

550.3
Л17

50437

И. И. ЛАЗАРЕВ

**О С Н О В Ы
Ф И З И К И
З Е М Л И**

ГОСТОПЕЧНИКЪТ — 1939

550.3

117

55

117

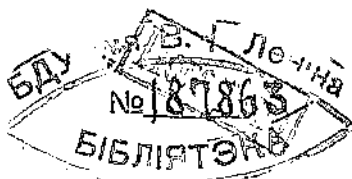
Акад. П. П. ЛАЗАРЕВ

Депозитарий

Печать

ОСНОВЫ ФИЗИКИ ЗЕМЛИ

1874487
13605
117
117



ПРОВЕРЕНО
1956
1956 г.

ГОСУДАРСТВЕННОЕ
ОБЪЕДИНЕННОЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
РЕДАКЦИЯ ГОРНО-ТОПЛИВНОЙ
И ГЕОЛОГО-РАЗВЕДОЧНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
МОСКВА 1939 ЛЕНИНГРАД

РЕСПУБЛИКАНСКАЯ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ
БИБЛИОТЕКА

АННОТАЦИЯ

Книга «Основы физики земли» представляет собой популярное изложение основных учений о твердой оболочке земли.

В первой части излагается учение о земле как о космическом теле в связи с движениями земного шара как целого (движение вокруг оси, движение около солнца, прецессия, нутация и т. д.).

Рассмотренные в этой части учения имеют значение для объяснения изменений климатов земли в геологические эпохи, изученные геологами.

Во второй части заключается изложение современных представлений о движении твердой коры земли (порообразование, сдвиги, землетрясения). Вторая часть заканчивается учением о земном магнетизме и о радиации в солнечной системе, являющейся причиной климатических изменений в земном шаре. Книга может служить в качестве пособия для ознакомления с основами геофизики для лиц, не имеющих специального образования, но привыкших читать серьезные книги. Кроме того, книга может быть введением в геофизику для студентов геологов и геофизиков вузов и втузов, для стахановцев. Изложение не предполагает каких-либо специальных знаний по математике, физике и химии у читателя.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Изучение физических процессов, происходящих в земном шаре, составляет предмет обширной дисциплины, носящей название геофизики, или физики земного шара.

Область геофизики по существу охватывает как твердую оболочку земного шара с ее содержимым, так и жидкую и газообразную оболочку. Процессы во всех трех оболочках и составляют то, что мы можем назвать жизнью земли. Оболочки земного шара так тесно соприкасаются и так тесно связаны друг с другом, что трудно рассматривать одну какую-нибудь часть земли, не рассматривая других. Однако у нас есть практическое основание выделить твердую оболочку и изложить процессы, происходящие в ней, отдельно. Дело в том, что не только масса этой оболочки несравнимо больше массы жидкой и газообразной части земли, но и все, что связано с твердой землей, имеет огромное отношение к практической жизни и деятельности человека. Добыча руд, изучение подземных вод, землетрясения — вот те практические области, где твердая оболочка играет такую большую роль. Все это, вместе взятое, заставляет некоторых авторов (например, Морена) излагать отдельно учение о твердом теле земли, без изложения учения о жидкой и газообразной оболочке. Для нас в Союзе это тем более возможно, что для жидкой и газообразной оболочки имеются превосходные и популярные и строго научные книги, дающие возможность ближе ознакомиться с этими областями науки.

Наоборот, популярных книг в области учения о твердом теле земли у нас почти нет, и настоящая книжка имеет задачей пополнить этот пробел, дав начинающему читателю представление об этой быстро развивающейся области, области, где ученые нашей родины давно завоевали себе почетное имя. Стоит только назвать имена М. В. Ломоносова,

Д. И. Менделеева, П. Н. Лебедева, Б. Б. Голицына, чтобы убедиться, в том, что вопросы геофизики интересовали больших ученых. Современному поколению молодежи предстоит благодарная задача не только расширить и углубить работы своих предшественников, но и обосновать новые геофизические методы, которые позволят глубже проникнуть в строение земли и дадут возможность нашей промышленности шире использовать неисчерпаемые природные богатства Советской страны.

Москва

Институт теоретической геофизики
Академии наук СССР

Декабрь 1933 г.

ЗЕМНОЙ ШАР КАК КОСМИЧЕСКОЕ ТЕЛО

Глава I

ФОРМА И РАЗМЕРЫ ЗЕМНОГО ШАРА, ПОЛУЧЕННЫЕ НА ОСНОВАНИИ НЕПОСРЕДСТВЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

§ 1. Определения шарообразной формы земли в древности, в средние века и в новое время

Земля при первом грубом ознакомлении с нею представляется наблюдателю то волнующейся поверхностью открытого океана, то поверхностью морей и больших озер, то плоскими равнинами, степями, волнистыми пустынями, то, наконец, цепями гор, иногда тянущимися параллельно, иногда пересекающими друг друга и образующими местами высокие вершины, покрытые вечным снегом.

Обычный грубый опыт повседневной жизни, проделанный на ограниченном участке твердой земли, не дает представления об истинной шарообразной ее форме и только сложные геодезические измерения, выполненные на поверхности земного шара, могут дать понятие об истинной фигуре земли.

Переход от представления о земле как о плоском, твердом, неизменном теле к ее научному изучению, связанному с правильной оценкой формы и размеров земного шара, совершался очень медленно, отражая на себе влияние борьбы науки с суевением, с религиозными и мистическими предассудками.

Пока приемы правильного мышления, связанные с применением логики, и основы естествознания не стали практически известны широкому кругу людей, научные данные

о форме нашей планеты были достоянием только немногих передовых ученых и философов. Обычный опыт мешал человечеству принять истины науки, которые, как казалось, противоречили здравому смыслу и ежедневному опыту. Только постепенно, шаг за шагом расширяя свой кругозор, человечество пришло к правильным представлениям о фигуре и размерах земли.

Несомненно, что первые проблески верных заключений о форме земли были связаны с мореплаванием, и наблюдения приближающихся к исследователю из-за горизонта кораблей давали прежде всего уверенность, что земная поверхность не является плоскостью, а представляется выпуклой фигурой. В самом деле, если бы земля была плоскостью, то приближающийся к нам корабль был бы с самого начала виден весь, между тем в действительности мы сначала видим вершины мачт, потом их средние части и, наконец, при еще большем приближении остов судна. Подобное явление возможно только при условии, что земля есть выпуклое тело.

Ряд ученых (Франкер, Жомар, Нетлинг и др.), изучая архитектурные памятники, оставшиеся от древних египтян, и находя интересные соотношения размеров пирамид и их частей с размерами меридиана земли Египта, полагали, что еще в древности (более чем за 1600 лет до нашей эры) люди имели ясное представление не только о фигуре земли, но и могли произвести на поверхности земли измерения, давшие точные размеры шара, являющегося местом жизни человечества. Однако с этими заключениями едва ли можно согласиться и, зная хорошо инструменты, доступные древним, их технические возможности, с одной стороны, и методы современной науки и техники, — с другой, мы должны прийти к заключению, что совпадение некоторых размеров пирамид с размерами части меридиана является случайным и несомненно, что греческим ученым принадлежат первые глубокие исследования в области изучения фигуры земли.

Трудность исследований в этой области, весьма значительная вследствие размеров земли, усугублялась еще тем, что под влиянием религиозных учений и мифологии многое, добытое учеными, игнорировалось, забывалось и получало широкое распространение примитивные, окутанные мистикой, поэтические взгляды на мироздание, на землю и ее строение. В эпоху блестящего развития греческой науки ученым приходилось часто под давлением внешних обстоятельств, связанных с суевериями, скрывать уже добытые и

доказанные наукой факты, неудобные религии. Подобное явление в учении о вселенной мы имеем не только в древности и в средние века, но и в новейший период истории, когда церковь отвергала и отвергает истины, добытые точным естествознанием.

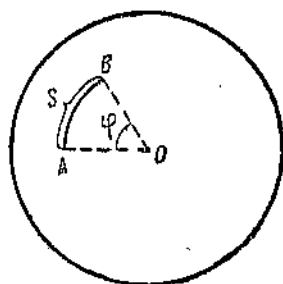
Мы приведем только два разительных примера, взятых из истории древней Греции и из истории Италии в эпоху Галилея. В Греции гениальные поэтические творения Гомера распространили среди широких масс идею о плоской земле и круглом хрустальном своде неба; и таким ученым как Фалес, Пифагор, Платон, приходилось скрывать добытые и строго доказанные наукой факты, не признаваемые религией. Еще более поразительные противоречия между истинами науки и религиозными учениями мы находим в Италии в эпоху работ Галилея, когда только что возникшее учение Коперника о вращении земли вокруг солнца не только подверглось оспариванию и гонениям, но когда ряду ученых развитие и поддержка этого учения стоило жизни.

