавио Жиойя усовершенствовал компас и сделал его чувствительным навигационным прибором. Предполагается, что именно он скрепил магнитную стрелку с бумажным кругом (картушкой) и по краю этого круга нанес градусные деления, а к центру его провел лучи, соответствующие 32 направлениям — румбам, для более удобного наблюдения за показаниями прибора при определении направления ветра. Это для парусного флота было первейшей необходимостью. На картушке мастер нанес также рисунок, получивший поэтическое название «роза ветров». Изображение картушки компаса с такой «розой» с тех пор и стало выразительной эмблемой всего, что связано с далекими путешествиями.

Благодарные соотечественники в 1902 г. поставили в честь Жиойя и, конечно, в честь одного из величайших изобретений прошлых столетий памятный обелиск.

Можно безоговорочно присоединиться к высокой

оценке, которую дали таким способом магнитному компасу итальянцы, но нет оснований считать Жиойя единоличным создателем этого прибора.

Прошли многие сотни лет, в течение которых безвестные талантливейшие мастера вводили все новые и новые детали в примитивный вначале «указатель севера» и подготовили почву для создания, правда еще далеко не совершенного, но все же вполне пригодного для кораблей, указателя курса.

Разумеется, что это было только этапом в совершенствовании компаса. Через несколько столетий он будет улучшен настолько, что сможет улавливать даже весьма небольшие изменения направления движения корабля и показывать его курс с высокой точностью. Это потребует усилий многих поколений ученых и искусных компасных мастеров.

Гениальная догадка лейб-медика. Придворный лекарь английской королевы Уильям Гильберт не только пользовался славой глубоко знающего свое дело врача, но был едва ли не самым выдающимся естествоиспытателем своего времени. Ученый затратил 18 лет жизни и почти все свое состояние на опыты по исследованию загадочных явлений магнетизма и сделал при этом немало открытий, прославивших его имя.

Результаты проведенных им многочисленных опытов с намагниченными телами он изложил в труде, напечатанном в лондонской типографии в 1600 г. В шести книгах своего сочинения он подробно рассказал о взаимодействии магнитных камней друг с другом и с железными предметами, об ориентации по меридиану намагниченных стальных пластинок и иголок, о поведении магнитов при их нагревании и о других проявлениях магнитных сил. Эти исследования столь обширны и многообразны, что у со-

временников были все основания назвать Гильберта «отцом науки о магнитах».

Значительны в сочинении Гильберта сведения о земном магнетизме. Он описывает опыты по изучению магнитных сил вокруг железного шара, который намагнитил с помощью самого большого магнитного камня в Англии (Гильберт купил его за баснословную сумму). Определив на поверхности шара направление магнитных сил, он убедился, что в двух его точках эта сила направлена по радиусу шара, а по линии его поверхности, одинаково удаленной от указанных двух точек, магнитная сила направлена по касательной к шаровой поверхности.

«Но так же, как показывает компасная стрелка, направлены магнитные силы и на Земле», — решил Гильберт, и это навело его на мысль, что намагниченный шар — уменьшенная в десятки миллионов раз копия намагниченной Земли. Следствием этой гениальной догадки ученого было важнейшее для науки заключение: причина земного магнетизма внутри нашей планеты, а Земля — огромный магнит. Вот почему шестую книгу своего сочинения Гильберт озаглавил «О великом магните — Земле», четко определив суть своего открытия.

Значение изданной Гильбертом книги не только в ее научном содержании, но и в том, что это была первая книга, на титульном листе которой появилось имя автора. Этим Гильберт подчеркивал высокое достоинство ученого, право на уважение к его труду. Это была также первая книга без посвящения ее какому-либо высокопоставленному лицу, как это всегда делалось прежде. Издав книгу без всякого посвящения, выдающийся ученый бросил вызов несправедливому обществу и утверждал авторитет науки и ее творцов. Труд первого английского магнитолога был высоко оценен учеными его времени.

Галилео Галилей, прочитав его книгу, счел необ-





ходимым привести из нее сведения о магнитах в своем знаменитом сочинении «Диалог о двух главнейших системах мира». Великий итальянский физик был восхищен произведением своего коллеги: «Воздаю хвалу, дивлюсь, завидую Гильберту. Он развил достойные удивления идеи о предмете, о котором трактовало столько гениальных людей, но который ни одним из них не был изучен внимательно».

Говоря о большом вкладе Уильяма Гильберта в развитие науки о магнетизме, нельзя не отметить встречающиеся в его книге мистические рассуждения и наивные выводы. Несостоятельны, например, попытки Гильберта объяснить природу магнетизма. Они носят схоластический характер и сводятся в основном к тому, что у магнитов есть «душа». Конечно, «заблуждения» Гильберта могут найти свое объяснение в том, что он творил во времена мрачного средневековья, когда в европейских городах еще сжигали сотни «ведьм» и «колдунов». Джордано Бруно был сожжен на костре инквизиции за то, что отстаивал систему мироздания Коперника.

Нужно отметить еще одну очень важную, имевшую большое значение для развития естествознания заслугу Гильберта перед наукой: он до Френсиса Бэкона — философа, провозгласившего опыт первым критерием истины, писал о значении опытных исследований, а главное — с помощью экспериментов проверял выдвигаемые им теоретические соображения. «Гильберт будет жить, пока магнит будет притягивать». Как не присоединиться к этим справедливым словам английского поэта Джона Дрейдена?

Российские академики изучают магнетизм Земли.

В 1724 г. Петр I подписал указ об учреждении Петербургской Академии наук, и уже на первом ее

заседании земной магнетизм был отнесен к разряду важнейших наук. Многие из членов Академии наук в дальнейшем с особым усердием и интересом изучали магнитное поле Земли, и среди них такие знаменитые, как Эйлер и Ломоносов.

Леонард Эйлер — один из самых блестящих ученых всех времен и народов, творчество которого удивляло современников и по сей день вызывает восхищение своей глубиной, многосторонностью и законченностью полученных результатов. Он оставил огромное количество трудов в самых различных разделах математики, физики, астрономии. Благодаря работам Эйлера родились или получили развитие целые направления прикладных наук — картография, навигация, кораблестроение, строительная механика и многие другие инженерные дисциплины.

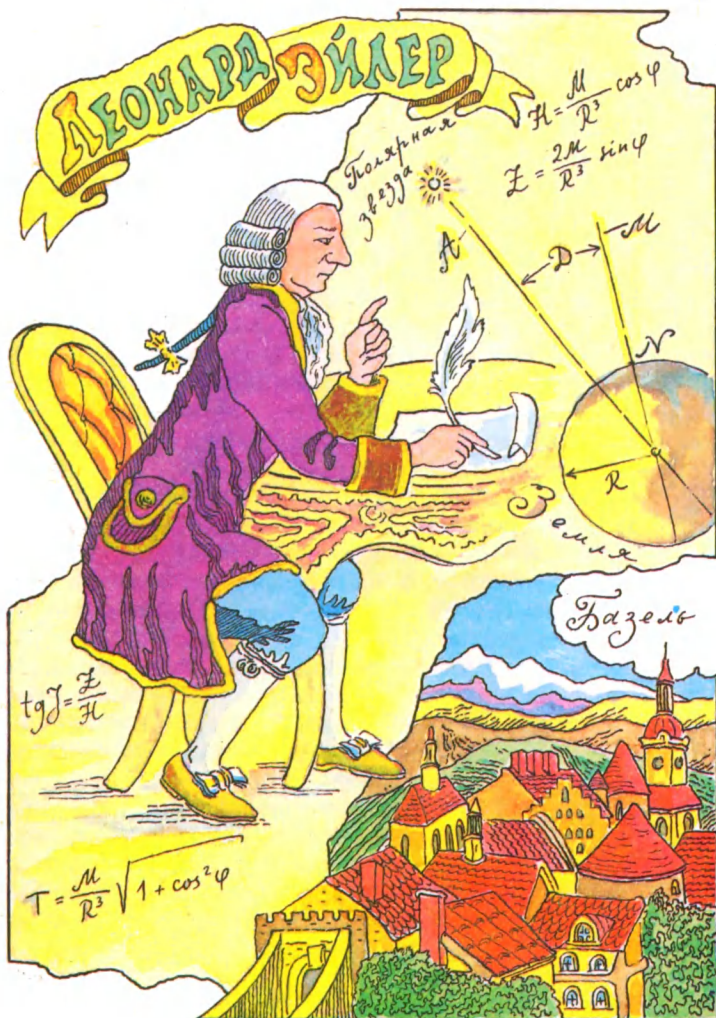
В 13 лет он стал студентом Базельского университета и готовился принять сан священника. Но на его исключительные способности обратил внимание Иоганн Бернулли — профессор университета, математические способности которого очень высоко ценились в Европе, и Эйлер стал под его руководством заниматься точными науками. В 19 лет он получил почетный отзыв Парижской академии наук за представленную им на конкурс работу о наилучшем размещении мачт на кораблях. Эту важную для парусного флота задачу не могли решить в то время и именитые ученые Европы.

В 1727 г., когда Эйлеру исполнилось 20 лет, его пригласили в Петербургскую Академию наук. Здесь он работал в общей сложности 32 года и за это время выполнил исследования первостепенного значения.

Эйлер был фанатично предан науке и даже после почти полной потери зрения продолжал свои научные изыскания.

Не может не поражать работоспособность великого ученого. За время своей научной деятельности

ЛЕОНАРД ЭЙЛЕР





Уравнение Эйлера:

$$\sum_{k=0}^n a_k x^k y^{(k)} = f(x);$$

Формулы Эйлера:

в) $e^{ix} = \cos x + i \sin x;$

с) $\frac{\sin x}{x} = \prod_{n=1}^{\infty} \left(1 - \frac{x^2}{\pi^2 n^2}\right).$

а) $\frac{1}{R} = \frac{\cos^2 \varphi}{R_1^2} + \frac{\sin^2 \varphi}{R_2^2};$

Интеграл Эйлера (Гамма-функция):

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^{\infty} x^{\alpha-1} e^{-x} dx;$$

Числа Эйлера:

$$\frac{1}{\text{cht}} = \sum_{n=0}^{\infty} E_n \frac{t^n}{n!}.$$

Способ устранения хроматической аберрации



по Эйлеру



им написаны сотни книг и статей. Собрание его сочинений составляет 72 объемистых тома.

Эйлер был одним из первых, кто с помощью математических формул стремился строго рассчитать распределение магнитного поля вокруг Земли. Он вывел формулы, которые позволили определить, где находятся магнитные полюсы, а затем и вычислить значение магнитного поля в любой точке поверхности земного шара. Оказалось, что эти формулы не дают возможности вычислить с необходимой точностью геомагнитное поле. Тем не менее заслуга Эйлера в теории магнитного поля Земли велика, так как он показал принципиальную возможность расчета магнитного поля Земли.

Первый русский академик Михаил Васильевич Ломоносов был замечательным ученым-энциклопедистом. Он успешно занимался многими науками. Его интересовали физика и астрономия, химия и геология, минералогия и кристаллография, а также многие другие области естественных наук. Велик его вклад также в литературу и грамматику, философию и историю. Он был одним из лучших поэтов своего времени, а его мозаичные картины и сегодня производят большое впечатление.

Значение Ломоносова для развития России огромно. И не только потому, что он — крупнейший ученый своего времени, но и потому, что он был большим патриотом своего Отечества. А. С. Пушкин писал: «Ломоносов был великий человек. Между Петром I и Екатериной II он один является самобытным сподвижником просвещения. Он создал первый университет. Он, лучше сказать, сам был первым нашим университетом».

Всю свою жизнь Ломоносов стремился к знаниям и, несмотря на невзгоды, не бросал занятия наукой, отдавал ей все силы.

Еще юношей он отправился в Москву учиться

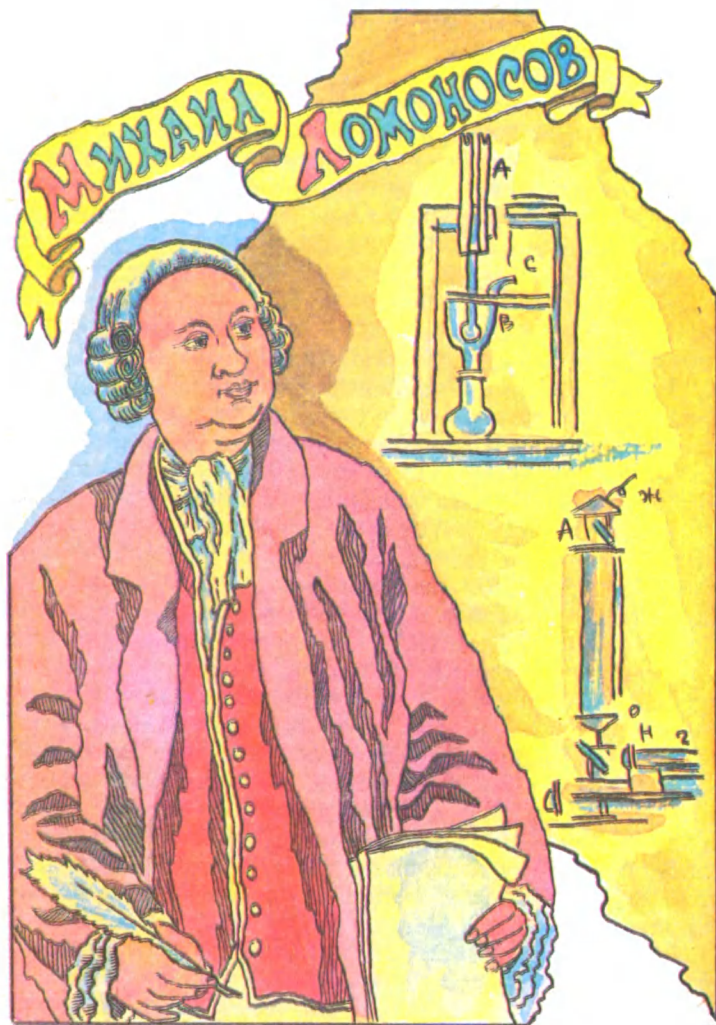
вопреки желанию отца и, лишенный его поддержки, почти постоянно голодал, но продолжал свое образование. Нелегко ему было материально и за границей, куда его направили продолжать образование. И даже позже, начав работать в академии, он не был обеспечен самым необходимым для жизни. Вот что он писал в ее канцелярию в 1743 г., всего за два года до избрания его академиком: «Нахожусь болен, и при этом не токмо лекарство, но и дневной пищи себе купить на что не имею, и денег займы достать не могу». Но и став академиком, Ломоносов постоянно нуждался в деньгах, так как тратил большую часть своего жалованья на проведение опытов.

Результаты трудов Ломоносова получили высокую оценку крупнейших ученых. Так, Леонард Эйлер отмечал его «счастливое умение расширять пределы истинного познания природы...» и подчеркивал, что «ныне такие гении весьма редки...»

Размышляя о магнетизме, Ломоносов пришел к выводу, что это самый сложный раздел физики, и поэтому призывал всех ученых очень скрупулезно изучать все проявления магнетизма Земли. Он писал по этому поводу: «Из наблюдений устанавливать теорию, через теорию исправлять наблюдения есть лутчей всего способ к изысканию правды. По сему поче всего в магнитной теории, тончайшей из всех материй, что ни есть в физике, поступать должно».

Землю он считал магнитом, но в отличие от мнения Гильберта не везде одинаково намагниченным, а составленным из множества магнитов, имеющих различную силу и незакономерно ориентированных, поэтому он полагал, «что без многих и верных наблюдений каждого места общая картина о переменях магнитной силы утверждена быть не может».

М. В. Ломоносов занимался и усовершенствованием магнитного компаса. Он советовал увеличить диаметр шкалы компаса, чтобы рулевой мог лучше





следить за направлением движения корабля и более точно управлять им. Ученый предложил новый прибор компас-самописец, который мог бы регистрировать все отклонения корабля от заданного курса с целью повысить «точность морского пути».

Как в Петербургской Академии наук, так и вне ее ученые России и после Ломоносова продолжали систематическое изучение магнитного поля Земли.

В 1835 г. профессор Казанского университета Иван Михайлович Симонов опубликовал свой труд «Математическая теория земного магнетизма», в котором строго доказал, что геомагнитное поле в общих чертах подобно полю особого магнита, расположенного в центре Земли. Расстояние между полюсами такого магнита считается бесконечно малым, и поэтому он получил специальное наименование — магнитный диполь, а его поле названо дипольным. Симонов показал, что магнитное поле диполя совпадает вне земного шара и на его поверхности с полем однородного его намагничивания, т. е. с суммарным магнитным полем одинаково намагниченных частиц, занимающих весь объем Земли.

И. М. Симонов занялся геомагнитными исследованиями после того, как вернулся из кругосветного путешествия, которое было предпринято Фаддеем Фаддеевичем Беллинсгаузеном и Михаилом Петровичем Лазаревым — командирами шлюпов «Восток» и «Мирный». В этом путешествии была открыта Антарктида, и астроном экспедиции Симонов определял координаты ее побережья. Кроме того, он проводил и магнитные измерения, которые затем были им использованы при решении задач о представлении магнитного поля Земли.

Сменив своего друга — гениального создателя неевклидовой геометрии Николая Ивановича Лобачевского после его кончины на посту ректора Казанского университета, Симонов продолжал заниматься

изучением магнитного поля Земли и в дальнейшем опубликовал ряд работ по геомагнетизму.

Король математиков и магнитологов. Среди признанных ученых мира, творчество которых достигло расцвета в первой половине прошлого столетия, одной из самых ярких фигур был Карл Фридрих Гаусс.

Рано начав свою научную деятельность, он вскоре достиг больших успехов во многих разделах математики и по праву получил имя «короля математиков». Но не меньших успехов он добился и в астрономии.

В 24 года Гаусс нашел удивительно простой, но тем не менее точный способ вычисления орбиты планеты по измерениям ее положения на небосводе всего лишь в нескольких точках. И когда астрономы «потеряли» обнаруженную ими ранее малую планету Церера, он применил этот способ для вычисления ее орбиты.

Сразу же известный немецкий астроном Генрих Ольберс, направив телескоп в точку, вычисленную молодым исследователем, обнаружил, казалось, «навечно утраченную» планету. Это была сенсация, которая утвердила Гаусса в числе самых видных европейских астрономов.

Надо сказать, что достигнуть такого результата помогли ему не только редкие способности находить оригинальные решения труднейших задач, но совершенно исключительное дарование вычислителя.

Всю свою жизнь Гаусс не прерывал занятия астрономией и немало нового внес в древнюю звездную науку. Что касается его исследований магнитного поля Земли, то здесь Гаусс выполнил классические работы, которые, собственно, и создали земной магнетизм как науку.