Возвращаясь к греческой науке за 600—500 лет до нашей эры, мы видим, что общие условия, существовавшие в Греции, были неблагоприятны для развития учения о земле, для развития наук, названных впоследствии геодезией и геофизикой. Однако уже за 500 с лишком лет до нашей эры знаменитый греческий философ и математик Пифагор учил, что земля кругла. Величайший философ и ученый древней Греции Аристотель, бывший воспитателем и учителем Александра Македонского, более чем за 300 лет до нашей эры не только привел доказательства о шаровидной форме земли, но и дал ее размеры, не указывая впрочем способа их измерения. Переводя размеры четверти меридиана (так называемого квадранта), выраженные у Аристотеля в стадиях, в метры, мы находим число от $1,58 \cdot 10^7$ до $1,85 \cdot 10^7$ м (смотря по размерам стадии). В настоящее время измерения квадранта дают число $1,00 \cdot 10^7$ м. Порядок величины, как мы видим, во всяком случае Аристотелем указан правильно.

Спустя почти 100 лет после Аристотеля, знаменитый директор Александрийской Библиотеки Эратосфен дал первый точный прием определения размеров земли, принимаемой за шар. Эратосфен поступал при своих исследованиях так же, как поступают и в настоящее время геодезисты. Он определял из непосредственных измерений на поверхности земли дугу большого круга $AB = S$ (фиг. 1), проходящую

через две точки A и B , лежащие на поверхности земного шара. Одновременно при помощи астрономических измерений он находил угол $AOB = \varphi$. Деля S на угол φ , выраженный в дуговых единицах, он мог вычислить радиус земли $R = \frac{S}{\varphi}$.

Зная радиус земного шара, можно найти окружность большого круга его и его четверть — квадрант.



Фиг. 1

Измерения Эратосфена дали для квадранта земли величину $1,156 \cdot 10^7$ м, доставляя еще большее приближение к истинной величине квадранта, чем это получил Аристотель.

После Эратосфена измерения квадранта были в древности повторены Героном (около 200 лет до нашей эры) и Посидонием (около 140 лет до нашей эры).

В средние века (в 827 г. нашей эры) были выполнены замечательные измерения дуги меридиана по пред-

писанию калифа Альмамума арабскими учеными Калид-бен-Абдулмеликом и Али-бен-Изой.

Измерения дуги S и угла φ были произведены около современного Мосула и были повторены дважды, дав разницу в результатах всего в $1,2\%$.

§ 2. Триангуляция и главные результаты градусных измерений на земле, рассматриваемой как шар

(Новую эпоху в области геодезических измерений составили работы Снеллиуса (1580—1626), который дал возможность удобно и легко измерять значительные расстояния на поверхности земли. Снеллиус исходил из следующих соображений. Определить непосредственно расстояние AB (фиг. 2), имеющее длину сотни или тысячи километров, представляется делом очень кропотливым и сложным. Измерение углов даже с весьма значительной точностью является, наоборот, делом простым и легким. Исходя из этого соображения, Снеллиус свел измерения большого расстояния AB к измерениям малого расстояния Aa в десятки километров и к измерению ряда углов, зная которые, можно вычислить и длину AB . Для выполнения задачи Снел-

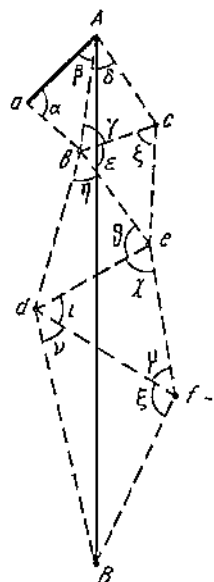
лиус намечает около дуги большого круга, соединяющей точки A и B , ряд пунктов b, c, d, e, f .

Угломерным инструментом определяются углы $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \epsilon, \zeta, \eta, \theta, \iota, \chi, \mu, \nu, \xi$. Зная расстояние Aa и углы, можно последовательно вычислить длины сторон треугольников: ab и Ab (из треугольника Aab), где длина стороны Aa найдена непосредственно измерением; Ac и bc (из треугольника Abc), be и ce (из треугольника bce), и т. д. Зная длины сторон всех треугольников, можно вычислить и длину AB .

Метод Снеллиуса получил название триангуляции, причем непосредственно измеренная длина Aa получила название базиса. Прием Снеллиуса не только ускорил и упростил определения длин на поверхности земли, но и создал метод изучения формы земли, на котором основаны все новейшие геодезические исследования, давшие точное представление о фигуре нашей планеты.

По способу Снеллиуса были произведены знаменитые исследования французского академика Пикара (1669—1670), развившие методику измерений и легшие в основу работ Ньютона о сущности сил всемирного тяготения. Пикар впервые применил для угломерных измерений трубы, что значительно уточнило исследования.

В табл. 1 мы сопоставим измерения квадранта земли, рассматриваемой как шар.



Фиг. 2

Таблица 1

Автор	Длина четверти земного меридиана (квадранта) в м	
Аристотель	1,850 · 10 ⁷	стадия древних принята равной 185 м
Эратосфен	1,156 · 10 ⁷	
Посидоний	1,100 · 10 ⁷	
Арабские ученые	1,008 · 10 ⁷	
Снеллиус и Мушенбрек	1,0004 · 10 ⁷	
Пикар	1,0009 · 10 ⁷	

Мы видим, как по мере уточнения методов измерения величина квадранта непрерывно приближалась к его точной величине $1,00 \cdot 10^7$ м, служащей для определения метра.

Так как из определения длины дуги большого круга на поверхности земли и из измерения угла, соответствующего этой дуге, легко определить длину дуги в 1 градус меридиана, то указанные выше измерения на поверхности земного шара получили название градусных измерений.

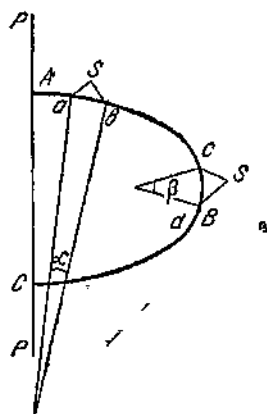
Приведенные выше исследования формы земли показали, что она в первом приближении представляет собой шар с радиусом около 6 400 км. Если принять во внимание, что неровности поверхности земли — горы и дно океанов — не превосходят десяти километров, то с точностью до 0,0016 измеряемой величины можно представить на основании предыдущих исследований землю как шар; поверхность шара показывает, таким образом, неровности, не превосходящие 0,2% от длины радиуса.

§ 3. Сплюснутость земного шара.

Новейшие успехи геодезии

Новую эпоху в учении о форме земного шара составил конец 1600-х годов, когда впервые были сделаны определения радиуса земли в разных широтах.

Если бы земля была шаром, то градусные измерения, дающие величину земного радиуса, произведенные в любых частях земной поверхности, давали бы везде одинаковую величину радиуса. Совершенно другое было бы, если бы поверхность земли была образована вращением некоторой кривой, например, вращением эллипса ABC около одной из его осей, как оси вращения PP (фиг. 3).



Фиг. 3

Находя радиус p меридианного сечения из отношения дуги ab , деленной на соответствующий угол α , мы получим, что радиус $p = \frac{S}{\alpha}$ не-

прерывно изменяется от A , где радиус наибольший, к B , где он наименьший. То же выражают, говоря, что кривизна кривой в A меньше, чем в B .

Для каждой кривой имеется определенный закон изменения кривизны вдоль кривой и, зная из опыта значения радиуса кривизны или кривизны в нескольких точках кривой, можно знать, какую форму имеет меридиан ABC изучаемого тела вращения.

К началу градусных работ в разных широтах земли было известно из гениальных исследований Ньютона, что вращающееся жидкое тело, каким должна была быть земля до момента ее остывания, должно образовать сплюснутое тело.

Первые исследования этого вопроса, выполненные французскими исследователями во главе с Кассини, показали, что земля является не сплюснутым, а вытянутым вдоль оси телом, так что кривизна увеличивается от экватора к полюсам. Это противоречило ньютоновским исследованиям. Вопрос был крайне важен не только для геодезии, но и для физики и механики, и проблема определения фигуры земли так живо заинтересовала широкую публику, что даже неспециалисты принимали участие в споре за и против ньютоновской теории тяготения, позволявшей определить теоретически форму нашей планеты.

Знаменитый французский писатель и философ Вольтер, сделавшийся во время ссылки в Англию горячим сторонником Ньютона и его учения о тяготении, резко восставал против своих соотечественников, в большинстве случаев стоявших на стороне Кассини.

Интересно отметить, что духовенство, принявшее близкое участие в этом споре, пользовалось часто совершенно недопустимыми в научных дебатах, наивными аргументами. Например, яйцевидность земли отставалась на том основании, что форма яйца является прообразом всего живущего на земле.

Спор сторонников и противников Ньютона дал повод к новым измерениям дуги меридиана на севере земного шара в Лапландии (Мопертюи и Клеро), на юге в Перу (Годен, Ла-Кондамин и Буге) и в средних широтах (Араго).

Особенно замечательны исследования, выполненные в Перу. Трудности, которые здесь приходилось преодолевать исследователям, были огромны. Дикари, среди которых приходилось жить участникам экспедиции, постоянно уничтожали геодезические знаки. Во время нападения в 1739 г. один из участников экспедиции был убит. Все измерения были произведены в местах, лежащих выше 2,5 км над уровнем моря, что еще увеличивало сложность работ.

Когда смелые и настойчивые ученые, предпринявшие знаменитые градусные измерения, вернулись во Францию, Вольтер приветствовал их стихами:

Творцы естественных наук в погоне за Колхидой новой,
Перебрались за океан и через гор хребет суровый,
Величием своих работ весь свет и землю поразили,
Когда так верно общий вид ее схватив — определили.

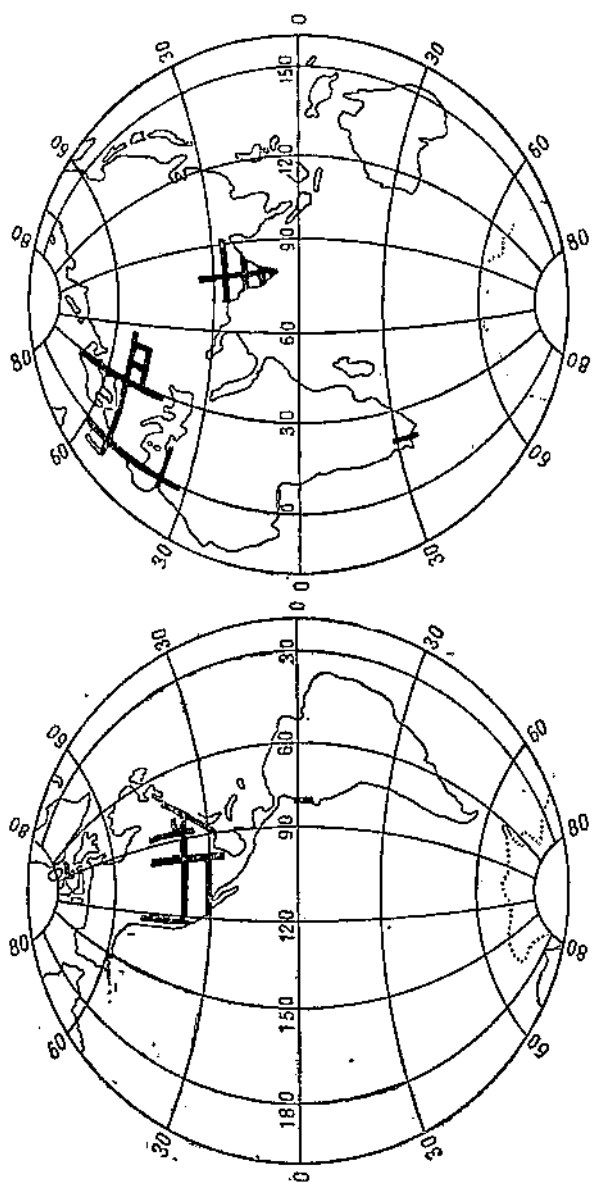
(Перевод Витковского)

В результате замечательных исследований французских ученых стало ясно, что земля является телом сплюснутым вдоль оси вращения, как этого требовала теория Ньютона, а не вытянутым, как утверждал на основании своих наблюдений Кассини. По поводу исследований в Перу и в Лапландии, установивших сплюснутую форму земли, Вольтер сказал, что участники экспедиции сплюснули не только землю, но и Кассини. С 1792 по 1798 г. французские ученые Мешень, Деламбр и Араго по постановлению Законодательного Собрания Великой французской революции выполнили новое и тщательное градусное измерение. Работа эта, предпринятая для установления метрической системы мер, является до сих пор классической и знаменует собой эпоху в области учения о фигуре земли.

Последующие периоды ознаменовались широко поставленными триангуляционными работами, предпринятыми в Германии (Гаусс и Бессель) и в особенности в России (Струве и Теннер); работы в России долгое время были несравнимым образцом по своей тщательности, точности и объему. Дуга меридиана, измеренная Струве и Теннером, превосходила 25° .

В последнее время в Америке и Европе были выполнены еще более обширные градусные измерения. До 1919 г. очень мало работ было в южном полушарии. За последние годы как раз в этой области проделано большое количество триангуляций в Аргентине, Бразилии и в Африке.

Мы должны особо отметить успехи геодезических работ в СССР. Чтобы дать понятие о росте работ в области геодезии, укажем, что до Октябрьской революции общее протяжение всех базисов в нашей стране достигало 50 км. К 1936 г. протяжение базисов было равно 1338 км, то есть общая протяженность всех базисов возросла за время советской власти в 26 с лишком раз. Число исследованных пунктов увеличилось в 13 с лишком раз. Если к этому прибавить увеличение в 15 с лишком раз числа пунктов, где определена сила тяжести, позволяющая также судить о фор-



Фиг. 4

ме земли, то становятся несомненными огромные успехи советской геодезии. Этим мы обязаны заботам о науке и ее приложениях партии Ленина—Сталина и Советского Правительства, поддерживающих все крупные научные и научно-технические начинания.

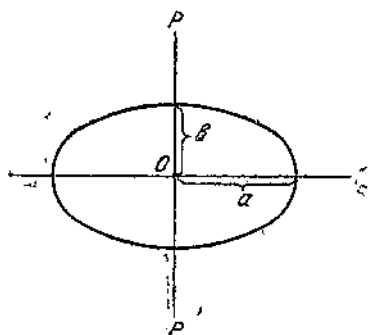
На фиг. 4 мы даем сопоставление всех триангуляций, выполненных до 1919 г. Эти триангуляции представлены непрерывными линиями.

Из выполненных за последнее время исследований особенно интересны работы в Африке, где английские геодезисты произвели градусные измерения вдоль тридцатого меридиана от мыса Доброй Надежды до Каира, охватив дугу в 61° . Африканские исследования, соединенные с европейскими, дают градусное измерение, охватывающее дугу в 109° .

Другое замечательное исследование относится к измерениям по параллели 52° — 54° . Эти измерения начинаются в Хабаровске, проходят через весь СССР, через Западную Европу и кончаются в Ирландии. Дуга, соответствующая этим измерениям по параллели, равна 145° .

§ 4. Форма земли по градусным измерениям

Считая, что земля есть эллипсоид вращения, можно, пользуясь новейшими градусными измерениями, вычислить величину большой оси a , вращающегося около оси PP' (фиг. 5) эллипса, величину его малой оси b и сжатие $\mu = \frac{a-b}{a}$.



Фиг. 5

Знаменитый германский астроном Бессель, пользовавшийся дугами французской, английской, ганноверской, датской, прусской, русской, шведской, двумя индийскими дугами и дугой в Перу, первый подсчитал a , b и μ (в 1841 г.).

В более позднее время (1866 г.) английский геодезист Кларк произвел подсчет a , b и μ , пользуясь дугами французской, английской, русской, южноафриканской, индийской и перувианской.

Если бы фигура земли могла быть представлена точно эллипсоидом вращения, оба определения должны бы были совпадать. Между тем результаты Бесселя и Кларка не совпадают, как это показывает табл. 2.

Таблица 2

Автор	a (в м)	b (в м)	$\frac{a-b}{a}$
Бессель (1841)	6 377 527	6 356 079	$\frac{1}{299,2}$
Кларк (1866)	6 378 206	6 356 584	$\frac{1}{294,9}$

Разница элементов земного эллипсоида, вычисленная Бесселем и Кларком, зависит от того, что земля является фигурой гораздо более сложной, чем эллипсоид. В вычислениях Бесселя имеются все дуги меридианов, измеренные в Европе (числом 7). У Кларка взяты только 3 европейских дуги; кроме того, у Кларка введена дуга южноафриканская, которая отсутствует у Бесселя.