В 1832 г. он пишет сочинение под названием «Напряженность земной магнитной силы, приведенной



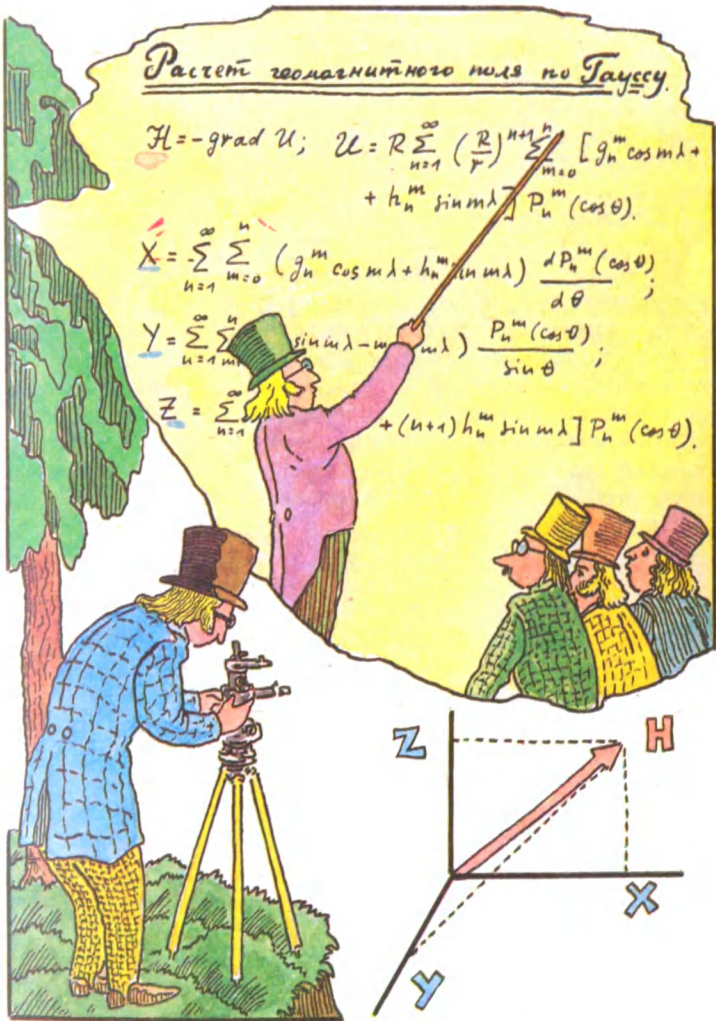
Расчет геомагнитного поля по Гауссу

$$\mathbf{H} = -\text{grad } U; \quad U = R \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{R}{r}\right)^{n+1} \sum_{m=0}^n [g_n^m \cos m\lambda + h_n^m \sin m\lambda] P_n^m(\cos \theta).$$

$$X = -\sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n (g_n^m \cos m\lambda + h_n^m \sin m\lambda) \frac{dP_n^m(\cos \theta)}{d\theta};$$

$$Y = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^n (\sin m\lambda - m h_n^{m-1} \cos m\lambda) \frac{P_n^m(\cos \theta)}{\sin \theta};$$

$$Z = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n [(n+1)g_n^m \sin m\lambda + (n+1)h_n^m \cos m\lambda] P_n^m(\cos \theta).$$



к абсолютной мере». В нем Гаусс разработал доведенный до совершенства метод измерений силы магнетизма Земли. Это было далеко не просто. Только такой разносторонний ученый, как Гаусс, обладающий талантом экспериментатора, мог предложить такой точный и удобный метод магнитных измерений.

Работая над этим методом, он создает новую науку — метрологию, без которой сейчас немыслимо выполнение каких-либо исследовательских или производственных работ. В этой науке определяющую роль играет понятие системы физических единиц. Гаусс не только первым ввел это понятие в арсенал метрологической науки, но и показал, что для физических измерений достаточно принять систему из трех независимых друг от друга единиц, а именно: длины, массы и времени. Такую систему он назвал абсолютной, что отражено в названии упомянутого Гауссова сочинения.

Через 7 лет был издан другой его труд — «Общая теория земного магнетизма». Он имел большое значение для науки и практики геомагнетизма. Гаусс излагал найденный им метод расчета магнитного поля Земли в любой точке ее поверхности или на любом удалении от нее. Он доказал, что почти точное описание геомагнитного поля как на поверхности земного шара, так и над ней можно получить, имея данные об этом поле лишь в небольшом числе точек только на самой поверхности Земли. Гаусс дал формулу, позволяющую производить определение всех элементов земного магнетизма в любой точке пространства вне Земли и на ее поверхности. Она нашла самое широкое применение для решения как теоретических, так и практических задач геомагнетизма и уже почти 150 лет является важнейшим «инструментом» геофизиков.

Говоря о вкладе Гаусса в науку о магнетизме

Земли, нельзя не упомянуть о его стремлении привлечь ученых всего мира к изучению этого явления. Можно сказать, что Гаусс был для них не только «королем математиков», но и в не меньшей степени «королем магнитологов». Неоднократно по его инициативе происходили встречи русских, французских и немецких физиков и физиков других стран для обсуждения вопросов единообразия магнитных измерений на всей поверхности Земли, организации одновременных измерений колебаний геомагнитного поля и многих других подобных вопросов. Это были по сути первые съезды ученых-магнитологов, положившие начало широко развившемуся впоследствии международному сотрудничеству.

Магнитное поле Земли

Элементы земного магнетизма. В практике было замечено, что стрелка магнитного компаса не всегда устанавливается точно по направлению Полярной звезды. Первое время это объясняли ошибками самого прибора. Но со временем стало ясно, что дело не в компасе, а само магнитное поле не всегда ориентировано строго на север. Оно направлено под некоторым углом к географическому меридиану, т. е., как стали говорить позднее, может иметь склонение.

Христофор Колумб, ведя свои каравеллы к еще неизвестным американским берегам, впервые установил, что магнитное склонение не остается постоянным, а изменяется от места к месту.

Это открытие, сыгравшее исключительную роль в развитии науки о земном магнетизме, едва не стоило жизни самому прославленному адмиралу.

Вот что произошло в течение нескольких недель сентября и октября 1492 г. после того, как моряки

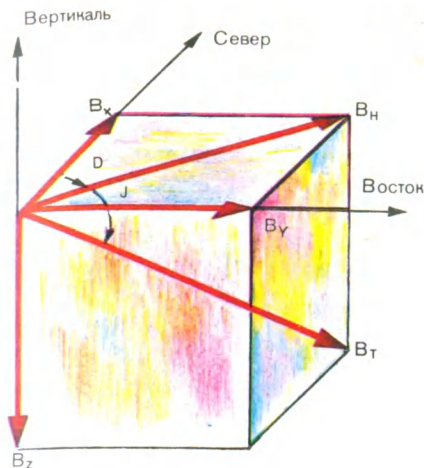
испанской экспедиции, потеряв целый месяц на ремонт одной из своих каравелл, покинули гавань на Канарских островах.

...Попутный ветер гнал корабли Колумба «Санта-Мария», «Пинта» и «Нинья» с неожиданно большой скоростью на запад. А в их экипажах, где было много случайно набранных и даже бежавших из тюрем людей, зрел бунт. И в это тревожное время они узнают: путеводная стрелка по неведомой никому причине намного отклонилась от направления на Полярную звезду, а она (так думали моряки) и существует, чтобы всегда притягивать к себе намагниченную стрелку. Такого отклонения от северного направления еще никогда не случалось с компасом, и суеверные матросы увидели в этом предзнаменование неминуемой гибели.

Через неделю плавания отклонение компасной стрелки достигло невиданной величины — больше румба! Страх охватил матросов. «Сам бог проклял Колумба», — посчитали они и потребовали повернуть корабли на восток. Но Колумб проявил удивительное самообладание и находчивость: он убедил команду, что Северная звезда ушла от обычно занимаемой ею точки на небосводе. Это несколько успокоило матросов. Но через две недели «узаконенное» склонение исчезло, что снова взбудоражило команду. Спасая свою жизнь и заветную мечту — найти новый путь в Индию, Колумб пообещал привести корабли к цели через трое суток. Интуиция не обманула великого мореплавателя. Не прошло и суток, как раздался ликующий возглас «Земля!».

Склонению магнитного поля Земли после открытия Колумба стали уделять большое внимание, так как достоверные сведения об этом угле определяли в значительной мере точность навигации кораблей.

Ученый-механик Георг Гартман из Нюрнберга изготовил длинную магнитную стрелку и установил



Элементы
земного
магнетизма.

ее на шпильку — острое, на котором она должна была вращаться. Стрелка заняла строго горизонтальное положение. Но как только мастер ее намагнитил, она сразу же наклонилась вниз северным концом. Не поверив сначала увиденному, он изготовил еще несколько стрелок, и что же? Все повторилось. Почему это происходит, он объяснить не мог. Впоследствии выяснилось, что замеченный Гартманом факт означал открытие наклонения магнитного поля Земли, т. е. неизбежный поворот вектора его индукции относительно горизонтальной плоскости на различных широтах.

В последующее столетие наряду со склонением в ряде случаев измерялось и наклонение геомагнитного поля. С 1785 г., когда выдающийся французский ученый Шарль Кулон предложил метод определения силы магнитного поля Земли, стали измерять и составляющие этого поля.

На рисунке показан вектор индукции магнит-

ного поля Земли \mathbf{B}_T и его проекции B_x, B_y, B_z ; B_x — проекция вектора \mathbf{B}_T на ось x , направленную на север; B_y — проекция этого вектора на ось y , направленную на восток; B_z — проекция его на ось z , направленную по вертикали вниз. Здесь же указана проекция B_H вектора \mathbf{B}_T на горизонтальную плоскость, в которой лежат оси x и y . Плоскость, определяемая векторами \mathbf{B}_T и \mathbf{B}_H , называется плоскостью магнитного меридиана. В плоскости географического меридиана лежат, очевидно, оси x и z , поэтому склонение D — это угол между плоскостями географического и магнитного меридианов. Наклонение не что иное, как угол между вектором \mathbf{B}_T и горизонтальной плоскостью.

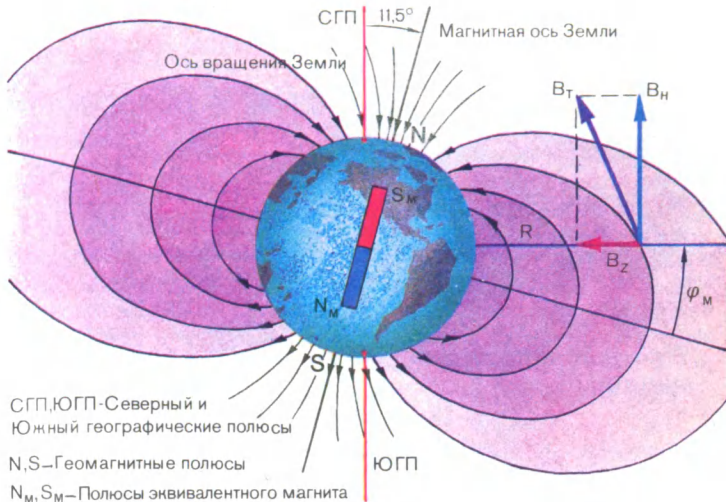
Склонение D , наклонение I , горизонтальная составляющая B_H , северная — B_x , восточная — B_y , вертикальная — B_z носят название элементов земного магнетизма.

Достаточной силы магнит-диполь, помещенный в центре Земли, создает на ее поверхности магнитное поле, которое сравнительно хорошо совпадает с наблюдаемым геомагнитным полем. Однако на основе формулы Гаусса было показано, что более точно это поле воспроизводится, если такой магнит повернуть на угол $11,5^\circ$ относительно оси вращения нашей планеты, а еще более точно при смещении его на 450 км в сторону Тихого океана.

Любопытно, что если бы мы хотели воссоздать магнитное поле Земли с помощью рукотворного магнита даже из самых лучших в магнитном отношении современных марок стали, то и тогда такой магнит имел бы внушительные размеры — около 2000 км в длину и 250 км в диаметре.

Точки пересечения поверхности земного шара с осью упомянутого выше смещенного относительно земного центра магнита-диполя названы геомагнитными полюсами. В северном полушарии расположен

Силовые линии
однородно
намагниченного
земного шара.



Северный геомагнитный полюс, а в южном — Южный геомагнитный полюс, хотя расположение полюсов указанного магнита в этих полушариях противоположно.

Координаты геомагнитных полюсов не совпадают с координатами географических полюсов земного шара, и соответственно геомагнитный экватор — линия на поверхности Земли, для всех точек которой наклонение дипольного поля равно нулю, — не совпадает с географическим экватором.

На рисунке (на с. 31) показан ход магнитных силовых линий вокруг земного шара, а также положение

ние векторов B_I индукции геомагнитного поля и его проекций в точке, находящейся на расстоянии R от центра Земли.

Проекции B_Z и B_H индукции дипольного поля, или поля однородного намагничивания Земли, можно найти с помощью простых формул:

$$B_Z = \mu_0 \frac{M}{2\pi R^3} \sin \varphi_m; \quad B_H = \mu_0 \frac{M}{4\pi R^3} \cos \varphi_m,$$

где μ_0 — магнитная постоянная, M — магнитный момент земного шара, φ_m — геомагнитная широта, отсчитываемая от геомагнитного экватора.

Из приведенных двух формул легко найти модуль вектора индукции поля однородного намагничивания земного шара:

$$B_T = \sqrt{B_Z^2 + B_H^2} = \mu_0 \frac{M}{4\pi R^3} \sqrt{1 + 3 \sin^2 \varphi_m}$$

Связь наклона I рассматриваемого поля с геомагнитной широтой φ_m легко найти из отношения проекции B_Z и B_H :

$$B_Z/B_H = \operatorname{tg} J = 2 \operatorname{tg} \varphi_m.$$

Мы уже говорили о геомагнитных полюсах, координаты которых определяются вычислениями. А вот координаты магнитных полюсов, на которых наклонение фактически измеряемого магнитного поля Земли равно $+90^\circ$ или -90° , могут быть получены лишь непосредственными наблюдениями. Поэтому их можно было только «найти». Аналогично геомагнитный экватор вычисляется, а магнитный — должен быть «найден».

Северный магнитный полюс был открыт в 1831 г. английским капитаном Джеймсом Кларком Россом в районе Канадского Арктического архипелага на расстоянии около 1000 км от Северного географического полюса. Через десять лет экспедиция Джеймса Росса достигла района Южного магнитного полюса, расположенного вблизи побережья Антарктиды при-

близительно в 800 км от Южного географического полюса. Впервые существование магнитного экватора установил опытным путем знаменитый немецкий натуралист Александр Гумбольдт в 1799 г. во время своего путешествия в Южную Америку.

Магнитные «горы» и «долины». Туристы, идущие по горным маршрутам, часто берут с собой небольшой прибор — альтиметр — для измерения высоты.

Если через определенное количество шагов фиксировать показания альтиметра, то по ним можно построить график, показывающий, как изменяется высота этой тропы вдоль маршрута. Очевидно, чем гористее местность, по которой этот маршрут пролегает, тем больше будут колебания линии графика.

Представим себе теперь туриста, который решил совершить поход по магнитным «горам» и «долинам». Для такого путешествия ему надо захватить с собой «магнитный альтиметр» — магнитометр, и тогда он сможет определять свою магнитную «высоту». Построив график проведенных измерений, турист обнаружит и на ровной земной поверхности магнитный рельеф большей или меньшей пересеченности. Структура магнитного поля Земли такова, что, сделав кругосветное путешествие, этот турист один или два раза, в зависимости от того, какой элемент земного магнетизма им измеряется, поднимается на огромную магнитную «высоту» или опускается в глубочайшую магнитную «долину». Эти вздутия или вмятины на магнитной «поверхности», окружающей земной шар, обусловлены полем его однородного намагничивания, или дипольным полем. Перемещаясь по этой «поверхности», турист заметит несколько менее значительных по интенсивности,

чем в предыдущем случае, подъемов и опусканий магнитного рельефа. Это так называемые мировые или материковые аномалии. Последнее название характеризует их размеры: они занимают площади, соизмеримые с площадями отдельных материков.

График суммы дипольного поля и поля материковых аномалий, называемой главным магнитным полем, — сравнительно гладкая кривая, имеющая лишь несколько колебаний вдоль любого маршрута вокруг земного шара. Если учитывать полный магнитный рельеф Земли, необходимо принимать во внимание и более мелкие магнитные «горы» и «долины». Часть из них, имеющие протяженность от сотен до одного-двух десятков километров, относятся к региональным аномалиям, а меньших размеров — к локальным аномалиям.

Таким образом, в структуре магнитного поля Земли различаются четыре вида полей: дипольное поле, поле мировых, или материковых, аномалий, поля региональных и локальных аномалий. Каждое из этих полей отличают важные и интересные в научном и практическом отношении особенности. Их изучают геофизики и геологи, так как они отражают состав и строение глубинных слоев Земли, а также физические процессы в ее недрах.

Обычно интенсивность дипольного поля во много раз больше, чем интенсивность материковых аномалий. Интенсивность последних чаще всего в десятки раз превосходит ее значения у региональных и локальных аномалий. Есть, правда крайне редко, участки земной поверхности, на которых эти аномалии по интенсивности близки к главному магнитному полю Земли. Но и среди этих участков уникален район Курской магнитной аномалии — единственное место на Земле, где «возвышаются» десятки магнитных Эверестов.

В погоне за магнитной информацией. Осенью 1694 г. английская эскадра двигалась к Гибралтарскому проливу. Ее штурман с особой тщательностью снимал показания с вполне исправных компасов. Однако это не уберегло его от ошибок при определении курса, и ведомые им корабли у прибрежных скал потерпели крушение. Но не было здесь вины штурмана: никто не знал тогда истинного значения склонения в этом, как, впрочем, и во многих других, районе океана.

Англичане были потрясены трагическими событиями у Гибралтара, и правительство Британии вынуждено было принимать срочные меры, чтобы повысить точность навигации. В океан была отправлена экспедиция для проведения магнитных измерений, которые должны были помочь «найти правило для определения склонения компаса». Начальником экспедиции назначили Эдмунда Галлея, счастливо сочетавшего в себе талант большого ученого и характер отважного моряка.

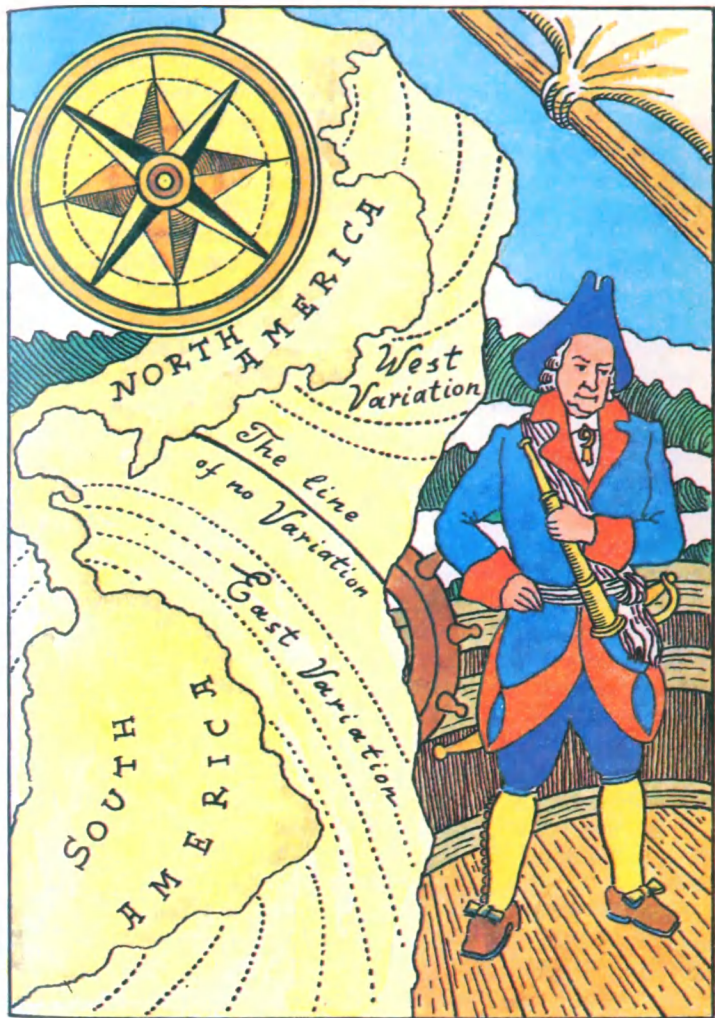
Проведя в течение двух лет огромное число измерений величины склонения на акваториях Атлантического и Индийского океанов, Галлей собрал большой фактический материал, который был использован в дальнейшем для повышения безопасности мореплавания.

В дальнейшем, в XVIII и XIX вв., продолжались магнитные съемки на океанах: измерялись как склонения, так и наклонения, а также горизонтальные составляющие геомагнитного поля.

Первая крупная и систематическая магнитная съемка акваторий всех океанов была проведена на американской немагнитной шхуне «Карнеги». После двадцатилетнего плавания она перестала служить науке: в 1929 г. на судне возник пожар, и яхта затонула.