Из сказанного ясно, что можно ожидать для поверхности земли в Европе лучшего совпадения с эллипсоидом Бесселя, для вычисления которого взято большее количество европейских дуг. Это и есть на самом деле.

В Северной Америке до 1880 г. пользовались для изображения фигуры земли также эллипсоидом Бесселя. Однако наблюдения показали, что в Соединенных Штатах Америки поверхность земного шара лучше представляется более сплюснутым эллипсоидом и, следовательно, для Америки должен лучше подходить эллипсоид Кларка.

В последнее время собран, как мы видели, огромный новый материал, который не подвергался общей обработке. Обработка новейших измерений особенно интересна потому, что помимо обширных градусных измерений по меридиану, имеются измерения по долготе (при широте 52° — 54°), которые охватывают почти половину параллели и которые могут решить вопрос о том, не является ли земля трехосным эллипсоидом, как это выходит из некоторых исследований финляндского геодезиста Гейсканена.

Исследования фигуры земли имеют не только огромный теоретический интерес, связанный с происхождением земного шара и с вопросами космогонии, но и величайшее практическое значение. Для вопросов составления карты страны необходимо знание формы поверхности земного шара, и это обстоятельство делает триангуляционные работы представляющими большой государственный интерес и большую важность для промышленности.

ДВИЖЕНИЯ, СОВЕРШАЕМЫЕ ЗЕМЛЕЙ

§ 5. Вращение земли около своей оси

Если наблюдать с открытого пространства ночью небесный свод, то можно легко обнаружить, что небо с бесчисленным количеством звезд совершает равномерное вращение как целое твердое тело вокруг некоторой линии, называемой осью мира. Явление вращения небесного свода было первым фактом астрономии, строго установленным человеком. Еще в глубочайшей древности пастушеские народы имели возможность наблюдать вращение небесного свода, которое привело древних греков к первым астрономическим теориям. Греки полагали, что небесный свод представляет собой твердую хрустальную сферу, на которой твердо укреплены звезды. Неизменность расстояний звезд зависела по мнению древних от того, что вращающаяся твердая хрустальная сфера удерживала звезды в неизменном взаимном положении. Более глубокое изучение небесных явлений заставило помимо основной звездной сферы, равномерно вращающейся около оси мира, допустить существование вращающихся сфер, независимых от звездной и связанных с солнцем, луной и планетами. Все сложные движения, совершаемые в нашей планетной системе, объяснялись в греческой астрономии движением сфер.

Гениальные идеи Коперника, связанные с солнечной системой, показали, что движение небесного свода, солнца, луны и планет проще и естественнее объясняется вращением земли около своей оси и движением около солнца земли и планет. Между теорией и наблюдением не было никаких противоречий и однако, несмотря на всю очевидность необходимости признания вращения земли, все же было желательно произвести непосредственный эксперимент, доказывающий, что земля вращается вокруг своей оси. Этот эксперимент был задуман и выполнен (в 1851 г.) знаменитым французским физиком и астрономом Фуко. Гениальное по простоте доказательство вращения земного шара, данное Фуко, относится как раз к тем опытам, которые лучше всего характеризуют значение эксперимента в геофизике. Фуко воспользовался для доказательства вращения земли свойством простого маятника сохранять свою плоскость качания. Подвесим тяжелый шарик P (фиг. 6) на тонкой нерастяжимой нити F к точке R дуги ST , укрепленной на центробеж-

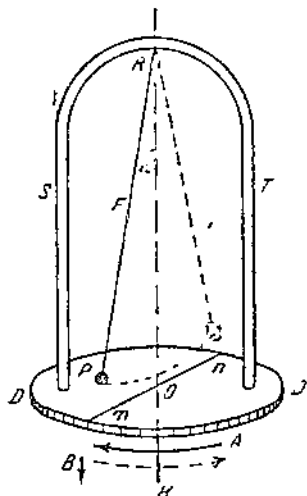
ной машине. Ось вращения машины KO проходит через точку подвеса R маятника. Гири P с нитью F — есть простейший тип маятника. Если отклонить маятник на угол α и потом его отпустить без толчка, мы заметим, что маятник будет качаться в определенной плоскости $топ$. Если мы станем вращать центробежную машину (например, по стрелке A), плоскость качания будет сохранять свое положение в пространстве. Таким образом диск машины DD , вращающийся по стрелке A , будет иметь относительное движение по отношению к плоскости качания маятника.

Пусть центробежная машина настолько велика, что на ее диске можно разместить наблюдателя, от которого все окружающее закрыто непрозрачными стенками. Плавное, равномерное вращение диска наблюдателем, находящимся на диске, не будет ощущаться и ему будет казаться, что он вместе с диском находится в покое и что плоскость качания маятника поворачивается в сторону, противоположную вращению центробежной машины. Если диск вращается по стрелке A , то наблюдателю будет казаться, что плоскость качания маятника поворачивается по стрелке B .

Мы можем представлять землю, как гигантскую центробежную машину, совершающую один оборот в сутки. Если бы можно было на северном полюсе, в месте недавней посадки экспедиции Папанина, заставить качаться маятник, его плоскость качания при вращении земли оставалась бы постоянной и наблюдателю казалось бы, что он вместе с земным шаром находится в покое и что плоскость качания маятника поворачивается в сторону, противоположную вращению земли. За сутки плоскость качания маятника повернулась бы на 360° , т. е. пришла бы в начальное состояние, при котором маятник начал свои колебания.

Как показывают вычисления, в средних широтах картина получается более сложной, но и здесь можно наблюдать эффект постоянства плоскости качания маятника.

В первый раз в грандиозном масштабе опыт с вращением земли Фуко произвел в парижском Пантеоне, воспользовав-



Фиг. 6

шись большой высотой Пантеона. К куполу Пантеона был прикреплен один конец тонкой стальной проволоки, другой конец которой был втянут в тяжелый шар. Полученный таким образом маятник мог совершать колебания в любой плоскости. Маятник мог быть без толчка отпущен, и его плоскость качания точно отмечалась на полу Пантеона. В течение определенного промежутка времени маятник поворачивался как раз на тот угол, на который он должен был повернуться по теории Фуко.

Опыт Фуко был многократно повторен во всех странах мира и везде получался предсказанный теорией результат. В настоящее время маятник Фуко имеется во всякой хорошо оборудованной физической аудитории и ежегодно демонстрируется на лекциях.

В грандиозном масштабе опыт Фуко был осуществлен в б. Храме Христа Спасителя в Москве при его постройке. В настоящее время в Ленинграде в Исаакиевском соборе производятся перед публикой демонстрации знаменитого опыта Фуко.

Второе замечательное доказательство вращения земного шара, также указанное Фуко, связано со свойствами быстро вращающихся около определенной оси тел, со свойствами гироскопа, или волчка. Если тяжелое симметрично построенное по отношению к оси тело приводится в быстрое вращение около этой оси, то тело сохраняет постоянство оси вращения и может заменить магнитный компас.

В настоящее время быстро вращающиеся симметрично построенные тела — гироскопы применяются вместо магнитного компаса на кораблях и называются гироскопическим компасом. Гироскопический компас имеет ряд преимуществ перед магнитным компасом.

Как показал Фуко, постоянство оси вращения гироскопа может наряду с маятником дать метод для определения вращения земли.

§ 6. Прецессия, нутация и движение земной оси в теле земного шара

Мы видели выше, что тяжелое тело, вращающееся около определенной оси — гироскоп, — стремится сохранить положение оси вращения. Если взять вполне однородный шар, подвешенный за центр тяжести, и заставить его быстро вращаться около одного из диаметров, мы будем наблюдать постоянство направления оси вращения. Если шар не вполне

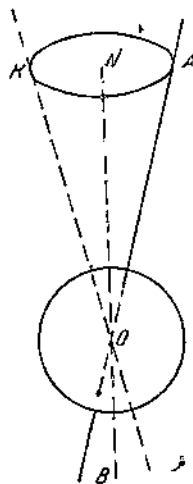
однороден или если имеются отклонения от шаровой формы вращающегося тела, отклонения, вносящие асимметрию в расположение масс, мы будем наблюдать помимо быстрого вращения шара вокруг оси OA (фиг. 7), медленные движения оси вместе с шаром по конусу AKO . Описанные движения оси гироскопа называются прецессией.