В 1952 г. был спущен на воду новый немагнитный





корабль — советская шхуна «Заря», имевшая кроме полагавшегося набора парусов сравнительно мощный двигатель. Корпус «Зари» изготовлен из сосны и дуба, а узлы крепления — из латуни и бронзы. Из этих же сплавов сделаны якоря и якорные цепи, котлы, радиаторы парового отопления и многое другое, что находится на борту шхуны. Стальные детали имеются только в судовом двигателе, но он предусмотрительно установлен на значительном удалении от приборных помещений. В них размещена автоматическая магнитометрическая аппаратура, которая позволяет непрерывно регистрировать с высокой точностью почти все основные элементы земного магнетизма. Шхуна прошла свыше 600 тыс. км, накоплена богатейшая магнитная информация о распределении земного магнитного поля на акваториях Мирового океана.

На суше магнитные съемки на значительных площадях стали проводиться намного позже, чем на океанах. В Европе и в Северной Америке они начались лишь во второй половине XIX в. В России такие исследования проводились крайне медленно и дали незначительные результаты. Лишь после Октябрьской революции начали осуществляться интенсивные магнитные измерения на территории нашей страны. Полученные при этих съемках материалы имели большое значение для установления истинной картины геомагнитного поля на огромной площади СССР.

В 50-е гг. в Советском Союзе и в других странах стала широко применяться самолетная (воздушная) магнитная съемка. Было необходимо получить подробные данные о локальных аномалиях геомагнитного поля. По характеру этих аномалий, как установили геофизики, можно судить о наличии в районе съемки не только железных руд, но и многих других полезных ископаемых, даже не магнитных, таких,

как золото, платина, алмазы, а также нефть.

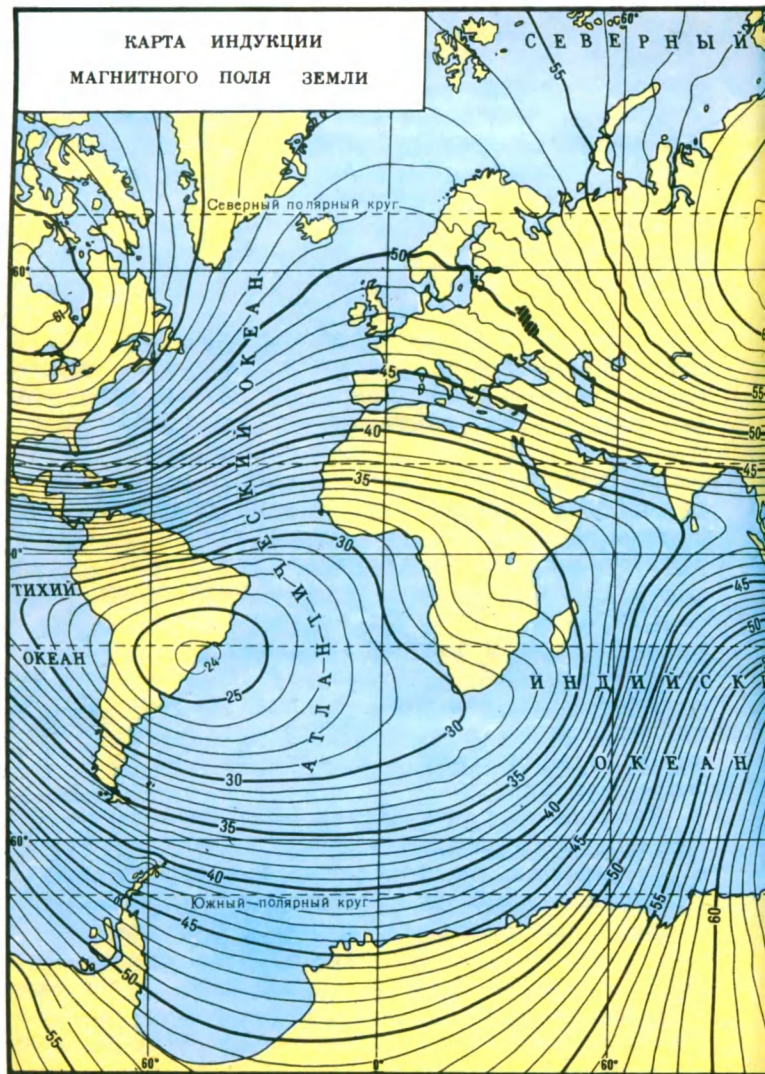
Запуск искусственных спутников Земли, оснащенных специальными магнитометрическими приборами, дал возможность получить более подробную информацию о геомагнитном поле на больших высотах.

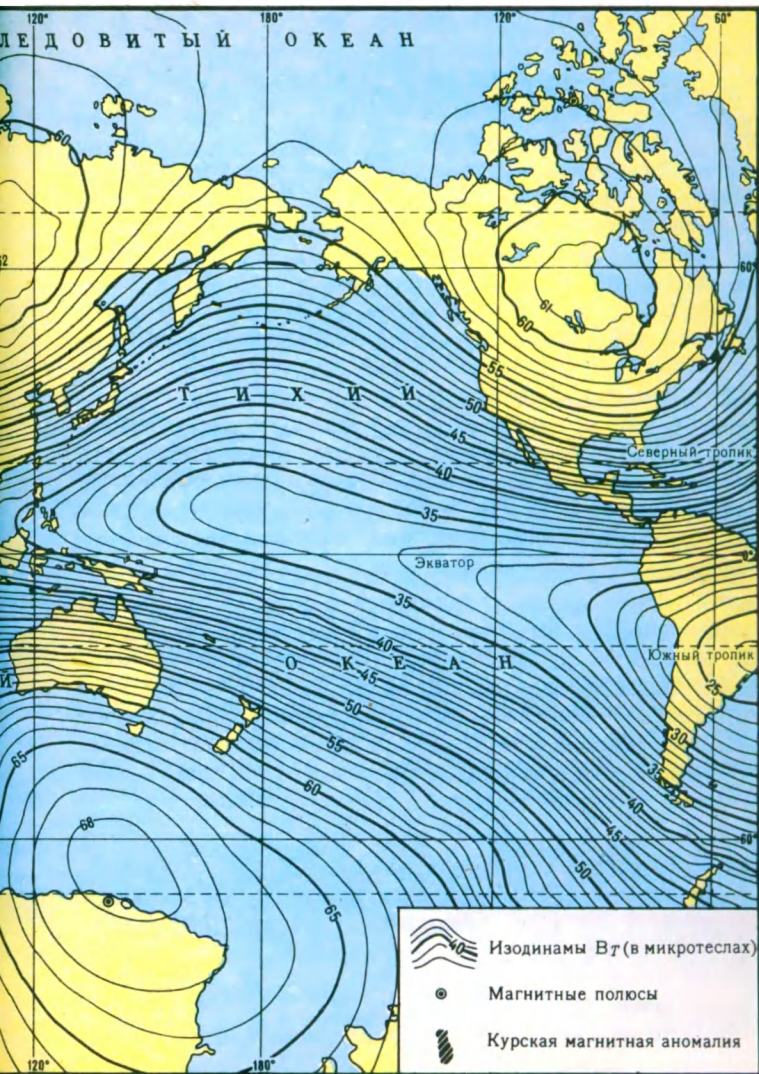
Таким образом, в настоящее время собран огромный материал о пространственном распределении геомагнитного поля, что дает возможность строить сравнительно точные магнитные карты.

Достоверный портрет геомагнитного поля. Экспедиция Галлея была снаряжена, как мы помним, чтобы провести необходимые магнитные измерения и на их основе «найти правило для определения склонения компаса». Владея обширнейшим фактическим материалом, ученый все же не решил поставленной перед ним задачи, казавшейся тогда весьма простой. Сейчас, конечно, ясно, что он и не мог найти такое всеобщее правило, так как склонение, как и другие элементы земного магнетизма, сложным образом изменяется вдоль поверхности Земли из-за наличия магнитных аномалий. Но если Галлей не создал правило определения склонения, то дал в руки мореплавателям магнитную карту, с помощью которой моряки могли определять склонение в Атлантическом и значительной части Индийского океанах.

Кроме того, при создании магнитной карты ученый как бы «мимоходом» сделал выдающийся вклад в картографию. Он предложил наносить на географическую основу так называемые изолинии картографируемых физических величин. Изолинией называется прямая или кривая, во всех точках которой измеряемая физическая величина имеет одно и то же значение. Способ представления пространственного распределения физических величин с по-

КАРТА ИНДУКЦИИ
МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ





мощью изолиний позволял создавать наглядное и доходчивое изображение характера изменений изучаемых величин. И по сей день он успешно применяется при составлении карт пространственного распределения любых физических величин.

Изолиниям всех элементов земного магнетизма присвоены свои названия. Так, изолинии магнитного склонения названы изогонами, наклонения — изоклинами, изолинии значений модуля вектора индукции магнитного поля Земли и его составляющих — изодинамами. Магнитные карты по существу и представляют собой карты изогон, изоклин или изодинам. Эти карты могут относиться как ко всей поверхности Земли, так и к отдельным ее участкам различной площади. Такие карты для всей поверхности земного шара — мировые магнитные карты — представляют собой изображение изолиний, отражающих пространственное распределение главного магнитного поля и лишь очень крупных, региональных аномалий.

Подобно тому как на физических картах полушарий линии равных значений высот — изогипсы и линии равных глубин — изобаты выявляют крупные элементы рельефа земной поверхности, изолинии на мировых магнитных картах выявляют крупнейшие особенности магнитного «рельефа» этой поверхности, и на них хорошо видны магнитные «горы» и «долины», относящиеся к материковым аномалиям.

Взгляните на карту индукции геомагнитного поля B_T (см. с. 40—41). На ней видно, что материковые аномалии этого элемента земного магнетизма находятся в четырех районах — на востоке Азии, северной части Северной Америки, в окрестностях Южного магнитного полюса и в южной части Атлантического океана.

Расположение материковых аномалий других эле-

ментов магнитного поля Земли несколько иное, однако и они тяготеют к районам расположения материковых аномалий индукции B_T

Магнитные карты, на которые наносятся изолинии региональных аномалий геомагнитного поля, составляются, как правило, в крупных масштабах, и по ним можно проследить даже незначительные изменения интересующих элементов земного магнетизма. Крупный масштаб используется в случаях, когда необходимо выявлять сравнительно мелкие локальные аномалии, например при поиске очень локализованных месторождений полезных ископаемых, какими являются, в частности, кимберлитовые трубки, содержащие алмазы.

На всех магнитных картах изогоны и изоклины даны в градусах, а изодинамы — в единицах индукции магнитного поля. В Международной системе СИ этой единицей является тесла (Тл). Такое наименование единица индукции магнитного поля получила в честь выдающегося ученого и изобретателя Николы Тесла, серба по национальности, многие годы работавшего в США.

Магнитное поле Земли относится к слабым полям, и индукция его главного поля B_T изменяется в зависимости от широты в пределах от 24 мкТл (микротесла) у берегов Южной Америки до 69 мкТл у Южного магнитного полюса. Горизонтальная составляющая B_H индукции этого поля достигает на южной оконечности Азии 32 мкТл и уменьшается сравнительно монотонно к магнитным полюсам, где она становится равной нулю. Вертикальная составляющая B_Z рассматриваемого поля растет от нуля на магнитном экваторе до наибольшей по абсолютной величине (порядка 70 мкТл) на Южном магнитном полюсе. Склонение D изменяется от -180° до $+180^\circ$, а наклонение I , как уже упоминалось,

от Южного магнитного полюса до Северного — в пределах от -90° до $+90^\circ$.

Вариации, рожденные Солнцем и Землей. Безбрежен магнитный океан, окружающий планету Земля, и загадочна его жизнь. То он спокоен, и почти ничто не изменяется в его пучине, то он внезапно вскипает, создавая штормовые волны невесомой материи, и все элементы земного магнетизма начинают свои хаотичные колебания.

Что же так будоражит глубины магнитного океана?

Многолетние наблюдения позволили сделать вывод: нарушает их покой наше дневное светило. Это — фантастических размеров термоядерный реактор, непрерывно синтезирующий гелий из ядер водорода и выделяющий при этом чудовищную энергию, которая и является причиной солнечных излучений. Они порождают процессы, приводящие к незакономерным изменениям геомагнитного поля, которые называются вариациями.

Вариации элементов магнитного поля Земли с периодом от долей секунды до многих суток известны ученым уже почти 300 лет. Но систематические наблюдения за ними начались лишь в первой половине прошлого столетия, когда появились специальные магнитные обсерватории. Хорошо оборудованные по тому времени, такие обсерватории были созданы в России по инициативе академика Адольфа Яковлевича Купфера, внесшего большой вклад в развитие экспериментальных исследований земного магнетизма.

Сейчас к вариациям также проявляют большое внимание, так как помимо научного значения они представляют интерес как явление, оказывающее влияние на практическую деятельность людей. Так, при возникновении вариаций значительной ампли-

туды — магнитных бурь — нарушается радиосвязь и ухудшается работа многих технических устройств. Например, в июле 1959 г. в результате сильной магнитной бури была прервана радиосвязь между Европой и Америкой, наблюдались нарушения электрической сигнализации на железных дорогах многих стран, вышли из строя даже некоторые электротехнические системы (нарушилась изоляция кабелей и обмоток трансформаторов). Установлено также, что интенсивные изменения геомагнитного поля не безразличны для животных и растений. Бесспорно теперь и влияние вариаций магнитного поля Земли на здоровье людей.

Это относится к магнитным вариациям, всецело связанным с деятельностью Солнца. Но имеются изменения геомагнитного поля, которые вызываются внутренними процессами в недрах нашей планеты, и, таким образом, источником их является сама Земля. Эти изменения земного магнитного поля получили название вековых вариаций. Любопытна история их открытия. Существовала уверенность, что склонение может изменяться только от места к месту. Но в 1634 г. астроном Генри Геллибранд сравнил величину измеренного им склонения в Лондоне с величиной этого угла, определенного в 1580 г. здесь же гидрографом Р. Норманом. Каково же было его удивление, когда выяснилось, что за время между двумя измерениями склонение увеличилось более чем на 7° . Это было несравненно больше возможной ошибки измерений склонения. И ученый делает очень смелый вывод: полученная разность склонений свидетельствует о постоянном медленном изменении направления магнитного меридиана в районе Лондона! Сравнение значений склонения при его повторном измерении с интервалом времени в десятки лет в Париже, а затем и в других городах подтвердило, что на всей

территории Европы имеются медленные изменения этого угла. Наличие вековых вариаций склонения было установлено впоследствии и на других континентах земного шара, что дало основание признать эти вариации глобальным явлением. Попутно выяснилось, что склонение в этом отношении не уникальный элемент магнитного поля Земли. Все элементы земного магнетизма подвержены рассматриваемым вариациям.

Вековые вариации — очень медленные колебания геомагнитного поля. Поэтому они оцениваются так называемым вековым ходом, который выражает собой изменение среднегодовых значений элементов магнитного поля Земли. Изолинии векового хода любого из этих элементов — изопоры представляют собой замкнутые кривые на поверхности земного шара. Обычно строят карты изопор, пригодные для использования в определенный интервал времени, в течение которого можно принять вековой ход неизменным. Каков же этот интервал?

Ответ на этот вопрос можно дать, если знать периоды наиболее интенсивных сравнительно «быстрых» вековых вариаций. Обработка данных магнитных обсерваторий за последние два столетия показала, что к таким вековым вариациям следует отнести колебания элементов земного магнетизма, имеющие период порядка 60 лет. Отсюда следует, что упомянутый интервал времени должен быть не более 5—10 лет. Он и принят в современной магнитной картографии. Именно через 10 лет в СССР издаются новые мировые магнитные карты и карты изопор.

На поверхности Земли имеется несколько районов, где изопоры охватывают сравнительно небольшие по площади области. Они получили название центров векового хода. В этих центрах изменения геомагнитного поля, вызванные вековыми вариациями,

достигают наибольшего значения по абсолютной величине. Важная особенность центров векового хода — их подвижность: они возникают, исчезают или перемещаются по земной поверхности, а вместе с этим деформируется и вся картина изопор.

В 50-х гг. было обнаружено, что одна из главных причин векового хода — так называемый западный дрейф, представляющий собой перемещение в западном направлении изолиний поля материковых аномалий. Скорость этого перемещения в среднем около 18 км в год для изогон.

Западный дрейф, наряду с другими фактами, относящимися к вековым вариациям, играет немаловажную роль при рассмотрении физических процессов создания магнитного поля Земли.

«Библиотека» гипотез

Пути познания. Гаусс убедительно показал, что наблюдаемое на поверхности нашей планеты магнитное поле почти полностью обязано источникам, расположенным где-то внутри земного шара. Этим были подтверждены предположения Гильберта и других прозорливых ученых, что именно Земля порождает действующий вокруг нее магнетизм.

Но по-прежнему оставался открытым вопрос: что представляют собой эти источники, какова же природа магнетизма Земли?

Пытаясь найти механизм, управляющий процессом намагничивания земного шара, ученые шли проверенным путем многих поколений естествоиспытателей. Путь этот всегда начинался с создания гипотез — научных догадок, предположений о законах, лежащих в основе изучаемых природных явлений.

Известно, например, что Исаак Ньютон не при-

знавал гипотез. «Гипотез я не измышляю», — писал он. В действительности же великий творец классической механики широко пользовался ими, истолковывая результаты как своих исследований, так и исследований других ученых. Он, в частности, выдвигал определенные предположения для объяснения закономерностей, относящихся к природе света, движению планет, падению тел и ряду других физических явлений. Да как истинный естествоиспытатель он и не мог иначе! Мог ли он не задуматься о первопричине открытого им закона всемирного тяготения? Ньютон выдвигает последовательно несколько предположений о происхождении сил тяготения. Так, сначала он считал, что притяжение тел к Земле вызывается непрерывным потоком к ее центру эфира — невидимой материальной среды, заполняющей Вселенную. При своем движении эфир, по предположению ученого, должен захватывать все без исключения предметы, создавая наблюдаемую силу. Точно так же эфир, двигаясь к Солнцу, создает силу притяжения к светилу. Но и сами тела имеют свои потоки эфира и потому притягиваются друг к другу.

Искусственность такой гипотезы заставила Ньютона через несколько лет выдвинуть взамен нее другое предположение. На этот раз он посчитал, что эфир имеет различную концентрацию вблизи, например, планет и вдали от них: чем дальше от центра планеты, тем более сгущен эфир, и поэтому он «выдавливает» все тела в сторону менее плотных своих слоев.

Через три десятилетия после обнародования второй гипотезы о причинах всемирного тяготения он вообще отказывается от эфира, чтобы через некоторое время вновь вернуться к нему, так как не мог найти другой среды, через которую могли бы передаваться силы всемирного тяготения. «Оправданием»

гениальному физику может служить то обстоятельство, что и сегодня, после более чем 300 лет усилий науки, нет еще сформировавшегося представления ни о причине взаимного притяжения тел, ни о среде, через которую это притяжение осуществляется.

В поисках объяснения природы света Ньютон также не раз менял существо предложенных им гипотез. Это характеризует постоянную работу мысли ученого, его желание возможно глубже вникнуть в суть изучаемого вопроса.

Выдвижение гипотезы, разумеется, только начало работы при поиске новой закономерности в природе. Правда, это начало зачастую и наиболее трудный этап решения поставленной научной задачи. На первых порах, когда речь идет о революционных предположениях в науке, бывает, что не удастся даже найти надежного способа убедиться, не «безумная» ли вообще высказанная гипотеза, существует ли в действительности эффект, указываемый ею.

К таким гипотезам относится, например, выдвинутое в 1931 г. величайшим физиком Полем Дираком предположение о существовании однополюсных магнитов — монополей. Были веские причины, чтобы с пристальным вниманием отнестись к новой гипотезе Дирака, ибо всего три года назад он смело выдвинул «сумасшедшую» идею: существует антиэлектрон — частица с массой электрона, но с положительным зарядом!

Это предположение, надо сказать, настолько не вязалось с уже установившимися понятиями о строении ядра, что большинство ученых приняли такую мысль за игру воспаленного ума молодого теоретика. Но всего через четыре года американский экспериментатор Карл Андерсон обнаружил антиэлектроны в космических лучах и на опыте подтвердил, быть может, самое замечательное предсказание в истории науки.

После этого многие известные физики отложили все свои исследования и начали погоню за антиподами основных элементарных частиц. Прошло не более трех десятилетий — и эти частицы были обнаружены, что дало основание считать возможным существование не только в фантастических романах, но и во Вселенной антивеществ и образуемых ими антимиров, которые построены из вновь найденных элементарных частиц — антиподов.

Если существование монополей будет подтверждено на опыте, то последуют важнейшие для естествознания следствия. Можно будет, в частности, объяснить имеющий большое значение для науки факт, почему в природе встречаются электрические заряды только кратные заряду электрона, а также ответить на множество других вопросов физики, волнующих сейчас большинство ученых.

Приведенный пример связан с гипотезой, справедливость которой уже в течение долгого времени не удается ни подтвердить, ни опровергнуть. В большинстве же случаев представляется возможность за более короткий срок вынести решение о пригодности того или иного научного предположения. Конечно, при этом необходимо пройти определенные стадии изучения вопроса.

За последние 100—150 лет было предложено много гипотез о природе земного магнитного поля, казавшихся сначала более или менее правдоподобными. Но вскоре становилось ясно, что выводы большинства из них противоречат ряду наблюдаемых фактов, или простой расчет показывал несостоятельность принятых предположений. Однако среди них были и такие, которые для обоснованной оценки требовали более глубокого теоретического анализа или проведения тончайших, трудоемких экспериментов. На существование и методах проверки таких предположений, сделанных крупнейшими уче-

ными, мы и сосредоточим свое внимание.

Следует особо отметить, что независимо от того, получила та или иная из выдвинутых гипотез дальнейшее развитие или была оставлена, каждая из них ярко иллюстрирует сам процесс познания природы земного магнетизма. А знакомство с этим процессом, как и с процессами познания любых явлений окружающего нас мира, приносит неоценимую пользу всем тем, кто хочет посвятить свою жизнь естествознанию.

Судьба «очевидного» предположения. В течение последних нескольких веков многие ученые принимали как само собой разумеющееся, что магнетизм Земли связан с намагничиванием слагающих ее пород. Поводов для такого предположения было немало: сперва часто находили намагниченные камни; затем выяснилось, что на Земле имеются целые горы, породы которых хорошо намагничиваются; впоследствии определились и большие по площади районы, где наблюдались резкие изменения интенсивности геомагнитного поля, и в них находили железные руды. Все это, казалось, подтверждало, что магнитное поле Земли вызвано именно намагничиванием ее ферромагнитных веществ.

Теперь это мнение не может приниматься наукой безоговорочно. И решающую роль в этом сыграли успехи в области физики, в частности те из них, которые относятся к изучению микромира — мира элементарных частиц. Благодаря им удалось понять природу ферромагнетизма и высказать обоснованные предположения о возможности намагничивания горных пород в недрах Земли.

Природа ферромагнетизма, как стало сейчас ясно, непосредственно определяется свойствами элементарных частиц, образующих атомы всех веществ. Изучение этих частиц и их взаимодей-

ствия привело к парадоксальному с точки зрения действующей в макромире классической электродинамики выводу: почти все микрочастицы — даже не имеющие электрического заряда, например нейтроны, — обладают магнитным моментом. Он порождается моментом количества движения частицы, который получил особое название — спин. Прежде всего было обращено внимание на спин электрона, так как учет такой особенности электронов атома позволил объяснить многие ранее непонятные явления микромира.

Предположение о существовании спина у внешних электронов атома впервые сформулировали в 1925 г. молодые нидерландские ученые Джордж Уленбек и Сэмюэл Гаудсмит, впоследствии ставшие известными физиками-теоретиками. Справедливости ради надо сказать, что еще в 1921 г. американский физик Артур Комптон выдвинул гипотезу о наличии у электронов спина. Однако эта важнейшая мысль не получила тогда поддержки ученых. Идею о том, что электрон должен иметь спин, высказал за восемь месяцев до признанных его первооткрывателей и студент Колумбийского университета двадцатилетний Ральф Кронинг, ставший теперь старейшим и авторитетнейшим членом Нидерландской академии наук. Предположение юного физика было тогда причислено к «бредовым» и отвергнуто маститыми учеными.

Как видно, история открытия электронного спина очень хорошо иллюстрирует известный тезис: «Революционные идеи в науке носят в воздухе».

Вначале считалось, что спин связан с вращательным движением электрона вокруг своей оси. Но в дальнейшем стало очевидным, что предположение о таком движении этой частицы ни в коей мере не соответствует действительности. Пока еще не удалось придумать каких-либо зримых ассоциаций, которые помогли бы ясно представить образ

движения, рождающего спин. Но по традиции для «наглядности» он соотносится с движением микроскопического волчка, который имеет два вполне определенных момента — механический и магнитный.

По правилам квантовой механики электроны-волчки определенным образом размещаются на оболочках атомов. Причем природа, следуя этим правилам, спаривает электронные волчки в подавляющем большинстве случаев так, чтобы их моменты были направлены противоположно. И поэтому суммарный магнитный момент электронов, занимающих оболочки атомов, оказывается равным нулю. В соответствии с такой «конструкцией» многих атомов химических элементов последние не могут быть намагничены. Но есть химические элементы, атомы которых устроены «чуть-чуть» иначе: «конструкция» их включает электроны с неспаренными спинами. Суммарный магнитный момент их, разумеется, не равен нулю, и это позволяет намагничивать атомы таких химических элементов при воздействии на них внешнего магнитного поля. Вещества, включающие атомы таких элементов, относятся к парамагнетикам, а вещества, содержащие атомы элементов с нулевым магнитным моментом, — к диамагнетикам. Однако во многих случаях при соединении двух или нескольких атомов, обладающих магнитным моментом, в молекулы последние оказываются лишенными этого момента, т. е. диамагнитными.

Существует еще один класс веществ, получивших название ферромагнетиков. Они содержат атомы химических элементов из следующего сравнительно короткого списка: железо, кобальт, никель и шесть представителей редкоземельной группы периодической таблицы Менделеева — гадолиний, тербий, диспрозий, гольмий, эрбий, тулий.

Названные элементы, как и химические элементы

парамагнетиков, имеют неспаренные спины, но, кроме того, в ферромагнетиках проявляется еще так называемое обменное взаимодействие между спинами их атомов. Благодаря этому взаимодействию происходит упорядочение спинов, и они выстраиваются в отдельных областях ферромагнетика — доменах — параллельно и однонаправленно. Размеры доменов весьма невелики, но ученые нашли удивительно изящный метод выделения их границ, и области намагничивания ферромагнетиков, которые были найдены лишь теоретически, удалось увидеть.

Указанное упорядочение спинов доменов приводит к самопроизвольному намагничиванию каждого из них до насыщения. В целом же любой ферромагнетик не создает во внешнем пространстве магнитное поле при отсутствии намагничивающего поля. И это потому, что в ферромагнетике его домены всегда располагаются определенным образом: магнитные моменты двух «соседей» устанавливаются навстречу друг к другу.

Картина резко изменяется, как только ферромагнетик оказывается в магнитном поле. Спины атомов «послушно» ориентируются по этому полю, и ферромагнетик приобретает значительный магнитный момент. Но вот намагничивающее поле снято. Вернутся ли спины в исходное положение, при котором компенсируются магнитные поля, создаваемые доменами с противоположно направленными магнитными моментами? Поместив магниточувствительный прибор вблизи ферромагнетика, легко убедиться, что существует остаточное магнитное поле. А это значит, что домены продолжают ориентироваться по направлению ранее действовавшего внешнего магнитного поля и такая ориентация может сохраняться в течение долгого времени.

В этом суть процесса намагничивания железных

предметов, известного с далеких времен, когда, как уже упоминалось, с помощью «особого камня» — естественного магнита натирали стальную иглу, которая служила мореходам компасом.

Систематически процессы намагничивания начал изучать Гильберт. Отлично владея кузнечным искусством, он сам изготавливал многие детали для своих опытных установок. И, работая у пылающего горна, пробовал нагревать намагниченный металл. Каково же было его удивление, когда выяснилось, что при нагревании сила магнитов уменьшается, а в случае доведения их металла до красного каления они теряют свои притягивающие свойства.

Влияние нагревания на качество намагничивания изучали после Гильберта и другие ученые-магнитологи, но лишь французский физик Пьер Кюри всесторонне исследовал это явление и в 1895 г. установил, что для каждого ферромагнетика имеется определенная критическая температура, при которой исчезает его остаточный магнетизм. В честь ученого эта температура названа точкой Кюри.

С позиций современной физики ухудшение магнитных свойств ферромагнетиков по мере повышения температуры — естественный процесс, так как тепловое движение приводит к уничтожению самопроизвольного намагничивания доменов из-за нарушения одинаковой ориентации в них спинов электронов атомов.

Интересно заметить, что при нагревании ферромагнетика до более высокой температуры (например, железа свыше 1053 К) и последующем его охлаждении даже в очень слабом внешнем магнитном поле он приобретает такое остаточное намагничивание, которое можно достигнуть при нормальной температуре лишь в магнитном поле большой интенсивности. Причина такого неожиданного эффекта в том, что магнитная восприимчивость ферромагнетика, —

величина, показывающая, насколько изменяется его намагниченность при изменении на единицу напряженности внешнего магнитного поля, — теоретически стремится к бесконечности по мере приближения к точке Кюри.

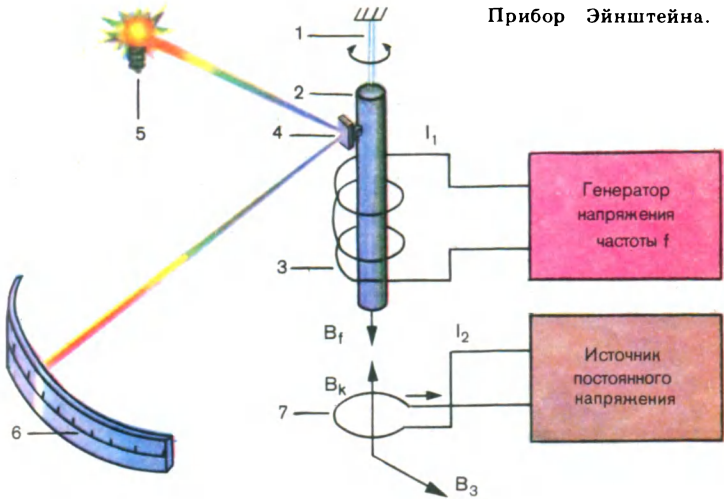
Эффект резкого возрастания магнитной восприимчивости ферромагнетиков вблизи температуры, соответствующей точке Кюри, был открыт еще в конце прошлого столетия известным английским физиком Джоном Гопкинсоном, работавшим в области электромагнетизма. Этот эффект получил имя своего первооткрывателя.

Эффект Гопкинсона способствовал предельному намагничиванию горных пород при их образовании, когда в недрах Земли царила высокая температура, близкая к точке Кюри, и это обстоятельство служило одним из доказательств правоты позиции магнитологов, отстаивавших «ферромагнитную» гипотезу происхождения магнитного поля Земли. Но эта же точка была «отправной» для тех магнитологов, которые подвергали рассматриваемую гипотезу суровой критике.

Действительно, о каком намагничивании горных пород на значительной глубине в недрах Земли может идти речь, если там и теперь, как полагают, высочайшая температура, исключающая возможность проявления магнитных свойств веществ? Эти свойства могут проявляться лишь до глубин, как рассчитали ученые, порядка 35—40 км, не глубже, так как ниже этого уровня температура превосходит точку Кюри для известных сейчас горных пород. Но магнитные характеристики их таковы, что слагаемый ими слой в несколько десятков километров не может создать наблюдаемое геомагнитное поле.

Приведенные соображения, а также ряд других, о которых мы расскажем в дальнейшем, дали

Прибор Эйнштейна.



основание большинству магнитологов отвергнуть рассматриваемую «ферромагнитную» гипотезу.

Эйнштейн предлагает новую гипотезу. Если хотят привести пример ученого с исключительными способностями физика-теоретика, неизменно называют имя Альберта Эйнштейна. И это справедливо. Можно ли назвать другого ученого, внесшего и строго обосновавшего такие глубокие революционные идеи естествознания, как он?

Но Эйнштейн имел не только дар гениального исследователя природы, делающего открытия «на кончике пера»; он обладал также огромным талантом ее испытателя, опытным путем изучающего законы окружающего нас мира, и, что еще менее известно, ярко выраженным дарованием инженера-изобретателя. Это позволило ему получить более двух десятков патентов на изобретения, которые

сыграли заметную роль в последующем развитии техники, и выполнить ряд тонких физических измерений на созданных им оригинальных приборах.

Разработка приборов, дающих возможность осуществить какие-либо исследования со значительно большей чувствительностью или точностью по сравнению с существующими, как правило, приводит к огромным достижениям в той или иной области науки и техники. Когда же удастся создать приборы с особыми, принципиально новыми качествами, способные надежно фиксировать неуловимые ранее изменения физических процессов, т. е. ввести в практику приборы с совсем иными возможностями, то это всегда ведет к открытиям, знаменующим собой переворот в наиболее важных областях наших естественных знаний.

Во многих случаях, однако, не сами инструменты играют решающую роль при проведении выдающихся экспериментов, а необычная идея их использования, которая дает поразительный результат — десятикратное, а то и стократное повышение чувствительности или точности измерений. Именно такая идея привела к желаемой цели Эйнштейна и нидерландского ученого Вандера де Гааза при постановке опыта по определению магнитных свойств атомов, вызвавшего большой интерес у физиков начала нашего столетия.

Упрощенная схема прибора, созданного экспериментаторами для проведения этого опыта, показана на рисунке на с. 57.

На тонкой стеклянной нити 1 подвешен железный стержень 2 диаметром 2 мм и длиной 25 мм. В обмотку 3 подается переменный ток I_1 частоты f , который создает магнитное поле B_f такой же частоты, действующее вдоль оси стержня. На стержне помещено небольшое зеркальце 4, отражающее луч света, который посылает осветитель 5. Отра-

женный луч от зеркальца попадает на шкалу 6. Ток I_2 с помощью обмотки 7 создает постоянное магнитное поле B_k , компенсирующее проекцию геомагнитного поля B_z на ось стержня. Такая компенсация применена для исключения влияния магнитного поля Земли на результат эксперимента.

Теоретические соображения подсказывали, что вращение электронов вокруг ядра атома определяет как его механический момент, так и совпадающий с последним по направлению магнитный момент. Если на ферромагнетик действует внешнее магнитное поле, то все его атомные магнитные моменты выстраиваются вдоль этого поля. Очевидно, по этому же направлению будут ориентированы и механические моменты атомов ферромагнетика. Их суммарный механический момент при этом должен поворачивать ферромагнитный стержень и закручивать нить, а следовательно и зеркальце, на определенный угол. Этот поворот будет отмечен перемещением светового зайчика по шкале прибора.

Но когда экспериментаторы сделали расчет, чтобы узнать, насколько повернется зеркальце от изучаемой причины даже при очень большом токе I_1 , то им стала ясна бесперспективность такого способа измерений: световой зайчик будет смещаться лишь на сотые доли миллиметра, и заметить это даже при самом остром зрении практически невозможно.

И вот тут-то ученые «вложили» в прибор идею, которая в десятки раз повысила чувствительность измерения: они применили эффект резонанса между частотой крутильных колебаний подвешенного на нити стержня и частотой подмагничивающего его поля. При изменении частоты тока I_1 стержень вначале будет поворачиваться на еле заметный угол. Но как только частота этого тока, а следовательно и поля B_j , приблизится к резонансу, ампли-

туда колебаний стержня начнет быстро возрастать и достигнет своего максимального значения. Поэтому отсчет этой амплитуды, характеризующей наблюдаемое на опыте физическое явление, производился именно при резонансной настройке прибора.

Такая «изюминка» примененной Эйнштейном и де Гаазом методики измерений позволила не только увидеть проявление изучаемого явления, но, что было не менее важно, исключить влияние множества источников помех, которые при другом подходе могли бы вызвать недопустимые погрешности определения угла поворота ферромагнитного стержня.

Анализируя результаты проведенного эксперимента, Эйнштейн приходит к выводу, что должен существовать и обратный эффект: при вращении ферромагнитного тела в отсутствие внешнего магнитного поля это тело будет самопроизвольно намагничиваться, так как магнитные моменты электронов-волчков будут ориентироваться по направлению оси вращения ферромагнетика.

Не в этом ли разгадка происхождения земного магнетизма?

Такой вопрос поставил ученый в статье, посвященной анализу проведенного им опыта, предлагая новую гипотезу природы магнитного поля Земли.

Джон Перри в своей книге «Вращающийся волчок», изданной еще в 1890 г. в США, поместил примечание, поражающее глубиной интуиции ученого: «Если большой кусок железа заставить быстро вращаться сначала в одну, а потом в другую сторону вблизи свободно подвешенной магнитной стрелки, которая хорошо защищена от действия воздушных течений, то, я думаю, должны произойти явления, представляющие величайший интерес для теории магнетизма. До сих пор мне не удалось при этих исследованиях обнаружить какого-либо маг-

нитного действия, но я приписываю этот неуспех относительной медленности вращения, которое я применил, а также недостаточной чувствительности магнитометра».

Как видно, Перри был близок к открытию интереснейшего магнитомеханического эффекта, о котором говорил Эйнштейн. Но, как отмечает сам автор, несовершенства в постановке опыта не позволили ему сделать это.

Американский ученый Сэмуэл Барнетт, прославившийся успешным выполнением самых сложных физических экспериментов, осуществил точные измерения величины магнитного момента, который возникал при вращении ферромагнитного стержня. С учетом полученных опытных данных он вывел формулу, позволяющую рассчитать магнитный момент вращающегося ферромагнетика.

Проведенная Барнеттом работа была высоко оценена учеными во всех странах, и открытый им эффект заслуженно получил имя экспериментатора. Ну, а что она дала для оценки гипотезы о происхождении магнитного поля Земли за счет намагничивания ее горных пород в связи с суточным вращением нашей планеты?

Расчет по формуле Барнетта показал, что магнитный момент земного шара в 10^{10} раз больше в действительности, чем это следует из теоретических соображений, отражаемых формулой. Тут вывод напрашивается сам собою: попытка объяснить природу земного магнетизма магнитомеханическим эффектом оказалась тщетной.

Несостоявшиеся «законы» земного магнетизма.

Одно время внимание ученых было привлечено к гипотезам происхождения геомагнитного поля, предполагавшим существование в Земле разделенных электрических зарядов разных знаков. Причем за-

ряды одного знака принимались распределенными по всему ее объему, а другого — только по ее поверхности.

Эти заряды при суточном вращении планеты могли образовывать замкнутые токовые контуры, которые, по мысли авторов гипотез, и должны были создавать магнитное поле Земли.

Такие гипотезы отвергались уже потому, что не давали убедительных объяснений причин, которые вызывали разделение земных зарядов.

Немецкий физик Т. Шломки и американский физик В. Сванн, отстаивая «зарядные» гипотезы возникновения геомагнитного поля, пытались обосновать это разделение с помощью умозрительно «открытых» ими новых законов электричества. Закон первого автора предписывал одноименным зарядам, а закон второго автора — разноименным зарядам взаимодействовать иначе, чем это должно происходить по формуле Кулона. Полученные Шломки и Сванном на основе предполагаемых закономерностей соотношения формально позволяли рассчитать смещение зарядов и, казалось бы, убеждали в правдоподобности рассматриваемых гипотез. Но ученые-магнитологи вскоре окончательно отказались от них, так как в противном случае пришлось бы поставить под сомнение незыблемость закона Кулона. Между тем двухсотлетний опыт его применения в самых различных условиях показал справедливость полученной Кулоном закономерности. Более того, этот фундаментальный закон природы точнейшим образом выполняется, как экспериментально установлено, не только в макром мире, но и в известном нам микромире. Это показал еще создатель атомной физики Эрнест Резерфорд, который установил, что ядро атома — положительно заряженный сгусток вещества, в десятки тысяч раз меньший по размерам, чем атом, создает вокруг се-

бя электрическое поле, действующее на отрицательный заряд — электрон — в полном соответствии с кулоновой формулой. У физиков нет сегодня никаких сомнений в том, что она справедлива и на космических расстояниях. Поэтому можно только поражаться универсальности рассматриваемого важнейшего закона физики и, конечно, нет необходимости в его «усовершенствовании» в угоду сомнительным гипотезам.