Земной шар представляется гигантским вращающимся телом, гигантским гироскопом и поэтому должен обнаруживать прецессию. Явление прецессии земного шара было открыто великим астрономом древности Гиппархом (130 г. до нашей эры). Любая точка земной оси, описывающая при прецессии замкнутую кривую, завершает движение, возвращаясь к своему исходному положению, приблизительно, в 26 000 лет. Ньютон доказал, что если бы земля была строго шарообразна и однородна, прецессии не существовало бы. Прецессия наблюдается потому, что земля эллипсоидальна и солнце изменяет положение оси земли, наклоненной к плоскости, проходящей через центры земли и солнца.

Плоскость движения луны около земли не совпадает с плоскостью движения земли вокруг солнца, составляя с этой последней плоскостью угол около 5° . Луна своим притяжением обуславливает благодаря несовпадению плоскостей движения земли около солнца и луны около земли второе изменение направления земной оси, называемое нутацией. Нутационное движение имеет период в 19 лет и накладывается на прецессионное движение, вызываемое притяжением солнца. Амплитуда нутационного движения земной оси достигает всего только $18''$, в то время как прецессия дает колебания оси с весьма значительными амплитудами, достигающими 47° . За один только год изменение положения земной оси в зависимости от прецессии составляет около $50''$. Открытие нутации принадлежит Брадлею.

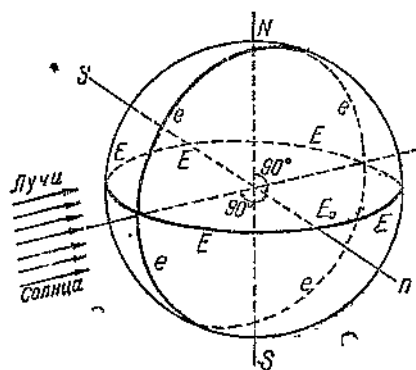
Прецессия и нутация изменяют вместе с положением оси положение земли, причем ось вращения проходит все время через одни и те же части земли.

Возможно и еще одно движение земной оси, а именно — движение оси внутри вращающегося земного шара. В то



Фиг. 7

время как прецессия и нутация имеют весьма малое влияние на изменение климата земной поверхности, движение земной оси внутри земного шара при значительных его размерах могло бы вызвать значительные изменения климата. Мы покажем это на одном простом примере. Представим, что земной шар имел в два различных геологических периода разное положение земной оси; допустим для простоты рассуждения, что ось вращения NS (фиг. 8) стояла в первом



Фиг. 8

периоде перпендикулярно лучам солнца и перпендикулярно плоскости орбиты земли около солнца. Точки экватора земли EE имели все жаркий климат и полюса N и S — холодный.

Пусть во втором периоде ось повернулась на 90° внутри тела земли; тогда точка E_0 и E_0 прежнего экватора, где в этом втором периоде проходила ось вращения земли ns , будут полюсами

и, если ось совершает движения в плоскости, перпендикулярной лучам солнца, то в n и s будет холодный климат. Точки N и S , бывшие раньше полюсами земли, сделаются точками экватора ee и вместо холодного полярного климата будут иметь жаркий экваториальный климат.

Если бы можно было найти геологические остатки, позволяющие судить о прежнем климате земли, то в точках прежних полюсов N и S (1 период) и принадлежащих в более поздний период экваториальным странам (2 период) можно было бы найти остатки полярной фауны и флоры. Наоборот, на полюсах n и s (2 период) можно было бы раскопками найти остатки экваториальных растений и животных. Геологи пытались, пользуясь допущением существования движений земной оси в теле земли, объяснить опромные изменения климатов, констатируемые геологическими раскопками. Эти объяснения вариаций климатов являются однако неприемлемыми.

Еще во время Коперника было высказано мнение, что высота полюса для любой точки земли непостоянна, в связи с чем изменяется внутри земли и положение оси ее вра-

щения. Наблюдений этого явления долгое время сделать было невозможно, зато великие математики и прежде всего Л. Эйлер (около 1750 года) выполнили глубокие математические исследования над перемещением оси вращения земли внутри нее.

В новейшее время удалось на опыте констатировать движение полюсов по поверхности земного шара. Амплитуда этих колебаний незначительна и составляет всего только 17 м на поверхности земли. Движение имеет короткий период в 14 месяцев. О движениях вековых, связанных со значительными перемещениями полюсов, до сих пор точных данных не имеется.

Можно теоретически исследовать перемещение земной оси, вызванное перемещением масс в земном шаре. Аррениус приводит следующие интересные подсчеты. Если бы переместить всю массу азиатского материка с места, им занимаемого в настоящее время, в Индийский океан, полюс переместился бы только на 40 км.

Трудно допустить такие перемещения даже при геологических переворотах и катастрофах и поэтому движение земной оси внутри земного шара не может играть роли в объяснении изменений климата земли, наблюдаемых в геологические эпохи.

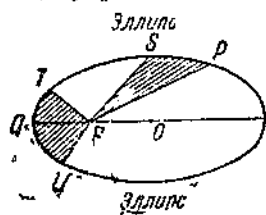
§ 7. Движение земли и планет вокруг солнца. Законы Кеплера

Земной шар представляет собой планету, принадлежащую солнечной системе и совершающую вместе с другими планетами движение вокруг солнца. Эта точка зрения была высказана в 1543 г. в бессмертной книге Коперника и явилась новой революционной идеей, против которой сейчас же ополчилось духовенство. Принятие учения Коперника стоило жизни знаменитому ученому и философу Джордано Бруно, и великий математик, физик и астроном Галилей жестоко пострадал, поддерживая «еретическое» учение Коперника, против которого восставали Ватикан и инквизиция.

Галилею принадлежит замечательное открытие, сделанное им при помощи построенного им телескопа и давшее фактическое подтверждение представлений Коперника. В 1610 г. Галилей, наблюдая спутников планеты Юпитера, обнаружил существование системы, совершенно аналогичной нашей солнечной системе, как ее представлял себе Коперник.

Несмотря на все препятствия, поставленные церковью, истинное учение постепенно прокладывало себе дорогу и сделалось, наконец, господствующей доктриной.

С качественной стороны книга Коперника вполне решала задачу о движении планет около солнца. Оставалось найти количественные законы этих движений, и эту труднейшую задачу решил Кеплер, который и установил, пользуясь наблюдениями Тихо-де-Браге, для планет в солнечной системе три закона, носящие имя Кеплеровых законов.



Фиг. 9

Первый закон Кеплера утверждал, что движение всякой планеты солнечной системы происходит вокруг солнца по эллипсу, причем солнце находится в одном из фокусов эллипса F (фиг. 9).

По второму закону Кеплера площади, описанные в разные времена радиусом-вектором, соединяющим солнце F с планетой P , равны. Таким образом, если в течение некоторого интервала времени планета из P перейдет в S , а затем в течение такого же интервала времени τ из T попадет в U , то заштрихованные площади FPS и FTU равны.

Третий закон Кеплера гласит, что квадраты времен обращения планет около солнца относятся как кубы больших полуосей a ($OQ = a$) их эллиптических траекторий.

Законы Кеплера вполне определяли при той степени точности, которая была доступна в его время, движение любой планеты по ее орбите.

§ 8. Причины движений планет около солнца.

Закон Ньютона и его приложения в солнечной системе.
Возмущенное движение

Во всякой точной науке мы встречаемся с тремя стадиями ее развития. Прежде всего открываются качественные законы изучаемых явлений. Затем находятся количественные эмпирические законы, управляющие явлениями. Наконец наступает третья стадия — стадия построения теории, объясняющей все наблюдаемые явления. Разительным образом указанного развития науки является учение о движениях в солнечной системе. Открытие Коперника описывало качественную сторону планетных движений, Кеплер дал количественные законы изучаемых явлений. Ос-

тавалось построить теорию явлений, исходящую из общих принципов, и эту задачу выполнил Ньютон в своем величайшем произведении «Математические начала натуральной философии», в котором гениальный автор «Начал» изложил принципы механики и показал, как их нужно прилагать к изучению планетных движений и к исследованию системы мира.

Ньютон исходил из основных принципов или аксиом движения и показал прежде всего, что при движениях планет около солнца должна действовать сила f , притягивающая планету по направлению к солнцу и заставляющая планету падать на солнце. Из законов Кеплера можно было вывести величину этой силы, причем она оказалась прямо пропорциональной массе солнца M и массе планеты m и обратно пропорциональной квадрату расстояния r между планетой и солнцем. Закон Ньютона для планетной системы солнца должен быть таким образом написан так:

$$f = k \frac{mM}{r^2}, \quad (1)$$

где k — постоянная, называемая постоянной ньютоновского закона гравитации, равная $6,67 \cdot 10^{-8}$, если сила выражается в динах, масса в граммах и расстояние в сантиметрах.

Если принять закон Ньютона как основу, то можно, как показали Бертран, вывести обратно законы Кеплера.