Предпринимались и другие попытки связать земной магнетизм с причинами, существование которых в природе предполагалось в соответствии с пока еще не известными ее законами.

Так, было высказано предположение о существовании, например, такого закона: всякое вращающееся тело (и не ферромагнитное!) создает вокруг себя магнитное поле. Проверка истинности этого утверждения требовала постановки сложнейших опытов, и поэтому их в течение долгого времени не могли осуществить самые искусные экспериментаторы.

Задача оказалась по плечу лишь великому русскому физiku Петру Николаевичу Лебедеву, о виртуозности которого в выполнении тончайших измерений ходили легенды. И они имели под собой серьезные основания: именно ему на рубеже XX века удалось «взвесить» свет — определить его давление не только на твердые тела, но и на газы.

Этого, несмотря на неоднократные попытки, не смогли сделать наиболее известные физики-экспериментаторы Европы и Америки.

П. Н. Лебедев в 1911 г. создал установку для проверки истинности предполагаемого нового закона. С ее помощью ему удалось вращать медное кольцо с огромной угловой скоростью — до 5—6 тыс. об/с и фиксировать изменение магнитного

поля вблизи этого кольца. Однако, несмотря на то что в установке использовался высокочувствительный магнитометр, никакого изменения магнитного поля при вращении кольца не было замечено.

Через 40 лет известный английский ученый-атомник Патрик Блэкетт, сумевший создать магнитометр высочайшей чувствительности, решил снова проверить предположение о намагничивании вращающихся тел. Для этого он использовал цилиндр диаметром 10 см из чистого золота весом более 15 кг. По расчетам Блэкетта, при «полете» цилиндра вместе с Землей в мировом пространстве вокруг него должно возникать ощутимое магнитное поле. Но расчеты оказались в противоречии с действительностью: указатель магнитометра неизменно демонстрировал отсутствие ожидавшегося экспериментатором результата.

Этим опытом закончилась еще одна попытка найти причину земного магнетизма с помощью специально сочиненного для такой цели физического закона.

История науки знает большое число подобных примеров, когда делались необоснованные попытки ревизовать установленные физические законы, всесторонне проверенные богатым опытом их применения как для объяснения наблюдаемых явлений природы, так и для предсказания новых.

Это, конечно, не означает, что на каком-то этапе развития науки может выявиться, что некоторое вновь наблюдаемое явление природы не охватывается общепринятыми в естествознании законами. Тогда ученые ищут новый, более общий физический закон. Однако неперенное условие при этом поиске — удовлетворение важнейшего требования: новый закон должен включать в себя существующий как частный случай и ни в коем случае не

отменять его. Именно так всегда развивалось естествознание, и так же оно будет развиваться в будущем, ибо в познании мира другого пути нет!

В обширной «библиотеке» гипотез мы ознакомились только с небольшой частью выдвинутых учеными предположений о причине земного магнетизма, выбирая лишь те из них, которые оставили более или менее заметный след в истории науки. Но в этой «библиотеке» мы еще не подошли к «стеллажу», на котором размещены гипотезы о природе магнитного поля нашей планеты, привлекавшие и продолжающие привлекать наибольшее внимание современных магнитологов. Однако прежде чем сделать это, следует обратиться к поразительным фактам, вскрытым геофизиками за последние десятилетия и относящимся к изменениям магнитного состояния Земли как в течение сравнительно малых отрезков времени, так и за миллионы и сотни миллионов лет.

Причуды геомагнитных полюсов

Окаменевшая магнитная летопись. Кто бы мог представить себе, что так быстро наступит время, когда сама Земля «расскажет» магнитологам о состоянии ее магнитного поля в самые далекие геологические эпохи. Но вот несколько десятилетий тому назад удалось найти методы, которые позволяют определять с высокой надежностью магнитное поле нашей планеты почти со времени ее образования. Конечно, эти методы родились не вдруг, а явились результатом скрупулезного изучения магнитных свойств горных пород.

Еще в младших классах школы на уроках географии рассказывалось, что все известные горные поро-

ды разбиваются на три большие группы — осадочные, изверженные и метаморфические породы. Вспомним их отличительные особенности.

Осадочные — это породы, образовавшиеся из мелких частиц материала земной коры, а также из остатков растений, планктона, рыб и животных. Известняки, глины, песчаники, гипсы, каменная соль — это все наиболее часто встречающиеся осадочные породы. Их можно видеть как на суше, так и на дне океанов и морей. Залегают осадочные породы пластами различной толщины от нескольких километров до нескольких метров и менее. Толщи осадочных пород содержат такие полезные ископаемые, как нефть, каменный уголь и др.

Изверженные породы образовались при затвердевании расплавленных масс, выходящих на поверхность Земли из ее недр. Среди этих пород наиболее распространены граниты, базальты, диабазы. С изверженными породами связаны месторождения железных руд, молибдена, золота и многих других полезных ископаемых.

Метаморфические породы — это физически и химически переработанные в течение очень долгого времени осадочные и изверженные породы. Из пород этой группы чаще всего встречаются мраморы, гнейсы, сланцы, кварциты. Самые крупные железорудные месторождения, а также месторождения многих других полезных ископаемых обнаружены в таких породах.

Осадочные породы по большей части немагнитны, но некоторые из них обладают заметными магнитными свойствами. Метаморфические породы бывают как магнитные, так и слабо или даже совсем немагнитные.

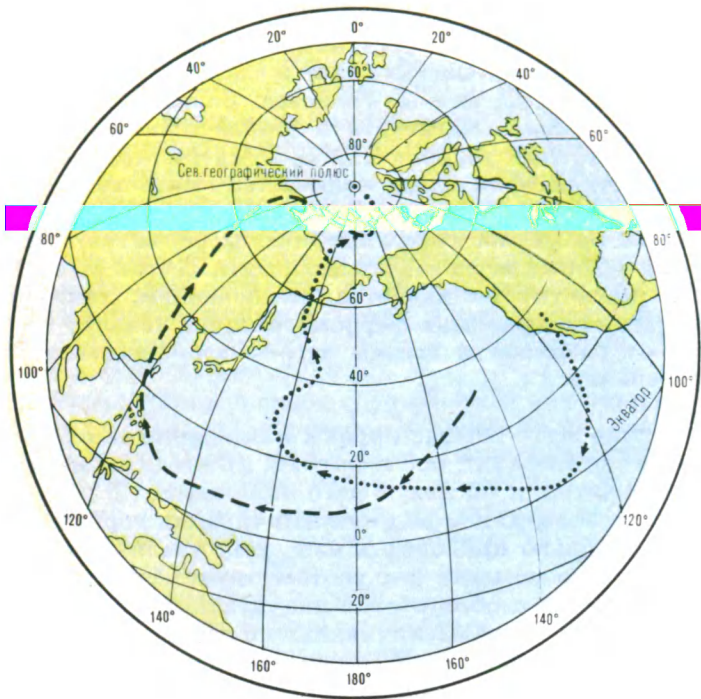
Среди изверженных пород встречаются наиболее магнитные, и связано это с большим содержанием в них магнетита — основного ферромагнитного ма-

териала земных пород. Естественные магниты — это по большей части и есть намагниченный в недрах Земли магнетит. Он включает железо, которое и определяет его магнитные свойства. Большое процентное содержание магнетита в горной породе создает благоприятные условия для ее намагничивания. Но нет жесткой связи между количеством магнетита в породе и ее намагниченностью. Часто решающее влияние на магнитное состояние породы оказывают размеры и форма зерен самого магнетита. В этом отношении магнетит не является исключением, так как намагничивание всех ферромагнетиков зависит также от размеров и формы зерен намагничиваемого материала.

Чаще всего горные породы намагничивались при своем образовании после нагрева до весьма высокой температуры и последующего охлаждения в геомагнитном поле. Такой вид намагничивания горных пород не только приводил к сильному увеличению их магнитного момента (это соответствует эффекту Гопкинсона), но и обеспечивал значительную стойкость их остаточного намагничивания по отношению к различным физическим и химическим воздействиям, которые неизбежно должны были возникать в процессе геологических изменений земной коры.

Ученые установили, что горные породы могут хранить свою остаточную намагниченность в течение огромных промежутков времени даже по геологическим масштабам. Эта намагниченность зависит от интенсивности и направления геомагнитного поля в месте образования породы, и поэтому такая «окаменевшая» память дает исчерпывающую информацию о том, каким это поле было в определенный момент истории Земли.

Подумать только, ничем, казалось бы, не примечательные камни могут поведать о земном магнетизме,



Траектории кажущейся миграции геомагнитного полюса в северном полушарии по палеомагнитным данным

.....←..... для европейских горных пород ,

---←--- для американских горных пород

существовавшем сотни миллионов, а то и миллиарды лет тому назад!

Палеомагнетизм читает страницы истории намагниченной Земли. Расшифровка магнитных «знаков» на горных породах — заслуга созданного не так давно раздела геомагнетизма, названного палеомагнетизмом. Ученые научно обосновали способы чтения магнитных «иероглифов» на горных породах, и их остаточная намагниченность стала бесспорным источником сведений о хронологии и характере изменений магнитного поля Земли за целые геологические эпохи.

Предварительно необходимо проводить специальную обработку исследуемых образцов горных пород — их магнитную «чистку», для того чтобы освободить образец от той части остаточного намагничивания, которая могла появиться от различных причин намного позднее времени образования породы. Очевидно, что эта часть намагничивания образца может помешать правильно решить поставленную задачу.

Простейший процесс «чистки» заключается в том, что образец подвергается воздействию переменного магнитного поля с убывающей постепенно амплитудой; давно известно: такое поле обладает хорошими размагничивающими свойствами. Интенсивность этого поля должна быть достаточна для снятия мешающего намагничивания, но не слишком большой, чтобы не затронуть первоначального устойчивого намагничивания. При таких условиях можно добиться необходимой «чистоты» образцов. Однако такая простая операция не всегда приводит к положительному результату. По большей части приходится применять более сложную процедуру — использовать, например, чередование нагрева и охлаждения образца. К сожалению, нет готовых рецептов для получе-

ния «чистых» образцов, пригодных для палеомагнитных исследований. Их подготовка — большое искусство.

Палеомагнитолог, создавая их, действует подобно художнику-реставратору, который, боясь повредить картину великолепного мастера, терпеливо и предельно осторожно снимает слой за слоем тусклые мазки неумелой кисти, чтобы наконец открыть яркие краски давно исчезнувшего шедевра.

«Чистка» образцов производится, как правило, в лаборатории, а при отборе образцов на месте их залегания проводится кропотливая предварительная работа по определению расположения образца относительно стран света и вертикали. Кроме того, очень подробно изучаются геологические особенности и возраст пластов, из которых вырезаются изучаемые образцы.

Зная направление магнитного поля в «очищенном» образце и ориентацию образца относительно стран света и вертикали на месте его залегания, можно найти направление геомагнитного поля. Определив его во многих геологических районах на поверхности Земли по формулам, установленным методами палеомагнетизма, легко вычислить положение геомагнитных полюсов для определенного геологического момента времени.

Когда магнитологи соединили непрерывной кривой точки на поверхности Земли, где, по палеомагнитным данным, последовательно находились геомагнитные полюсы, ученых поразила протяженность и сложность их движения. Только за последние 700—800 млн. лет, например, Северный геомагнитный полюс, по данным палеомагнетизма, совершил путешествие по сложнейшей траектории: начав его на месте современного Тихоокеанского побережья Северной Америки, он переместился к экватору, а оттуда попал

в современный северный район Канады. Такая миграция Северного геомагнитного полюса была получена по данным палеомагнитных исследований образцов европейских горных пород.

Аналогичные исследования были проведены и с образцами североамериканских горных пород, и тут магнитологи пришли в замешательство. И было от чего! Оказалось, что геомагнитный полюс в те же геологические эпохи двигался совсем по другому маршруту.

На карте (на с. 68) приведены пути миграции геомагнитного полюса в северном полушарии по палеомагнитным данным, относящимся к породам этих двух континентов.

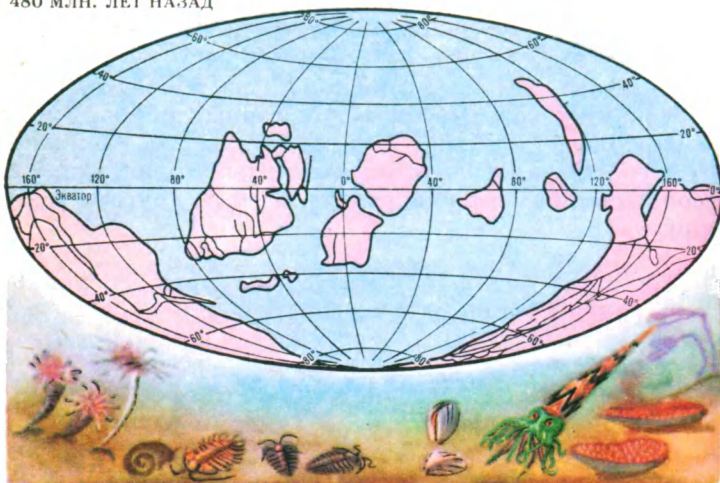
Из приведенного рисунка видно, что расхождение траекторий «европейского» и «американского» магнитных полюсов тем больше, чем древнее геологическая эпоха. Видно также, что в нашу геологическую эпоху эти траектории почти совпадают, стремясь к району современного Северного геомагнитного полюса.

Используя палеомагнитные данные, полученные по измерениям на образцах Австралии, Африки и других континентов, магнитологи столкнулись с аналогичным положением — один и тот же геомагнитный полюс почему-то двигался по разным траекториям в зависимости от того, горные породы каких континентов принимались во внимание.

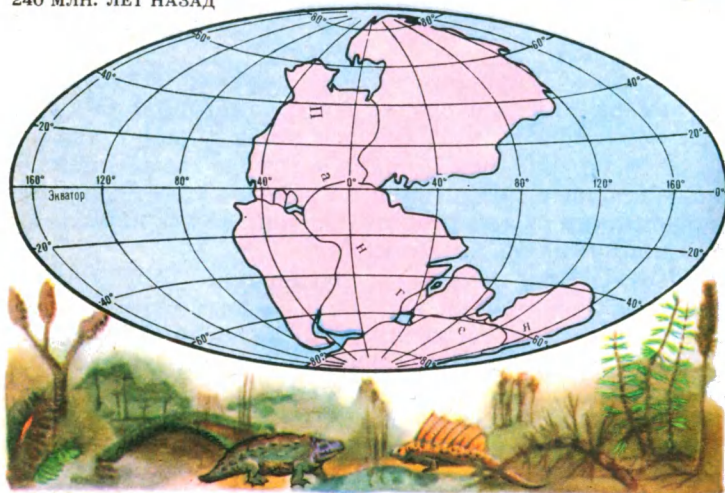
Прежде чем начать «расследование» этого противоречия, попытаемся выяснить, а возможны ли вообще миграции геомагнитных полюсов. По современным воззрениям, магнитная ось Земли должна почти совпадать с осью ее вращения. Поэтому геомагнитные полюсы не могут не следовать за соответствующими географическими полюсами и не могут «по своему усмотрению» произвольно мигрировать.

ИЗМЕНЕНИЕ ЛИКА ЗЕМЛИ

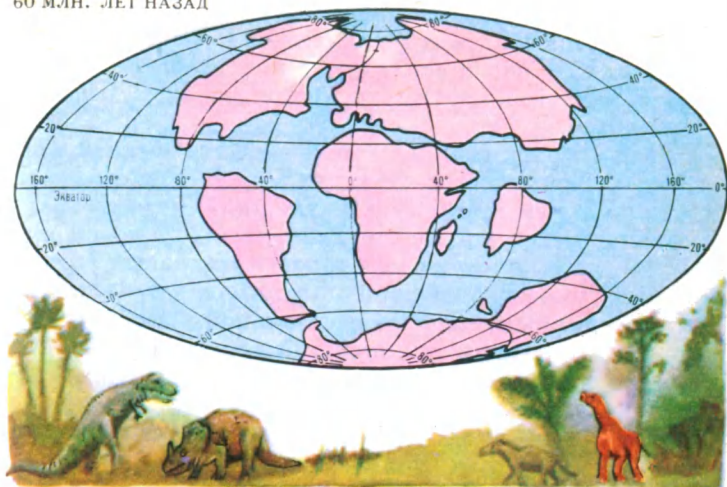
480 МЛН. ЛЕТ НАЗАД



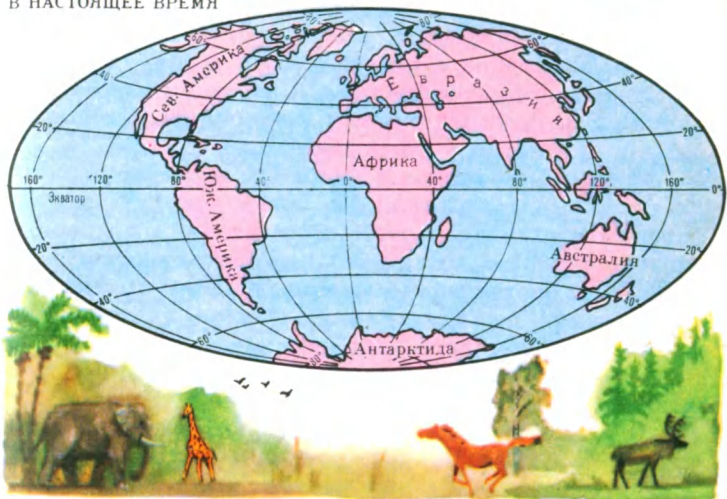
240 МЛН. ЛЕТ НАЗАД



60 МЛН. ЛЕТ НАЗАД



В НАСТОЯЩЕЕ ВРЕМЯ



вать. Отсюда вытекает, что по маршрутам магнитных полюсов должны двигаться и географические полюсы, или, что то же самое, в пространстве должна поворачиваться соответствующим образом ось вращения Земли.

Но по строгим законам механики эта ось, как и ось любого вращающегося тела, не может поворачиваться, если к ней не приложен внешний механический момент. Чтобы ось Земли двигалась с угловой скоростью, соответствующей скорости миграции геомагнитных полюсов, которая получается по палеомагнитным данным, надо по касательной к земному шару (как подсчитал крупнейший советский магнитолог Борис Михайлович Яновский) приложить усилие порядка 5 млрд. ньютонов.

Причин возникновения не только таких усилий, но и в сотни и тысячи раз меньших современная наука указать не может. Поэтому нет никаких физических оснований считать возможным значительные изменения положения земной оси в пространстве, кроме, конечно, ее поворота вместе с земным шаром за счет его прецессионного движения. А это значит, что и магнитная ось Земли не могла перемещаться сколько-нибудь адекватно в пространстве.

Выходит, что никакой миграции геомагнитных полюсов не могло и быть! Но тогда «заблуждаются» палеомагнитологи. С этим тоже нельзя было согласиться, так как их методы многократно подтвердили свою состоятельность при решении других геофизических проблем. Где же выход из создавшегося противоречивого положения?

Он нашелся, как только вспомнили о гипотезе расхождения материков, высказанной еще в 1912 г. австрийским геофизиком Альфредом Вегенером.