Великое открытие закона тяготения, объяснившее благодаря трудам Эйлера, Лапласа, Лагранжа и других великих математиков все движения в планетной системе солнца и распространенное позднее на все отдаленнейшие, видимые в телескоп миры, не сразу было оценено современниками, и в континентальной Европе впервые о трудах Ньютона широкая публика узнала из замечательной популярной книги Вольтера «Об элементах философии Ньютона», где знаменитый французский писатель пропагандировал великие творения гениального основателя современной механики, астрономии и физики Исаака Ньютона.

Ученые, работавшие позднее над вопросами движений небесных тел, преклонялись перед безграничной творческой силой автора «Математических начал» и их работы явились естественным завершением творений Ньютона.

На памятнике Ньютону его соотечественники поместили латинскую надпись: «Превосходивший умом человеческий род». Это мнение о Ньютоне его современников и ближайших потомков разделялось и дальнейшими

поколениями и редкие из ученых имеют такую славу и признание, как Ньютон.

Как ясно из формулы закона тяготения, в притяжениях двух масс нет ничего специфического, связанного с солнцем и планетой. Любые две массы должны притягиваться по ньютоновскому закону и, следовательно, если мы имеем на земле массу в 1 г, то эта масса притягивается землей также по закону Ньютона. Изучая теоретически это притяжение, Ньютон пришел к дальнейшему поразительному выводу, что сила тяжести на земле является частным случаем тяготения всех тел друг к другу или, как его назвали, «всемирного тяготения».

Можно вычислить без всяких предположений силу, действующую на луну по направлению к земле и удерживающую спутника земного шара на его орбите. Для вычисления этой силы по законам механики нужно знать только время обращения луны около земли и ее расстояние от земли. С другой стороны, считая, что сила тяжести изменяется по закону Ньютона с расстоянием, легко определить силу тяжести, действующую на луну. Эта последняя сила в точности равна силе, удерживающей луну на ее орбите и, следовательно, силы, обнаруживаемые между тяжелыми телами, получили полное и глубокое объяснение.

Установление закона тяготения Ньютоном показало, что Кеплеровы законы могут быть верны только для солнца и одной из планет, если остальные планеты отсутствуют. В самом деле, притяжение, существующее между солнцем и каждой из планет, должно обнаруживаться и между любыми планетами, так что сила, действующая на некоторую планету, зависит не только от ее притяжения солнцем, но и от притяжения всех остальных планет солнечной системы. Большие планеты, например Юпитер, вызывают своим притяжением отклонения от эллиптического движения, отклонения, которые носят название возмущений.

Эйлер, Лагранж, Лаплас и целый ряд знаменитых математиков XVIII и XIX столетий занимались теоретическим изучением движений планеты около солнца при одновременном возмущающем действии других планет и дали замечательные методы, позволяющие точно представить возмущенное движение.

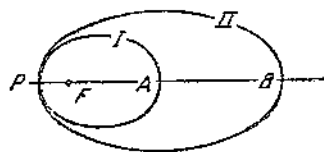
Венцом всех исследований в области учения о всемирном тяготении явились теоретические работы Леверье и Адамса, которые, изучая неправильность в движениях Урана, заподозрили, как причину этих отступлений, новую, неизвестную

планету, лежащую за пределами орбиты Урана. Для нахождения места гипотетической планеты прилагался закон Ньютона к притяжениям Урана неизвестной планетой, которая вызывала наблюдаемые отклонения в движении Урана. Положение планеты на небесном своде было точно указано Лавуазье и Адамсом и на указанном месте была действительно открыта (в 1846 г.) планета, названная Нептуном. Открытие Нептуна составляет одно из замечательных астрономических исследований, явившееся блестящим подтверждением закона Ньютона.

Как понятно из сказанного, эллиптическая орбита планеты, движущейся около солнца, должна оставаться неизменной только в том случае, если изучаемый спутник солнца был бы единственным. При наличии всех планет солнечной системы их орбиты должны изменяться от взаимного притяжения и, если бы изменение орбиты земли было значительно, это обстоятельство могло обусловить изменения климата земли в геологические эпохи.

Представим себе, что траектория земли, являющаяся эллипсом, мало отличающимся в настоящее время от круга, в некоторые периоды растягивалась, причем ее ближайшее расстояние от солнца (расстояние PF , фиг. 10) сохранялось одинаковым. Точки орбит A и B принадлежали разным орбитам, которые относились к различным геологическим эпохам. Количество солнечного тепла, получаемого в A , было бы значительно больше, чем в точке B , и это должно было сказаться на климатах земли, двигавшейся в разные геологические эпохи по орбитам I и II . Были сделаны попытки объяснить таким образом огромные колебания в температуре земли, вызвавшие глубокие геологические изменения в доисторические времена. Точные математические подсчеты показывают однако, что изменения формы орбиты земли, вызванные возмущениями, исходящими от других планет, не могут быть значительными и не могут, следовательно, резко влиять на климат земного шара.

На этом примере мы видим, какое огромное значение могут иметь для развития теорий геологии точные математические исследования в области возмущенных движений, на первый взгляд совершенно не относящиеся к проблемам геологического знания.



Фиг. 10

§ 9. Принцип относительности Эйнштейна. Его значение в геофизике

Изумительные по глубине и широте охвата работы Эйнштейна в области принципа относительности показали, что закон Ньютона, оправдавшийся при всех его проверках в течение более 200 лет, оказывается лишь первым приближением. Истинное движение планет около солнца сложнее и управляется более сложным законом, приводящим даже при существовании только одной планеты к иным законам движения планет, чем законы Кеплера:

По исследованиям Эйнштейна оказывается, что ближайшая точка планеты от солнца P (фиг. 10), ее перигелий, — не остается в пространстве постоянной, а медленно перемещается около F , совершая круговое движение. Это движение тем более быстро, чем орбита планеты более вытянута. Из планет солнечной системы только у одного Меркурия можно ожидать заметного движения перигелия, исчисляемого секундами угла в столетие.

Движение перигелия Меркурия, несмотря на свою малость, точно исследовано астрономами и не могло быть объяснено влиянием планет. Эйнштейн показал, что это явление не есть явление вторичное, зависящее от возмущений, но что закон движения одной тяжелой массы A около другой B таков, что эллипс, описываемый движущейся массой A , не остается в относительном покое, а что его перигелий совершает круговое движение около массы B . Теория относительности дала для движения перигелия Меркурия хорошо совпадающие с наблюдениями значения. Движение перигелия земли и других планет, которое необходимо допустить по теории Эйнштейна, благодаря их малости до сих пор не наблюдается.

Дальнейшим следствием принципа относительности Эйнштейна является связь массы тяжелого тела m , его энергии E и скорости света c . Эта связь выражается так:

$$m = \frac{E}{c^2}.$$

Масса измеряется в граммах, энергия в эргах, скорость света равна $3 \cdot 10^{10}$ см/сек.

По этому закону выходит, что если энергия теряется, то уменьшается и масса и, наоборот, при увеличении энергии масса увеличивается. Это поразительное следствие

принципа относительности, которое великий английский физик Резерфорд считает самым замечательным открытием двадцатого века, проверено и на опыте при ядерных реакциях в атомах, причем проверка дала блестящие результаты. С точки зрения Эйнштейна быстро движущееся тело имеет большую массу, чем тело, движущееся медленно, и земля и все планеты меняют свою массу во время движения около солнца. Изменения массы всех спутников солнца однако так малы, что практического значения в настоящее время они иметь не могут.

§ 10. Расстояние земли от ближайших звездных систем. Движение солнечной системы

Около ста лет тому назад знаменитый германский астроном Бессель поставил задачу об измерении расстояний солнечной системы и земли от так называемых неподвижных звезд. Замечательные, основанные на чисто геометрических данных, приемы Бесселя позволили определить это расстояние. Чтобы оценить расстояния земли от звезд, приходится ввести новые единицы для измерений длин. Известно, что свет пробегает в секунду 300 000 км. Свет от солнца до различных планет солнечной системы распространяется во время, измеряемое минутами. От ближайшей до земли звезды свет распространяется в несколько лет. Современные фотометрические и интерференционные методы позволяют найти расстояния таких звезд, свет от которых доходит до земли в сотни, тысячи и даже миллионы лет.

Принимая, что расстояния звезд от солнечной системы колоссальны, нужно признать, что силы, действующие между солнечной системой и миром звезд, очень малы, кроме того, эти силы направлены в разные стороны, что еще уменьшает их действие. Мы можем, таким образом, действиями звездной системы на солнце и планеты пренебрегать, и тогда солнечная система может быть рассматриваема как система свободная, которая по законам Ньютона должна или находиться в покое или совершать равномерное и прямолинейное движение.

Для изучения движения солнечной системы по отношению к миру звезд можно применить оптические методы (принцип Доплера), пользуясь которыми, доказывалось, что наша солнечная система перемещается по отношению к звездному миру в определенном направлении.

**ОПЫТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНА НЬЮТОНА.
ОПРЕДЕЛЕНИЕ СРЕДНЕЙ ПЛОТНОСТИ ЗЕМЛИ.
РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОТНОСТИ
ВНУТРИ ЗЕМНОГО ШАРА**

§ 11. Изучение закона Ньютона на земных объектах

В законе Ньютона, выражающем притяжение двух шаровых масс m и M , центры которых находятся на расстоянии r , сила, действующая на каждую из масс, равна

$$f = k \frac{mM}{r^2}. \quad (1)$$

Выведенный сначала для планетной системы солнца закон Ньютона (1) оказался справедливым и для системы земля — луна, причем, как мы видели выше, в этом случае Ньютону удалось доказать, что сила, удерживающая луну, есть ослабленная расстоянием сила тяготения земли, заставляющая падать все тяжелые тела на землю.

Естественно было попытаться доказать притяжение любых тел на земле, и впервые эта задача была выполнена Кевендишем.

Опыты Кевендиша в принципе сводились к следующему. Большой тяжелый шар, имеющий массу M , помещался против маленького, легко подвижного шарика с массой m , который при действии на него сил ньютоновского тяготения большого шара мог перемещаться тем больше, чем больше была воздействующая сила. Определяя массы шаров, их расстояние r и действующую силу f , можно было проверить верность закона Ньютона и найти величину k в формуле (1). Эта величина оказалась равной $6,67 \cdot 10^{-8}$; сила при этом выражается в динах, массы m и M в граммах и r в сантиметрах.

Опыты Кевендиша были многократно повторены Корню, Байлем, Бойсом с его же методикой. В настоящее время приборы, построенные по идее аппарата Кевендиша, имеются в каждой хорошо оборудованной физической аудито-

рии, и опыты с притяжением тяжелых тел ежегодно демонстрируются на лекциях.

Вставляя в формулу (1) значение $k = 6,67 \cdot 10^{-8}$, находим

$$f = 6,67 \cdot 10^{-8} \frac{mM}{r^2}. \quad (2)$$

§ 12. Определение средней плотности земли

Пользуясь формулой (2), можно сделать в высшей степени важные заключения о плотности вещества земного шара. Чтобы понять, как это выполняется, допустим, что у поверхности земли размещена шаровая гирилка с массой m в 1 г. На такую гирилку земной шар действует с силой в 1 г = 981 дин. Сила, действующая на гирилку, есть результат притяжения гирилки всеми частицами земли.

Как показал Ньютон, однородный шар, состоящий во всех частях из вещества одной и той же плотности, или шар, состоящий из концентрических слоев разной плотности, притягивает всякую массу, находящуюся вне его так, как-будто вся масса шара сосредоточена в его центре. Мы видели, что гирилка в 1 г притягивается землей с силой в 1 г = 981 дин, причем эта сила равна силе, которая бы действовала на гирилку в 1 г и которая исходила из массы M , равной массе земли и размещенной в центре земного шара на расстоянии 6400 км от его поверхности, где находится шарик в 1 г.

Пользуясь предыдущей формулой (2) и считая, что M есть масса земного шара, а r радиус земли, находим массу земли равной

$$M = 6,00 \cdot 10^{27} \text{ г} = 6,00 \cdot 10^{21} \text{ т.}$$

Зная радиус земли r в сантиметрах, легко найти ее объем v в куб. сантиметрах по формуле

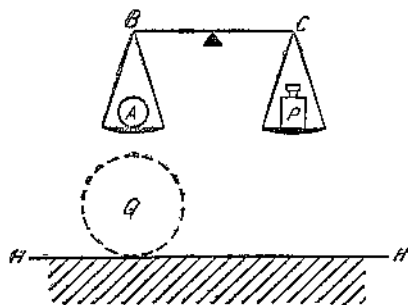
$$v = \frac{4}{3} \pi r^3$$

и тогда, деля M на v , находим среднюю плотность земли δ , т. е. ту плотность, которую имел бы однородный шар, имеющий размеры земли и обладающий одинаковой массой.

Различные авторы дают разное значение для $\delta = \frac{M}{v}$.

Наиболее вероятное значение $\delta = 5,52$.

Ввиду огромной важности определения средней плотности земли, мы укажем еще метод Жолли, позволяющий определить величину δ . Метод Жолли понятен из фиг. 11. На чувствительных весах BC уравнивается шар A гирей P . В этом случае на A действует сила притяжения земли, равная силе, исходящей из массы M грамм, помещенной на расстоянии радиуса земли r сантиметров от массы A . После уравнивания A грузом P подкладывают под A тяжелую шаровую массу Q . Притяжение A увеличится и потребуется добавление груза к чашке у C , чтобы равновесие восстановилось. Из двух опытов взвешивания A при отсутствии Q и в его присутствии можно найти массу земли и определить, таким образом, среднюю плотность земного шара. Определенное по способу Жолли значение средней плотности земли δ дает ту же величину, как и найденная по способу Кевендиша.



Фиг. 11

Как понятно из сказанного, притяжение землей и, следовательно, сила тяжести должна изменяться с высотой. В настоящее время можно построить приборы такой чувствительности, что поднятие груза на 1 м дает заметное изменение силы тяжести.

§ 13. Распределение плотности в коре и ядре земли

Средняя плотность земли, равная 5,52, значительно больше, чем плотность поверхностных горных пород (2—3) и чем плотность воды в океане (около 1). Из этого мы должны сделать заключение, что в земном шаре центральные его части более плотны, чем периферия. Найти плотность центральных частей мы однако можем только в том случае, если мы будем знать положение границы коры и центральных частей тела земли. Сейсмический метод, основанный на изучении упругих волн, распространяющихся в земном шаре из места землетрясения, дает возможность

определить границу коры и ядра земного шара и отсюда, принимая как кору, так и ядро за однородные, находят плотности ядра около 8.

Ряд астрономических явлений, связанных с движением земной оси, с движением луны, со сплюснутостью земли, с распределением силы тяжести по поверхности земного шара находятся в зависимости от распределения масс внутри земного шара. Зная эти факты, мы однако не можем вычислить распределение плотностей. Но если задаться некоторыми вероятными предположениями о законе распределения плотностей, возможно из сравнения вычисленных результатов с наблюдением определить, насколько подходят положенные в основу расчетов гипотезы.

Гельмерт, допуская определенный ход изменения плотности земли и считая, что средняя плотность равна 5,6, нашел, что центральные части земного шара должны иметь плотность 11,6.

Вихерт предположил (1897), что земля состоит из оболочки и ядра. Чтобы объяснить наблюдаемые распределения силы тяжести, а также явления прецессии и нутации, Вихерт должен был допустить для поверхностных слоев глубиной от 1500 до 1800 км от поверхности плотности от 3 до 3,4 и для центрального ядра плотность от 7 до 8,5.

В более поздней работе, основанной на более точных данных, он нашел для поверхностного слоя толщиной в 1500 км плотность 3,4, а для центрального ядра плотность 8,4.

Все приведенные данные показывают, что ядро должно иметь значительно большую плотность, чем кора, и наиболее точные данные дают для ядра плотность, немного превышающую 8.

Это число очень близко к плотности железа. Поэтому возникает естественное допущение, что центральное ядро состоит в значительной части из железа. Гипотеза железного ядра подкрепляется другими данными. Известно, что некоторые метеориты, являющиеся, повидимому, осколками разорвавшихся планет нашей солнечной системы, состоят из железа. Отсюда можно допустить, что центральное ядро разорвавшейся планеты состояло из железа. По аналогии такое же строение можно предполагать и для земли. Мы имеем еще одно соображение в пользу железного ядра земли, заключающееся в следующем.

По теории Джинса земля, как и другие планеты, образовалась из материи солнца, и состав земли должен поэтому

соответствовать составу солнца. Солнечный спектр содержит огромное количество линий железа и, следовательно, этот элемент должен встречаться на солнце в большом количестве. В поверхностных слоях земли железа очень мало и необходимо предположить, что глубокие части земли — ее ядро — содержат значительные количества железа.