Геомагнетизм и расхождение материков. Вегенер сделал предположение, казавшееся многим ученым

фантастическим, что в какой-то момент геологической истории существовавший единственный на Земле суперматерик Пангея, окруженный водами всеземного океана, стал раскалываться на части, и они в последующие миллионы лет отходили друг от друга, одновременно поворачиваясь относительно земной поверхности. Осколки суперматерика были различны по величине и форме. Они превратились в конечном итоге в континенты с известными нам характерными очертаниями, а между континентами образовались океаны и моря, которые мы видим теперь на географических картах.

Первым очень «наглядным» аргументом в пользу гипотезы Вегенера было сходство обращенных друг к другу береговых линий почти всех современных континентов. Приложив, например, выступающий участок восточного берега Южной Америки к уступу западного берега Африки, мы увидим, как хорошо примыкают друг к другу эти континенты. Так же почти вплотную стыкуются и участки береговых линий других континентов. На картах (см. с. 72—73) показано образование континентов из одного суперматерика, изображен лик Земли за 480, 240, 60 млн. лет и в наше время. Эти карты, построенные с помощью электронной вычислительной машины по палеомагнитным данным, наглядно демонстрируют процесс как объединения, так и раскола суперматерика Пангея.

На втором «глобусе», относящемся к периоду, когда существовал суперматерик Пангея, четко прослеживаются «трещины» и уже образовавшиеся моря между будущими континентами. Сравнивая три последних «глобуса», нетрудно представить себе, как расходились эти континенты за последние 240 млн. лет.

Интересно отметить, что сходство берегов Южной Америки и Африки было замечено еще в 1620 г. знаменитым английским ученым Френсисом Бэконом,

когда появились первые более или менее правдоподобные карты этих континентов. Имеет свою историю и сама идея раздвижения материков. Гумбольдт в самом начале XIX в. предположил, что Атлантический океан образовался именно потому, что Американский и Африканский континенты отошли друг от друга.

Но не только очертание берегов было доказательством справедливости гипотезы Вегенера. Приводились и другие, казалось бы, веские аргументы в пользу этой гипотезы: сходство останков одних и тех же видов животных, обнаруженных в одновозрастных слоях различных континентов, единообразие растительного мира в соответствующие отрезки времени, а также ряд других фактов.

Но этой гипотезе был нанесен сокрушительный удар геологами. Они со всей очевидностью доказали, что поверхностные слои земной коры, которые, как предполагал Вегенер, плывут по нижележащим пластичным слоям, в действительности прочно связаны с глубинными слоями Земли, находящимися под ее корой, и поэтому ни о каком дрейфе континентов не могло быть и речи. Эти соображения привели к тому, что уже в 30-х гг. гипотеза Вегенера была отвергнута. Результаты палеомагнитных исследований были как раз тем решающим толчком, который не так давно вернул к жизни эту, как считали, навсегда похороненную гипотезу.

Оказалось, что как раз учет дрейфа континентов полностью снимает вопрос о «заблуждениях» палеомагнитологов, касающихся миграции геомагнитных полюсов. Если принять из других геофизических соображений определенные пути движения континентов, то палеомагнитные расчеты приводят к тому, что геомагнитные полюсы должны оставаться в сравнительно малой области для многих геологических эпох. Таким образом получилось, что двигались не магнит-

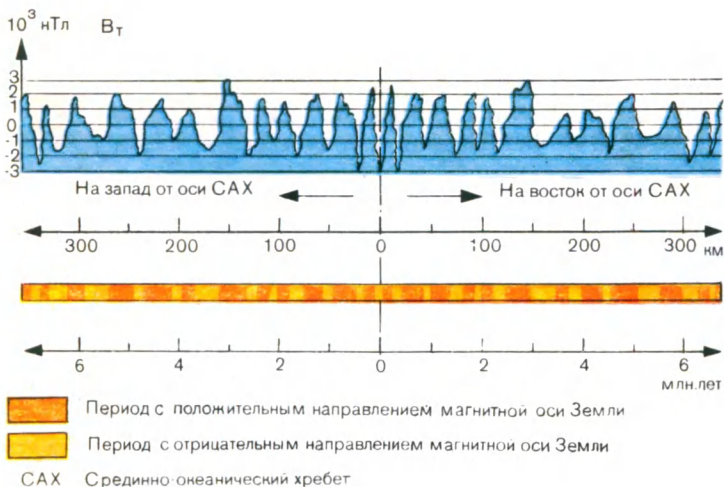
ные полюсы, а намагниченные образцы вместе с континентами.

Итак, как гипотеза о сохранении постоянства ориентации магнитной оси Земли, так и гипотеза о дрейфе континентов подтверждаются палеомагнитными данными. Но гипотеза дрейфа континентов может быть принята только в том случае, если будет дан ответ на вопрос: каким образом связанные с глубинными слоями Земли континенты все же перемещаются?

Ответ может быть получен, если обратиться к недавно выдвинутой геофизиками концепции, получившей название тектоники плит. Сущность этой гипотезы, кратко, в следующем. Принимается, что кора Земли и находящая под ней часть земного вещества разделены глубинными разломами на ряд так называемых литосферных плит, имеющих толщину от десятков до 100—150 км. Под этими плитами находится пластичный слой — астеносфера, которая позволяет перемещаться им друг относительно друга и поверхности Земли в горизонтальном направлении. Очевидно, что и материки, находящиеся на этих плитах, будут двигаться вместе с ними.

Между литосферными плитами всегда имеются узкие, длинные, тянущиеся часто на тысячи километров участки, на которых есть и глубочайшие трещины, или разломы, и высокие вздутия, а то и целые горные системы — срединно-океанические хребты. Открытие этих хребтов на дне Мирового океана было, пожалуй, самой впечатляющей сенсацией последних десятилетий в геофизике. Они играют огромную роль в концепции тектоники плит. Именно под этими хребтами происходят самые существенные геофизические процессы круговорота земного вещества.

Из недр Земли по глубоким каналам — трещинам под этими хребтами непрерывно перемещается к океаническому дну расплавленная магма. Накапли-



Аномалии геомагнитного поля над срединно-океаническим хребтом.

ваясь, она раздвигает литосферные плиты и образует новую литосферу. Этот процесс получил специальное название — разрастание океанического дна. Разрастание океанического дна должно неизбежно приводить к уничтожению части объема литосферных плит, так как площадь поверхности земного шара остается практически неизменной. Поглощение «лишнего» объема указанных плит происходит, как предполагают сторонники рассматриваемой гипотезы, в глубоководных желобах, находящихся главным образом на побережье Тихого океана.

Таким образом, концепция тектоники плит дала убедительные на сегодняшний день доказательства возможности перемещений континентов Земли, которые согласуются с данными палеомагнетизма.

Переполюсовка геомагнитного поля. Изучая «ископаемый» магнетизм, палеомагнитологи столкну-

лись с фактом, который сначала казался невероятным. Действительно, может ли быть, чтобы магнитная ось Земли периодически переворачивалась, и там, где недавно находился Северный геомагнитный полюс, появлялся Южный, и наоборот? И так сотни, а может быть и тысячи, раз за время существования нашей планеты.

Магнитологи брали множество разновозрастных горных пород в районах, как близко расположенных, так и находящихся за тысячи километров друг от друга, и всегда убеждались в том, что их остаточный магнетизм имел направление, соответствующее магнитному диполю Земли, направленному либо к Северному, либо к Южному географическому полюсу.

Такие повороты земного магнитного момента на 180° , его переполюсовки, или инверсии, проходили, как показали палеомагнитные исследования, через различные, совершенно случайные промежутки времени. Если же оценить среднюю продолжительность этих промежутков, то она оказывается далеко не одинаковой для различных геологических эпох. За последние 5 млн. лет между инверсиями геомагнитного поля в среднем проходило 200 тыс. лет. Но более всего удивительно, что сам процесс переполюсовки при этом занимал лишь «геологическое мгновение» — часто менее 10 тыс. лет!

Доказательством существования инверсий магнитного поля Земли служат так называемые линейные магнитные аномалии над районами срединно-океанических хребтов. Об их характерных особенностях можно судить по графикам (см. рис. на с. 78). На них показано изменение индукции геомагнитного поля вдоль линий, перпендикулярных к осям срединно-атлантического хребта. Эти графики, по мнению большинства магнитологов, можно истолковать следующим образом.

Выходящая из недр Земли под хребтом расплав-

ленная масса остывает. В этот момент она намагничивается по направлению действующего магнитного поля Земли. В связи с раздвижением океанического дна часть этой массы перемещается в одном направлении от оси хребта, а другая — в противоположном. Поэтому над этими объемами намагниченной массы должны существовать аномальные поля, знак индукции которых соответствует направлению геомагнитного поля в момент их намагничивания, когда они вместе находились на оси хребта. В зависимости от скорости движения указанных объемов они могут переместиться за определенное время на то или иное расстояние от оси хребта. Но существенно то, что как для одного, так и для другого объема эти расстояния должны быть одинаковы, так как скорость их движения отличается лишь знаком.

Зная время между двумя последующими инверсиями геомагнитного поля и определив расстояние между двумя соседними «зубцами» рассматриваемых линейных аномалий, можно определить скорость раздвижения океанического дна. В Атлантическом океане она достигает несколько сантиметров в год.

Полезный диалог с намагниченным кирпичом.

Есть множество примеров, которые дают повод удивляться поразительной интуиции ученых. Один из них — догадка магнитологов использовать кирпичи старинных зданий и глиняные сосуды далекого прошлого, чтобы проследить, как изменялось геомагнитное поле в последние тысячелетия.

Как оказалось, эти изделия могут хранить долгое время остаточное намагничивание, характеризующее интенсивность и направление магнитного поля Земли в момент их изготовления.

Почему же намагничиваются кирпичи и глиняные сосуды? Все дело в том, что эти изделия, как правило, подвергаются обжигу при высокой температуре, а

это коренным образом меняет дело. При остывании после обжига глиняные изделия проходят точку Кюри, и окиси железа, находясь в магнитном поле Земли, приобретают в соответствии с эффектом Гопкинсона значительную остаточную намагниченность. Эта намагниченность оказалась очень устойчивой, способной сохраняться неизменной десятки тысяч лет, а может быть, и много больше.

Расшифровка магнитных «следов» стала «специальностью» нового раздела науки о земном магнетизме, который получил название археомagnetизма.

Палеомagnetизм и археомagnetизм имеют много общего как в методике решаемых ими задач, так и в обработке данных магнитных измерений. Отличие их в основном в том, что момент времени намагничивания предметов, которые они изучают, — датировка такого момента — производится по-разному. В первом случае для этого применяются физические способы, а во втором — данные археологии. Конечно, точность датировки при археомagnetных исследованиях несравненно выше, чем при палеомagnetных.

Благодаря успехам археомagnetизма обычный кирпич или глиняный сосуд, изготовленные руками наших далеких предков, оказались носителями ценной информации о прошлом земного магнетизма.

Магнитологи задумались: а нельзя ли воспользоваться археомagnetными методами и «взглянуть», какое было геомагнитное поле много десятков тысяч лет до нас, когда жил человек каменного века? И им удалось это сделать!

Человек этого века оставил после себя громадные пепелища в местах, где разводились костры после удачной охоты. Жаркое пламя костров нагревало глинистые породы под ними до высокой температуры. Измерения остаточного намагничивания этих

пород позволяют определить интенсивность и направление геомагнитного поля в местах стоянок первобытного человека и этим значительно расширить временную шкалу археомагнитных исследований. Но к сожалению, такие стоянки обнаруживаются довольно редко, и данные археомагнитных исследований относятся в основном к ближайшим к нашему времени несколькими тысячелетиям. О чем говорят эти данные?

Археологические исследования показали, что индукция геомагнитного поля в одних и тех же точках земной поверхности не остается постоянной и в сравнительно короткое время, а систематически меняется. Так, за последние 8500 лет она достигла максимального значения приблизительно два тысячелетия тому назад и была в два раза больше современной. Имеются изменения индукции магнитного поля Земли и со значительно меньшими периодами. Четко выражены, например, вековые вариации с периодами около 300—400 и 600—1000 лет. Эти вариации, однако, имеют сравнительно небольшие амплитуды.

Вскрытые методами палеомагнетизма инверсии геомагнитного поля и установленные методами археомагнетизма вековые вариации этого поля не могут не приниматься во внимание.

Содружество магнитных полей

Токовые вихри будоражат ядро. В 1820 г. Ханс Эрстед подарил миру одно из величайших открытий в физике: он установил неразрывную связь электричества и магнетизма. Разосланный им реферат на четырех страницах, извещавший об этом, произвел ошеломляющее впечатление на многих проникательных ученых, и Андре Ампер был одним из них. Через две недели после того, как французский академик

узнал суть открытия Эрстеда, он стал известен как творец новой важнейшей науки — электродинамики. Фундаментом ее с первых дней существования стало утверждение: магнетизм, где бы он ни проявлялся, всегда рождается электрическим током!

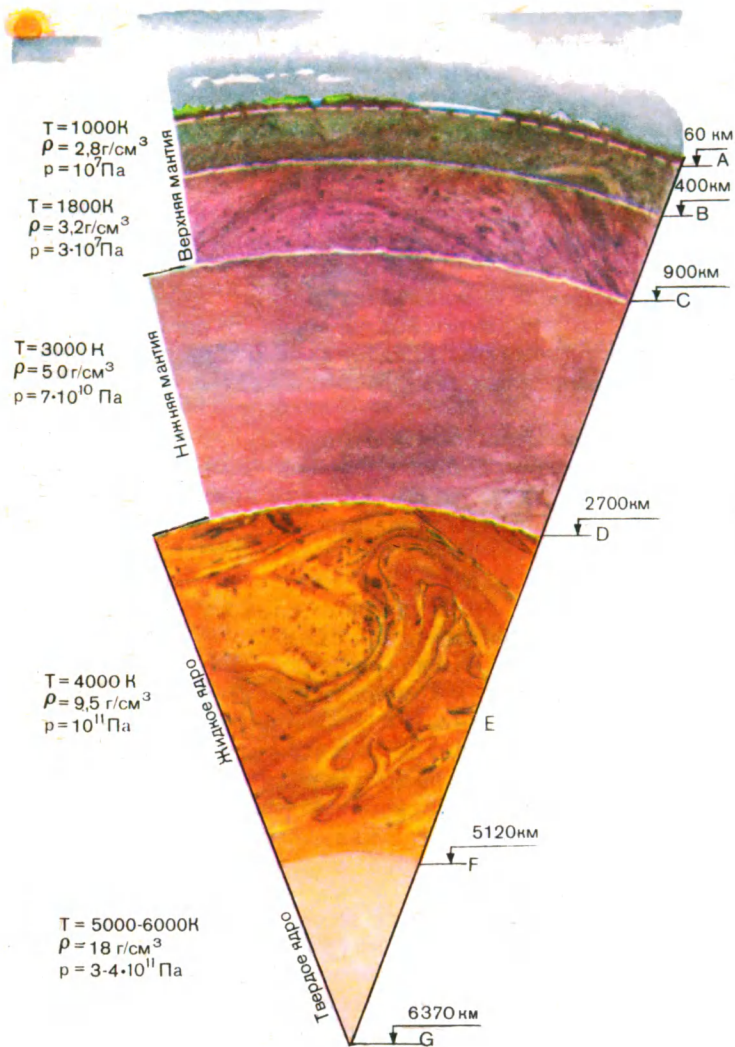
На заседании Парижской академии наук Ампер сказал: «Простая мысль, которая могла естественно возникнуть у того, кто хотел бы объяснить постоянное направление магнитной стрелки с юга на север, это предположить в Земле электрические токи». Поразительно, что эта глубочайшая мысль была высказана в те далекие времена, когда наука о происхождении земного магнетизма делала лишь первые младенческие шаги.

Вслед за Ампером было выдвинуто немало «электрических» гипотез образования магнитного поля земного шара. Но они не были приняты, так как не могли объяснить большинство уже известных фактов об изменениях геомагнитного поля. Со временем ученые стали все больше склоняться к тому, что эти факты как-то связаны со сложной структурой внутреннего строения самой Земли.

Какова же эта структура?

Один не лишенный остроумия геофизик предложил весьма наглядный и простой образ, или, как сейчас принято говорить, модель, внутреннего строения нашей планеты: яйцо, сваренное всмятку. Концентрически расположенные желток, белок и скорлупа яйца соответствуют трем главным зонам Земли — ее жидкому ядру, твердой оболочке, или мантии, и твердой коре.

По отражению упругих волн, вызванных землетрясениями, удалось «прощупать» земной шар до больших глубин и определить достаточно уверенно границы этих зон. А учитывая ряд дополнительных сведений — сделать правдоподобные предположения о состоянии и плотности заполняющих эти зоны



Оболочки и ядро Земли.

веществ, температуре, давлении и других физических условиях в земных зонах. Как по этим данным представляется современной науке внутреннее строение Земли, схематически изображено на рисунке (см. на с. 84).

Верхние слои ее коры (зоны А) — это окаменевшие образования осадочных пород толщиной до 15—20 км. Далее следует второй слой зоны, состоящий из кристаллических пород — гранитов, диабазов, базальтов, имеющий мощность от 8 до 60 км. Породы зоны плохо проводят электрический ток. Их средняя плотность $2,6 \text{ г/см}^3$. Давление в зоне достигает 10^7 Па .

Мантия Земли (зоны В, С, Д) имеет толщину около 2900 км. Она состоит главным образом из окислов кремния, а также металлов — железа и марганца. Из-за огромного давления в земной оболочке плотность ее вещества возрастает почти в два раза по сравнению с корой, а температура повышается до 3000 К. Электропроводность вещества мантии такая же, как у металлов. Давление в оболочке Земли возрастает до $7 \cdot 10^{10} \text{ Па}$.

Железоникелевое ядро Земли (зоны Е, F, G) имеет радиус около 3500 км. На границе ядра с мантией происходит скачкообразное изменение плотности земного вещества до $9,5 \text{ г/см}^3$, а само это вещество изменяет свое физическое состояние: из твердого в мантии оно становится жидким в зоне Е и, возможно, в части промежуточной зоны F. Сердцевина ядра (зона G) — это твердый раскаленный до 5000—6000 К шар радиусом около 1200 км. Плотность вещества в нем под действием грандиозного давления — в несколько миллионов атмосфер — повышается почти до 18 г/см^3 . Электропроводность ядра заметно больше, чем мантии.

Американский геофизик Вальтер Эльзассер учел особенности строения Земли — наличие в ее ядре

жидкого металлического слоя — и предложил в 1939 г. казавшуюся тогда весьма аргументированной гипотезу возникновения геомагнитного поля.

Он считал, что горячая жидкая масса ядра благодаря разности температур в нижней и верхней его частях образует огромные вихри, вращающиеся первоначально в вертикальных плоскостях. Под воздействием сил Кориолиса вихри изменяют свое положение в пространстве и устанавливаются в плоскостях, почти перпендикулярных к земной оси. Эти силы названы так в честь французского ученого Густава Кориолиса. Он в 1836 г. опубликовал работу, в которой показал, что при движении любого тела во вращающейся среде возникают особые силы, пропорциональные скорости этого тела и угловой скорости среды, а также синусу угла между осью вращения среды и направлением движения тела в среде.

Между верхними и нижними участками вихревых колец существует значительная разность температур. Поэтому в этих кольцах должна возникать электродвижущая сила, порождающая термоТоки. Но, как установлено при изучении термоэлектрических явлений, такая электродвижущая сила может появиться лишь в том случае, если в замкнутом проводящем кольце имеются участки, неодинаковые по своим физическим свойствам. По мнению Эльзасера, в вихревых кольцах проводящих масс ядра из-за значительной разности давления в верхних и нижних частях его такие условия всегда имеются.

Термотоки расположены, очевидно, как и вихревые кольца, в плоскостях, почти нормальных к оси вращения Земли, поэтому они могут создать наблюдаемое геомагнитное поле. Вот основные положения выдвинутой Эльзассером гипотезы, которая сначала заинтересовала ученых, но вскоре была оставлена. Оказалось, что не так-то просто обосновать строго описанный механизм возбуждения земного магнетиз-

ма. А главное, нельзя было объяснить установленные магнитологами факты резких изменений направления геомагнитного поля, многократно происходивших за всю историю нашей планеты.

Перед учеными встала нелегкая задача — выдвинуть такую гипотезу образования магнитного поля Земли, которая могла бы убедительно обосновать причины загадочных превращений ее магнетизма за миллиарды лет.

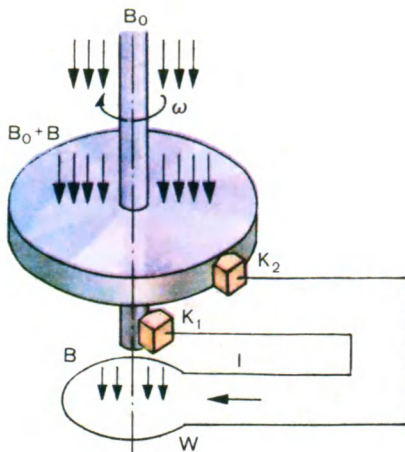
Эта гипотеза была высказана в 1947 г. советским физиком Яковом Ильичом Френкелем.

Динамо-эффект — путь к истине. Еще гимназистом VIII класса Яша Френкель нашел, как ему казалось, первопричину магнетизма Земли. Он рассуждал предельно просто. Поскольку Солнце раскалено, то оно должно выбрасывать электроны и поэтому обладать положительным зарядом. Вращаясь вокруг своей оси, наэлектризованное светило неизбежно порождает магнитное поле. На земной орбите, из-за большой удаленности ее от Солнца, это поле будет слабым, но вполне достаточным для того, чтобы намагнитить жидкое ферромагнитное ядро Земли.

Конечно, эта наивная гипотеза не могла быть принята всерьез, но она тем интересна, что ярко демонстрирует стремление юного геофизика при первых же попытках решать научные проблемы, связывать между собой различные по характеру физические процессы. Это стремление, помноженное в дальнейшем на глубочайшие знания физика-теоретика и исключительную интуицию выдающегося ученого, привело его к созданию гипотез и теорий, принесших их автору мировую славу. Среди них почетное место занимает и новая гипотеза происхождения земного магнетизма. В чем сущность этой гипотезы?

Я. И. Френкель пришел к мысли, что основная причина возникновения геомагнитного поля — обра-

Униполярный
электрический генератор.



зование электрических токов при вихревом движении расплавленных металлических масс в ядре Земли. При этом генерация токов в ядре осуществляется в магнитных полях, создаваемых самими же возбужденными токами.

Аналогичный процесс самовозбуждения токов осуществляется в динамо-машинах, уже давно используемых. Это дало основание называть выдвинутую гипотезу гипотезой динамо-эффекта.

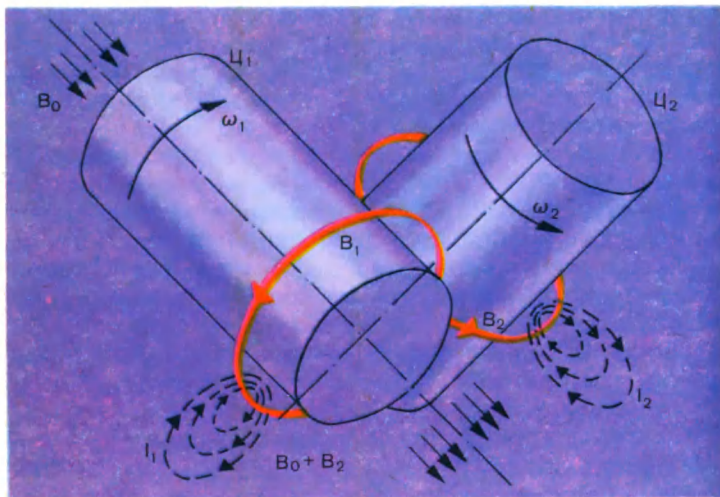
Динамо-машина с самовозбуждением, как и все электромеханические генераторы, содержит статор и ротор с изолированными обмотками. Особенность включения обмотки статора в этих машинах в том, что она питается от тех же клемм, что и нагрузка. Поэтому часть вырабатываемого генератором тока отводится в статорную обмотку, и при наличии хотя бы очень малого начального — затравочного — поля статора на клеммах нагрузки появляется напряжение, которое создает ток не только в нагрузке,

но и в обмотке статора. Появление тока в его обмотке приводит к увеличению магнитного поля, пронизывающего ротор машины, и как следствие — к росту напряжения на клеммах нагрузки. С каждым оборотом усиливаются как ток в статорной обмотке, так и магнитное поле динамо-машины. Такой процесс самовозбуждения токов и полей в ней будет продолжаться до такого их уровня, который возможен при мощности двигателя, вращающего ось генератора, при параметрах генератора и его нагрузки.

В некоторых случаях в электротехнике находит применение и другая, так называемая униполярная конструкция самовозбуждающего электрического генератора. С его помощью довольно грубо, но более точно, чем при использовании генератора описанной выше конструкции, моделируется процесс преобразования магнитных полей в земных недрах.

В униполярной машине (см. рисунок на с. 88) ротором является сплошной металлический диск, вращающийся с угловой скоростью ω в магнитном поле B_0 , параллельном оси вращения диска. По закону Фарадея в диске должна возникать электродвижущая сила, создающая разность потенциалов между осью и краем диска. Если прижать щетки K_1 и K_2 соответственно к оси и диску, то в контуре, включающем обмотку W , появится ток, который создаст магнитное поле B . Оно при соответствующем направлении витков обмотки W усилит поле, пронизывающее диск генератора, что приведет к росту разности потенциалов между щетками, а следовательно, к увеличению тока I и суммарного магнитного поля $B_0 + B$. Так реализуется процесс самовозбуждения униполярного электрического генератора.

Но в земном ядре нет, разумеется, никаких щеток и изолированных обмоток, поэтому указанные выше конструкции генераторов пригодны лишь для



освещения принципиальной стороны функционирования земной динамо-машины. Можно, однако, представить себе электромагнитную систему, в которой отсутствуют как щетки, так и изолированные обмотки, и тем не менее она способна моделировать работу предполагаемого природного генератора.

На рисунке изображены два металлических цилиндра ζ_1 и ζ_2 , которые вращаются с угловой скоростью ω_1 и ω_2 соответственно вокруг взаимно перпендикулярных осей. Эти цилиндры полностью погружены в жидкость, хорошо проводящую электрический ток. Вдоль оси вращения цилиндра ζ_1 действует поле B_0 . По закону электромагнитной индукции в этом цилиндре возникает электродвижущая сила, которая создает ток в контурах, расположенных частично в металле цилиндров, и на некотором их протяжении в проводящей

жидкости. Примеры таких контуров показаны пунктирными линиями. Ток I_1 в этих контурах создает магнитное поле B_1 . Оно индуцирует во вращающемся цилиндре C_2 электродвижущую силу, которая обуславливает ток I_2 , проходящий, как и ток I_1 , в металле цилиндра и проводящей жидкости. Этот ток возбуждает магнитное поле B_2 . Складываясь с полем B_0 , оно создает намного более сильное поле, чем первоначальное. А это значит, что в такой системе наблюдается динамо-эффект, приводящий к усилению затравочного поля.

Конечно, электромагнитные преобразования в описанной системе лишь отдаленно отражают явления, связанные с возникновением динамо-эффекта в земном ядре. А какие же физические процессы более точно приводят к этому эффекту?

Жарко ли магнитам в недрах Земли? Рассматривая динамо-эффект в качестве источника магнитного поля Земли, следует учитывать, что оно имеет сложную структуру. Необходимо объяснить причины возникновения всех компонентов этого поля. Поэтому уместно вернуться к «ферромагнитной» гипотезе.

Гипотеза о создании геомагнитного поля намагниченными горными породами, как упоминалось, была в свое время отвергнута, исходя из посылки, что уже на глубине 35—40 км в недрах земного шара господствует температура выше точки Кюри для этих пород.

Такая посылка была принята, конечно, не случайно, а из определенных геофизических предположений. Но она принята все же на основании предположений, а не фактов. А чтобы говорить о характеристиках какого-либо физического процесса с большой достоверностью, нужны результаты его наблюдений или расчетов, базирующихся на теоретиче-

ских положениях, не вызывающих никаких сомнений.

В нашем случае температура в недрах Земли с полной уверенностью может быть указана лишь при возможности установки термоприборов на значительной глубине.

Путешествия к центру нашей планеты удалось предпринять только героям фантастических романов. Технические проекты проникновения в глубь земного шара на сотни километров, выдвигавшиеся в прошлом, следует также отнести к фантастическим предположениям. И сегодня задачу бурения на такие глубины, даже учитывая прогнозируемый исключительно быстрый прогресс техники, вряд ли кто сочтет целесообразным обсуждать серьезно. А если обратиться к реальному положению вещей, то выяснится, что «голубая» мечта всех ученых, в той или иной мере связанных с наукой о Земле, проникнуть хотя бы на 100 км в земную толщу еще долгие годы вряд ли будет реализована.

При этом нельзя не упомянуть о мировом достижении советских специалистов, сумевших в прочнейших кристаллических породах Кольского полуострова пройти к настоящему моменту скважину глубиной более 12 км. Эта наиболее глубокая из всех известных в мире скважин знаменует собой выдающийся прорыв в «подземный космос», так как ее создание — плод исключительной по трудности инженерной работы и высочайшего горного искусства.

Поднятые на поверхность из сверхглубокой скважины куски породы еще раз подтвердили, как осторожно нужно подходить к предположениям, относящимся к трактовке физических явлений в недрах Земли. Так, например, на глубине 6350 м скважины был открыт... родник рассола! Никому из специалистов подобное не могло прийти в голову, ибо все

считали, что на этих глубинах породы непроницаемы и лишены не только водных растворов, но и газов. Однако здесь были обнаружены и газы — углерод и углекислый газ, а также гелий.

Поскольку предположение о высокой температуре в недрах Земли уже на сравнительно небольшой глубине было сделано не на основе измерений, а исходя лишь из теоретических соображений, некоторые магнитологи не согласились с этим предположением и отстаивают свою точку зрения на этот счет. Суть ее в том, что и на значительной глубине, по крайней мере до 100 км, в земных недрах температура ниже точки Кюри для горных пород. А это значит, что отвергнутая «ферромагнитная» гипотеза имеет право на жизнь. Какие же выводы в пользу своей точки зрения приводят приверженцы этой гипотезы?

Во-первых, многочисленные исследования с помощью искусственно создаваемых упругих волн, направляемых в глубь Земли, опровергли утверждение, что астеносфера — слой пластичной массы, имеющей температуру, близкую к 1800 К, — находится на глубине 100—200 км и является сплошной. Исследованиями последних лет было доказано: астеносфера располагается гораздо ниже и не является сплошной, так как есть обширные районы, где она вообще отсутствует.

Об этом свидетельствуют и наблюдения упругих волн, возникающих при землетрясениях. Очаги землетрясений часто располагаются на глубине до 600—800 км. Поскольку механизм землетрясений связывается с упругой энергией сдвигов и разрывов в твердых кристаллических объемах земных недр, то, по крайней мере, до этих глубин над астеносферой должно находиться твердое кристаллическое вещество. Из этого следует, что астеносфера, имеющая упомянутую высокую температуру, находится ни-

же 600—800 км, а так как температура к поверхности Земли должна быстро убывать, то на глубине 50—100 км температура земных недр будет существенно ниже точки Кюри для известных горных пород.

Значительное увеличение объема намагничиваемых пород в связи с более низким действительным положением верхней границы астеносферы дает основание считать, что эти породы могут создать наблюдаемое геомагнитное поле.

Во-вторых, советскими магнитологами в структуре магнитного поля Земли выявлены аномалии протяженностью от 500 до 1000 км. Такие аномалии могут быть созданы главным образом источниками, которые расположены на глубине в сотни километров. Существование этих источников как раз и убеждает в невысокой температуре земных недр на указанной глубине.

В-третьих, еще в 1950 г. в СССР (одним из авторов этой книги — В. И. Почтаревым), а значительно позже и за рубежом было установлено отчетливое соответствие между главными силовыми полями Земли — полем силы тяжести и магнитным полем. Подобно тому как существуют мировые аномалии геомагнитного поля, имеются такой же протяженности и мировые аномалии поля земного тяготения. Между «волнами», соответствующими этим аномалиям, прослеживается удивительное сходство. Например, в северном полушарии есть два максимума и два минимума, а в южном — по одному максимуму и минимуму значений указанных полей. Что же это означает? А только то, что плотностные неоднородности в недрах земного шара вызываются теми же горными породами, которые образуют и материковые магнитные аномалии. Но обсуждаемые изменения силы тяжести обусловлены породами, залегающими весьма глубоко в Земле. Следовательно, также глубоко залегают и источники мировых магнитных анома-

лий. Они должны, очевидно, находиться при температуре ниже точки Кюри. Поэтому необходимо признать, что и на большой глубине температура не такая уж высокая и природным магнитам там не слишком «жарко».

Может ли рассматриваемая гипотеза объяснить вековые вариации геомагнитного поля? Да, говорят ее приверженцы и приводят такие соображения.

В одной упряжке. Из всего сказанного ранее о структуре геомагнитного поля можно заключить, что оно описывается формулой:

$$\mathbf{B}_r = \mathbf{B}_0 + \mathbf{B}_M + \mathbf{B}_P + \mathbf{B}_L.$$

\mathbf{B}_r — вектор индукции магнитного поля Земли; \mathbf{B}_0 — вектор индукции дипольного магнитного поля; \mathbf{B}_M , \mathbf{B}_P , \mathbf{B}_L — векторы индукции соответственно полей материковых, региональных и локальных аномалий.

Каждое слагаемое приведенной формулы, в свою очередь, целесообразно представить двумя компонентами. Первая компонента зависит только от координат точек на поверхности Земли, а вторая — также и от времени. Проще говоря, первая компонента неизменна, а вторая — возрастает или уменьшается с течением времени.

Приверженцы «ферромагнитной» гипотезы считают, что намагниченные породы вносят свой вклад во все слагаемые структуры геомагнитного поля. Но если, по их мнению, еще можно согласиться с тем, что в дипольное поле этот вклад невелик по сравнению с полем динамо-эффекта, то в поле материковых, региональных и локальных аномалий он является основным. Причем вторые компоненты этих слагаемых и определяют наблюдаемые вековые вариации геомагнитного поля. Особенно эти вариации значительны в слагаемых, соответствующих материко-

вым и крупным региональным аномалиям.

Эти утверждения магнитологи — сторонники рассматриваемой гипотезы обосновывают следующим образом. Кроме остаточного намагничивания горные породы обладают и индуктивным намагничиванием. Индуктивное намагничивание отличается от остаточного тем, что оно изменяет свой знак на обратный сразу же после изменения направления внешнего магнитного поля и становится равным нулю, когда это поле исчезает. Поэтому суммарное их магнитное поле состоит из двух частей — остаточного и индуктивного полей.

На больших глубинах в недрах Земли, где температура близка к точке Кюри, индуктивное намагничивание может достигать больших величин, так как в этом случае проявляется уже упоминавшийся эффект Гопкинсона. Действием этого эффекта можно объяснить и наблюдаемые вековые вариации материковых аномалий. Действительно, для горных пород, нагретых до точки Кюри, достаточно очень небольших колебаний температуры, чтобы резко изменялась их индуктивная намагниченность, а это вызывает изменение магнитного поля в обширном районе поверхности Земли. Такие изменения геомагнитного поля могут истолковываться как вековые вариации.

То, что поля локальных, а также мелких и средних региональных аномалий вызываются намагниченными горными породами, залегающими в земной коре, сейчас единодушны все магнитологи. Дискуссионным для большинства из тех, кто придерживается динамо-гипотезы, и для значительно меньшего числа, кто отстаивает «ферромагнитную» гипотезу, остается вопрос об источниках материковых и крупных региональных аномалий. Первые принимают, что ими следует считать токи в Земле, а вторые, как мы видели, признают в качестве этих источ-

ников намагниченные горные породы. Что касается дипольной части геомагнитного поля, то здесь приверженцы «ферромагнитной» гипотезы соглашались теперь с тем, что основным источником этого поля следует принимать земные токи, порождаемые динамо-эффектом.

Независимо от того, как наука окончательно решит вопрос о происхождении материковых и крупных региональных аномалий, можно утверждать, что магнитное поле Земли в целом создается содружеством магнитных полей земных токов и намагниченных горных пород.

Земля — гигантский электромагнит

Планетарный генератор. Известный английский геофизик Эдвард Буллард — один из первых, кто стал развивать идею динамо-эффекта, — считал, что магнитное поле Земли в соответствии с принципом этого эффекта возникает потому, что внешняя жидкая часть земного ядра вращается относительно мантии.

Ученый провел тщательный математический анализ условий, при которых возможно возникновение индуцированных токов в веществе ядра в процессе такого вращения, и выяснил интересную особенность протекающих здесь электромагнитных явлений. А именно: при движении ядра как твердого тела относительно мантии, а следовательно и относительно начального магнитного поля, индуцированные токи в веществе ядра не возникают. Они появляются лишь в том случае, когда в ядре имеется неоднородное вращение расплавленных масс, или, что то же, существует относительное вращение отдельных объемов вещества ядра.

Могут ли наблюдаться такие вращательные дви-

жения в нем? Буллард показал, что могут, и вот почему. В механике установлен строгий закон — закон сохранения момента количества движения. Он должен выполняться при любых условиях в системе тел, на которую не действуют моменты внешних сил. Проявление этого закона встречается на каждом шагу. Примеров тому множество.

Кто не наслаждался незабываемым зрелищем искрометного вращения в «волчке» мастеров фигурного катания на льду? Конькобежец, задав своему корпусу быстрое круговое движение при вытянутых в сторону руках, начинает еще быстрее вращаться с поднятыми вверх или прижатыми к груди руками. Резкое увеличение угловой скорости спортсмена в последнем случае объясняется действием упомянутого закона механики, который для тел достаточно малого размера можно записать простой формулой:

$$mr\omega^2 = A,$$

где m — масса тела, r — его расстояние до оси вращения, ω — угловая скорость движения тела, A — постоянная величина.

Как видно из этой формулы, уменьшение расстояния тела до оси вращения всегда приводит к росту его угловой скорости, и наоборот.

При подъеме нижних слоев жидкой массы ядра к его поверхности и при погружении верхних слоев этой массы к центру Земли изменяются их расстояния до оси ее вращения. В соответствии с этим при перемещении из-за тепловой конвекции нижних, более горячих слоев вверх, а верхних, более холодных — вниз расплавленный металл в верхней части ядра начинает двигаться медленнее и одновременно быстрее в нижней его части. Возникает неоднородное вращение этого металла и как следствие — возбуждаются индукционные токи, порождающие магнитные поля в ядре.

Чтобы показать наглядно, какие магнитные поля при этом возникают, следует воспользоваться интереснейшим свойством магнитных силовых линий, выявленным одним из создателей магнитной гидродинамики — шведским ученым Ханнесом Альвеном, для сред, идеально проводящих электрический ток. Он показал, что такая движущая проводящая среда увлекает с собой магнитные силовые линии, как бы «вмораживает» их в вещество среды. Это легко понять, если применить к этому случаю закон Фарадея. По этому закону перемещение магнитных силовых линий в проводящей среде должно возбуждать в ней электродвижущую силу. Но так как в среде электрическое сопротивление отсутствует, то в ней должен возникать бесконечно большой ток, что невозможно. Поэтому среда с бесконечной проводимостью должна всегда увлекать за собой магнитные силовые линии.

В ядре проводимость расплавленного металла хотя и значительная, но не бесконечная. Поэтому при его перемещениях силовые линии геомагнитного поля B_0 , пронизывающие весь земной шар, будут двигаться за металлом ядра с несколько меньшей скоростью, чем само ядро. Однако эта скорость будет все же значительной и приведет во всех случаях к «вытягиванию» из поля B_0 так называемого тороидального поля $B_{\text{тор}}$.

Выполненные Буллардом вычисления показали, что тороидальное поле сосредоточивается только в пределах ядра. Оно располагается параллельно экваториальной плоскости и в северном полушарии направлено к западу, а в южном — к востоку. При этом индукция поля $B_{\text{тор}}$ в сотни раз большая, чем индукция геомагнитного поля.

Хотя тороидальное поле неощутимо вне ядра, оно имеет важное значение в процессе образования магнитного поля Земли: именно с помощью этого поля

реализуется динамо-эффект. Каким же образом?

Магнитные силовые линии поля $B_{\text{тор}}$ под воздействием сил, приводящих к вихревому движению бушующего в ядре жидкого металла, изгибаются на многих участках в петли, напоминающие по форме греческую букву Ω . Кориолисовы силы в этом случае поворачивают петли так, что их плоскости приближаются к меридиональным. При этом касательные к некоторым точкам этих петель будут параллельны полю B_0 . А это значит, что тороидальное поле будет усиливать первоначальное, затравочное земное магнитное поле, так как оно будет иметь составляющие, совпадающие по направлению с последним.

А как образовалось это первоначальное, затравочное поле? Ведь только с его появлением мог начаться сам процесс самовозбуждения, родиться динамо-эффект.

Автор гипотезы и его последователи считали этот вопрос несущественным, так как начальное геомагнитное поле могло быть ничтожно малым, а затем за миллиарды оборотов земного шара в период образования магнитного поля Земли усилиться до наблюдаемого уровня. Ничтожное же по величине затравочное поле могло быть создано многими причинами, например за счет магнито-механического эффекта Барнетта.

Гидромагнитное динамо: новые идеи, новые решения... Пионерская работа Булларда стимулировала интерес многих ученых к проблеме динамо-эффекта. Стоит рассказать о тех больших усилиях, которые прилагались в последние годы, чтобы найти ответ на многочисленные вопросы, связанные с генерацией магнитных полей с помощью этого эффекта, с особенностями физических процессов, порождающих его.

И сегодня интерес к этой проблеме не только не угас, а продолжает неизменно возрастать прежде всего потому, что наука стремится все глубже познать природу земного магнетизма. Кроме того, вопросы теории гидромагнитного динамо, т. е. теории самовозбуждения магнитных полей в движущихся жидких и газообразных средах, приобрели сейчас первостепенное значение для развития многих областей науки и техники.

Такие вопросы возникли, в частности, при исследовании планет, при изучении физики Солнца и звезд, эволюции Вселенной. Их решение имеет также важное значение для разработки методов борьбы с самовозбуждением магнитных полей в жидкометаллических потоках при охлаждении активных зон реакторов на быстрых нейтронах.

Создавая теорию гидромагнитного динамо, ученые стремились истолковать физическую сущность динамо-эффекта и математически показать, каким образом движущаяся проводящая жидкость может неопределенно долго генерировать магнитное поле с помощью механизма самовозбуждения.

Это оказалось делом исключительно сложным. Автор многих работ, посвященных решению задач самовозбуждения геомагнитного поля, Станислав Иосифович Брагинский сказал: «...Теория динамо относится к тем редким среди физических теорий проблемам, в которых уже сам вопрос о существовании решения соответствующей математической задачи весьма важен и нетривиален». Необходимо было выполнить обширные исследования, чтобы выяснить необходимые и достаточные условия, при которых может возникать динамо-эффект. К сожалению, такие условия в общем виде пока установить не удалось. Однако доказано несколько теорем, определяющих строгий запрет для самовозбуждения в ряде конкретных случаев.

Первая из таких принципиально важных теорем, объясняющих физическую сущность динамо-эффекта, была доказана Каулингом. Она гласит: в проводящей жидкости, в которой магнитное поле и скорость движения симметричны относительно некоторой оси, усиление поля невозможно.

Яков Борисович Зельдович — выдающийся ученый нашей страны, внесший огромный вклад в развитие атомной и других областей физики, в последние годы уделяет большое внимание астрофизике, и в частности магнетизму в космосе. Он показал, что принципиально невозможна генерация магнитного поля в системе, где скорость проводящей среды и индукция магнитного поля не зависят от третьей координаты пространства.

Условия, при которых невозможен динамо-эффект, позднее были найдены и для некоторых других частных случаев. Результатом этих глубоких теоретических исследований был вывод: генерироваться могут лишь магнитные поля достаточно сложной формы. К ним относятся, например, магнитные поля, силовые линии которых имеют вид спиралей, навитых на коаксиальные цилиндры.

При решении задач, связанных с гидромагнитным динамо, обычно используют либо кинематический, либо магнитогидродинамический подходы: в первом, называемом кинематической теорией динамо, движение считается заданным и отыскивается магнитное поле, которое этим движением определяется; во втором, называемом магнитогидродинамической теорией, устанавливается не только влияние движения проводящей жидкости на поле, но одновременно и обратное влияние на это движение электродинамических сил, связанных с магнитным полем.

Кинематическая теория, как более легкая, в настоящее время развита сравнительно подробно. Магнитогидродинамическая теория пока не вышла

из начальной стадии своего становления, но в связи с необходимостью решения полной задачи динамо она сейчас активно разрабатывается.

При любом из указанных подходов анализ процессов самовозбуждения магнитных полей всегда начинается с поиска модели, отражающей этот процесс с той подробностью, которая интересует исследователя. При этом, конечно, использованы могут быть только такие модели, которые приводят к системам уравнений, уверенно решаемым современными математическими методами.

Наиболее ранней кинематической моделью земного динамо, получившей широкую известность, была уже упоминавшаяся модель Булларда. Она сыграла немаловажную роль в развитии теории самовозбуждения геомагнитного поля, так как обосновала существование внутри ядра Земли тороидального магнитного поля, благодаря которому, как мы теперь знаем, и возникает наблюдаемое ползидальное поле.

Однако более глубокий анализ показал, что доказательство работоспособности этой модели было сделано автором на основе результатов, полученных некорректными математическими операциями, и модель Булларда была признана неработоспособной.

Первую «работающую» модель геодинамо предложил Станислав Иосифович Брагинский. Хотя в общей схеме генерации эта модель подобна упомянутой модели, но расчет процесса самовозбуждения основывался на другом математическом содержании, составляющем теорию так называемого почти коаксиально-симметричного динамо, разработанную Брагинским. В этой теории принимается, что существует некоторое весьма слабое поле скоростей, которое все же способно нарушить симметрию тороидального поля и тем самым обеспечить, учитывая значительную электропроводность расплавленных масс ядра, генерацию магнитного поля. При этом

механизм генерации реализуется так, что эти массы образуют огромные по размерам, крупномасштабные вихри в ядре Земли. Естественно, что в этом случае число их не будет большим.

Но можно, как предложил Е. Паркер, принять, что генерация геомагнитного поля обусловлена наличием в проводящей жидкости земного ядра огромного числа мелкомасштабных вихрей. При их движении возникают круговые электрические токи, имеющие составляющие, параллельные полоидальному полю, и это создает условия его усиления. Однако при существовании этих условий процесс усиления возникнет лишь в том случае, когда имеется преимущественное вращение вихрей в какую-либо сторону.

Такая модель динамо, получившая название турбулентной, была детально изучена немецким ученым Максом Штеенбеком и его сотрудниками. Им удалось теоретически показать и экспериментально подтвердить правомерность такой модели. Более того, приняв во внимание относительное перемещение ядра и мантии Земли, они сумели на основании этой модели объяснить, почему магнитная ось земного шара отклоняется от оси его вращения и что может вызвать инверсию геомагнитного поля.

С помощью кинематических моделей динамо была доказана принципиальная возможность генерации магнитного поля в земном ядре и указаны достаточно обоснованные причины дипольного характера главного магнитного поля Земли, близости оси диполя к оси вращения земного шара, инверсий геомагнитного поля и некоторых других особенностей этого поля. Однако такие модели не привели к общему решению рассматриваемой задачи.

Это может быть сделано лишь при условии применения намного более сложных магнитогидродинамических моделей. Их всесторонний анализ станет

возможным, когда они будут хорошо разработаны и геофизикам удастся устранить существующую пока большую неопределенность в детальном знании строения и состава глубинных недр Земли, их физического состояния. В настоящее время, например, данные о составе земного ядра, количестве выделяемого в нем тепла, о положении и форме его границ очень приближительны. То же можно сказать и об аналогичных характеристиках мантии Земли.

Магнитогидродинамическая теория динамо, как уже отмечалось, сейчас усиленно развивается многими коллективами ученых различных специальностей, и в ближайшие годы следует ожидать существенных результатов в общем решении задачи динамо-эффекта.

Откуда берется такая чудовищная энергия? Познание природы магнитного поля Земли будет далеко не полным, если ученые не выяснят исключительно важный для теории геомагнетизма вопрос: откуда же берется такая огромная энергия, которая вот уже несколько миллиардов лет, не иссякая сколько-нибудь заметно, «вращает» грандиозную геофизическую машину?

За последние годы выдвинуто несколько гипотез, относящихся к этому вопросу. Авторы одной из них считали, что радиоактивный распад веществ Земли — основной источник энергии, питающий геомагнитное динамо. При этом, по мнению некоторых приверженцев этой гипотезы, главную роль здесь играет радиоактивный изотоп калия K^{40} , который способен выделять при своем распаде большое количество тепла. По этой причине и сейчас такие изотопы калия дают значительный вклад в тепловой баланс нашей планеты. Несравненно большим этот вклад был в начальный период ее жизни. Тогда выделяемая при распаде изотопа калия K^{40} энергия была столь велика, что она поддерживала земную оболочку в рас-





плавленном состоянии в течение многих миллионов лет.

Однако детальные расчеты показали, что при распаде радиоактивного изотопа калия и других радиоактивных элементов, которые когда-либо могли находиться в Земле, выделялось значительно меньше энергии, чем это требуется для возбуждения и поддержания динамо-эффекта. Поэтому «радиоактивная» гипотеза не получила поддержки ученых и пришлось искать более убедительные предположения об источнике энергии такого эффекта.

Большое внимание ученых вызвала гипотеза, связывающая энергию динамо Земли с действием сил гравитации. Существо, например, гравитационной гипотезы, выдвинутой Брагинским, заключается в следующем. Жидкая часть ядра Земли, как принял автор гипотезы, образуется из сплава железа и кремния. Растворимость последнего в железе по мере увеличения давления, по данным экспериментальных исследований, падает. Такая закономерность приводит к тому, что по мере приближения к нижней границе расплавленной части ядра увеличивается количество выпадающих из сплава твердых кристаллов кремния и их все большее количество устремляется вверх. В связи с этим одновременно перемещаются вниз слои сплава, имеющие большую плотность, чем кремний. Таким образом, создается конвекционное движение расплавленных масс ядра. Энергия такого движения и преобразуется в энергию динамо-эффекта.

Создание геомагнитного поля за счет указанного преобразования энергии сопровождается процессом, далеко не безразличным для существования самого поля. Слои сплава, ближайшие к поверхности твердой части ядра, теряют кремний в наибольшей степени и переходят в твердое состояние. Это приводит к постепенному увеличению радиуса внутреннего

ядра Земли. Через определенный промежуток времени, который может длиться, вероятно, несколько миллиардов лет, все земное ядро станет твердым. Ликвидация расплавленной части ядра исключит неперенные условия возбуждения динамо-эффекта, и тогда должно исчезнуть и само магнитное поле нашей планеты!

В последнее время опубликован ряд работ, в которых анализируется прецессия оси вращения Земли как источник энергии геодинамо. Прецессионное движение оси вращения земного сфероида возникает в полном соответствии с законами механики из-за наличия у него заметного сжатия и образования в связи с этим экваториального вздутия, на которое действуют силы притяжения Луны и Солнца.

Ось вращения гигантского волчка — земного сфероида прецессирует по поверхности конуса, вершина которого находится в центре сфероида, а угол при вершине составляет почти 47° . И поэтому, если в настоящее время Земля вращается вокруг оси, направленной в точку вблизи Полярной звезды, то через 12 900 лет в момент максимального отклонения этой оси от современного положения она будет «смотреть» на самую яркую звезду северного неба — Вегу.

Прецессионное движение оси вращения Земли и отнесли создатели излагаемой гипотезы к источнику энергии, питающему геофизическое динамо. Но чтобы обосновать такую точку зрения, необходимо было найти соображения, убеждающие в том, что прецессия земного сфероида может быть причиной вихревого движения расплавленного металла в ядре Земли. Именно такое движение проводящей жидкости, как мы видели, определяет возможность возникновения в ней динамо-эффекта.

Эти соображения удалось подтвердить, воспользовавшись трудами известного французского математика и физика-теоретика Анри Пуанкаре. Он много

внимания уделял задачам, относящимся к поведению жидкости при ее вращении. Пуанкаре смог найти более общее решение, из которого следовало, что в жидкости, находящейся в прецессирующей замкнутой оболочке, возникают силы, которые способны вызвать в жидкости интенсивное вихревое движение.

Условия, которые были учтены Пуанкаре в решаемой им задаче, близки к условиям движения расплавленного металла в ядре Земли, поэтому гипотеза, принимающая во внимание прецессию земного сфероида как мощнейший источник энергии, получила серьезное теоретическое подтверждение.

Эта гипотеза привлекла внимание многих ученых также тем, что дает возможность истолковывать превращение колоссальной кинетической энергии вращающейся Земли, накопленной в момент образования Солнечной системы, в энергию динамо-эффекта.

Идея принять прецессию Земли в качестве источника, поставляющего энергию геодинамо, принадлежит В. Малкусу. Он первым провел исследования для обоснования этого предположения. Советский магнитолог Шмая Шлиомович Долгинов уже много лет активно развивает эту гипотезу не только применительно к Земле, но и к другим планетам Солнечной системы. В рамках этой гипотезы ему удалось получить зависимость, позволяющую оценить магнитные поля планет. Расчет с помощью этой зависимости дал возможность предсказать, в частности, магнитное поле Сатурна.

Этот результат — еще один довод в пользу рассматриваемой гипотезы. Тем не менее сегодня нет серьезных оснований отказываться от упомянутой гравитационной гипотезы.

Еще много предстоит понять в механизме возбуждения геомагнитного поля, чтобы ответить на многочисленные вопросы, связанные с загадкой магнитного поля Земли, и немало усилий потребу-

ется от ученых, чтобы высказанные ими наиболее верные предположения о геофизических процессах, определяющих этот механизм, превратить в стройную теорию земного магнетизма.

Однако нет сомнения в том, что выполненные исследования по выяснению характера этих процессов пролили свет на первопричину геомагнетизма и уже сегодня есть все основания, чтобы на фронте грандиозного здания науки рядом с формулой Гильберта: «Земля — большой магнит» — написать не менее впечатляющее утверждение: «Земля — гигантский электромагнит».

Заключение

Итак, закончено наше повествование о пути, по которому шла наука, стремясь раскрыть тайну намагниченной Земли. Теперь мы знаем, каким долгим и трудным был этот путь. Но ученые, следуя по нему, сумели сделать немало для познания природы земного магнетизма. Пусть им не удалось еще полностью раскрыть эту вековую тайну природы и создать теорию магнетизма Земли, но они уже очень близко подошли к ней.

Как знать, может быть, уже сегодня за партами сидят те любознательные школьники, которым суждено завершить усилия многих поколений магнитологов, мечтавших дать однозначный ответ на исключительно трудный и очень важный для всего естествознания вопрос: «Откуда же у Земли магнитное поле?»

Нам хотелось бы пожелать всем будущим магнитологам больших успехов на магистральных дорогах древней и всегда молодой науки, изучающей уникальнейшее явление окружающего нас мира — магнитное поле нашей планеты.



Тайна намагниченной Земли

*Виктор Иванович
Почтарев
Берка Зусевич
Михлин*

ДЛЯ СРЕДНЕГО И СТАРШЕГО
ШКОЛЬНОГО ВОЗРАСТА

Заведующий редакцией
В. Ю. Кирьянов

Редактор
Н. Н. Габисония

Редакторы карт
**Е. Н. Лебедева
А. В. Ковалева**

Младший редактор
Е. Б. Крышкина

Художественный редактор
А. В. Проценко

Технический редактор
О. В. Журкина

Корректор
М. А. Суворова

ИБ № 959
Сдано в набор 16.05.85.
Подписано в печать
09.12.85. Формат $70 \times$
 $\times 100^{1/32}$. Бумага офсет-
ная № 1. Печать офсетная.
Гарнитура школьная. Усл.
печ. л. 4,51. Уч.-изд. л.
4,88. Усл. кр.-отт. 18,54.
Тираж 200 000 экз. Заказ
№ 1991. Цена 40 коп.
Издательство «Педагогика» Академии педагогических наук СССР и Государственного комитета СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.
107847, Москва, Лефортовский пер. 8. Ордена Трудового Красного Знамени Калининский полиграфический комбинат Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.
170024. г. Калинин, пр. Ленина, 5.

Содержание

Введение

3

Многовековая школа земного магнетизма

5

Магнитное поле Земли

27

«Библиотека» гипотез

47

Причуды

геомагнитных полюсов

65

Содружество

магнитных полей

82

Земля — гигантский электромагнит

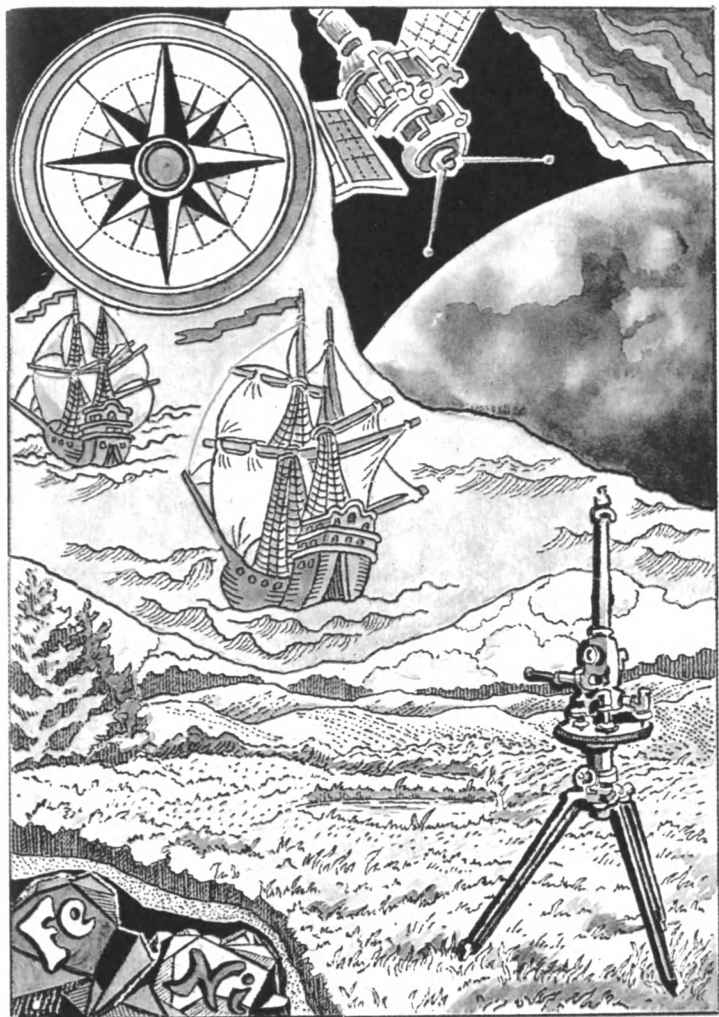
97

Заключение

111



ИЗДАТЕЛЬСТВО
«ПЕДАГОГИКА»



Читайте
следующую
книгу
библиотечки
♦Ученые —
школьнику♦!

Каковы пути самоутверждения личности?



Способны ли «престижные» вещи обеспечить человеку престиж истинный?



Что определяет меру разумных потребностей?



Что подвластно моде и что ей не подвластно?



На эти и другие вопросы вы получите ответ, прочитав книгу кандидата философских наук В. П. Мотяшова «Мода, престиж, личность».



ИЗДАТЕЛЬСТВО
♦ПЕДАГОГИКА♦