Мы видим, какие глубокие вопросы ставит и решает закон Ньютона в области геофизики, и мы должны согласиться с одним из величайших математиков Лагранжем, который по поводу открытия Ньютоном закона всемирного тяготения сказал: «Ньютон — величайший гений и счастливейший из всех, так как законы вселенной можно открыть только однажды и Ньютон их открыл».

Глава 4

ТЕОРИЯ ФИГУРЫ ЗЕМЛИ. ФОРМУЛА КЛЕРО И ЕЕ ПРИЛОЖЕНИЯ. ЛУННО-СОЛНЕЧНЫЕ ПРИТЯЖЕНИЯ

§ 14. Развитие теоретических исследований в области учения о фигуре земли. Работы Клеро

Как известно из данных астрофизики, земля представляла в начальные стадии своего существования газообразно-жидкую, отделившуюся от солнца массу, совершающую вращение около определенной оси. Жидкое состояние земли позволило ей принять форму, близкую к шаровидной, и в этом виде земля, остывая, покрывалась корой и обратилась в твердое тело той же фигуры, какую имела жидкая земля. Если бы земля не была вначале жидкой и состояла только из твердых частей, то, как правильно отметил известный физик и астроном Араго, она должна была бы получить случайную форму, независимую от вращения и зависящую от случайного распределения ее твердых частей.

Для развития учения о фигуре земли гипотеза об ее жидком начальном состоянии является таким образом основной, естественной, необходимой базой.

Ньютон был первым, кто попытался подойти к изучению фигуры земли теоретически, рассматривая современную форму ее поверхности, как результат отвердевания жидкой расплавленной массы, вращающейся около своей оси. Исследования Ньютона показали, что жидкое однородное тело должно при вращении образовывать сплюснутую вдоль

оси вращения фигуру. Результат, найденный Ньютоном, был подтвержден Маклореном, доказавшим, что в первом приближении вращающаяся жидкость принимает форму эллипсоида вращения около малой оси, так называемого сфероида вращения (эллипсоид Маклорена). После Ньютона и Маклорена вопросом о вращающейся жидкой массе занимались крупнейшие математики, и вопрос о форме земли и форме планет, в связи с космогонией, явился надолго модным в науке вопросом. Великий голландский математик, физик и астроном Гюйгенс посвятил ряд своих исследований движению и вращению жидкостей, установив замечательный принцип, позволяющий определять форму поверхности движущейся жидкости, частицы которой не обнаруживают взаимного перемещения или, как говорят, находятся в относительном равновесии. Принцип, доказанный Гюйгенсом; сводился к тому, что находилось направление равнодействующей силы у поверхности движущейся жидкости, при котором было невозможно перемещение частиц вдоль поверхности. Принцип Гюйгенса впоследствии многократно применялся при изучении формы вращающейся жидкости.

Эпоху в учении о фигуре земли составили замечательные работы знаменитого французского математика и физика Клеро, принимавшего участие во французском градусном измерении, установившем путем наблюдений сплюснутость земли. В 1743 г. Клеро опубликовал свои исследования над формой земли в классическом, сохранившем свое значение до сего времени исследовании «О фигуре земли», в котором им разобрана теория вращения жидкой массы с такой подробностью и точностью; что в течение почти столетия не было работ, которые бы вносили новые крупные идеи и давали бы новые результаты в учение о фигуре земли.

Основывая свои исследования на строгих принципах гидростатики, Клеро прежде всего доказал, что однородная тяжелая вращающаяся жидкость принимает форму оплоснутого тела вращения, которое в первом приближении является эллипсоидом. При выводе предполагалось, что вращение жидкости происходит в пространстве, где, кроме сил взаимного притяжения масс по закону Ньютона, нет никаких сил. В неоднородных вращающихся жидкостях, состоящих из слоев разной плотности, возможны также вращения, когда наружная поверхность слоистого тела имеет в первом приближении форму эллипсоида.

Одним из интереснейших результатов, имеющих огромное значение в современной геофизике, является вывод замечательной формулы, названной впоследствии формулой Клеро и позволяющей вычислить сплюснутость эллипсоидальной вращающейся массы жидкости по ускорению силы тяжести на экваторе и на полюсе.

Вывод формулы Клеро, сделанный первоначально для однородной вращающейся жидкой массы, был далее обобщен на неоднородную, медленно вращающуюся жидкость.

Чтобы на практике по методу Клеро найти сплюснутость земли, вычисляют по эмпирическим формулам, пользуясь многочисленными наблюдениями силы тяжести в разных точках земного шара, ускорение силы тяжести на полюсе и на экваторе. Зная эти величины, находят по формуле Клеро сплюснутость.

Впоследствии было доказано, что при более строгом решении вопроса, если не ограничиться только первым приближением, получается для вращающегося однородного жидкого тела гораздо более сложная фигура его поверхности. Масса вращающейся жидкости является ограниченной поверхностью вращения кривой¹, которая, касаясь на полюсе и на экваторе эллипса Клеро, дает максимальное расхождение при 45° , где кривая меридианного сечения и эллипс Клеро отстоят друг от друга на 16,8 м. Расхождение по отношению к радиусу земли в 6 400 км составляет величину менее трех миллионных, так что им можно всегда пренебрегать при практической оценке формы земли.

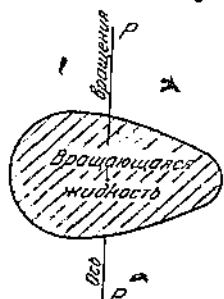
§ 15. Работы Якоби, Ляпунова, Пуанкаре и Дж. Дарвина по изучению форм равновесия вращающихся жидких тел

Простые эллипсоидальные тела вращения или близкие к ним фигуры вращения, получающиеся при более точном решении вопроса, не являются единственно возможными формами равновесия вращающейся жидкости. Было обнаружено, что фигуры равновесия вращающихся масс могут значительно отличаться от фигур вращения и быть несимметричными по отношению к оси вращения.

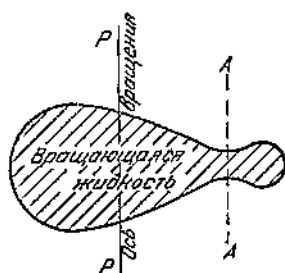
Первой и замечательной работой в этом направлении явилось опубликованное в 1834 г. исследование знаменитого кенигсбергского математика Якоби, доказавшего, что

¹ 14 порядка.

при определенной скорости вращения фигурой равновесия вращающегося однородного жидкого тела может быть трехосный эллипсоид. Работа эта произвела огромное впечатление в научном мире, вызвав в то же время ряд серьезных возражений. Тщательная проверка исследований Якоби доказала, однако, правильность его заключений, которые и легли в основу объяснения периодичности яркости света, испускаемого переменными звездами. Если звезда, состоящая из жидких расплавленных масс, представляет собой вращающийся около наименьшей оси трехосный якобиев эллипсоид и если эта ось перпендикулярна к линии, по которой наблюдатель видит звезду, то площадь ее видимого сечения и количество света, испускаемое ею, меняются от минимума до максимума.



Фиг. 12



Фиг. 13

Еще более поразительные результаты были получены тремя знаменитыми современными геометрами А. М. Ляпуновым, Анри Пуанкаре и Дж. Дарвиным. Их исследования привели к весьма важным теоретическим результатам, доказав возможность существования новых форм равновесия вращающихся около оси PP (фиг. 12) жидкостей, имеющих грушевидную форму.

Если исследования Якоби о возможности фигур равновесия, имеющих форму трехосного эллипсоида, произвели на ученый мир весьма большое впечатление, то полное удивление произвело открытие фигур равновесия грушевидной формы.

Работы над грушевидными фигурами равновесия явились источником новых замечательных математических методов и дали новые крупные результаты для космогонии.

При несимметричных грушевидных формах возможно образование неустойчивых фигур (фиг. 13), приводящих при отщуровывании по линии AA к образованию спутника,

вращающегося вместе с основным телом. Таким путем могла образоваться луна, являющаяся спутником земли. При образовании спутника основное тело планеты имеет несимметричную форму, и асимметрия фигуры планеты после отделения спутника выравнивается только весьма постепенно, превращаясь в близкое к эллипсоиду тело.

При отделении луны от земли должны были происходить процессы, представленные на фиг. 13. Возможно, что до настоящего времени земля еще не оправилась от катастрофы, связанной с отделением луны, и сохраняет в себе черты не вполне эллипсоидального тела. Мы видели, что различным образом вычисленные эллипсоиды для земли имеют разную сплюснутость, зависящую от того, в каких частях земного шара лежали дуги меридиана и параллели, по которым можно определять постоянные земного сфероиды. Это может зависеть от того, что земля не является эллипсоидом, а представляет собой более сложную фигуру.

§ 16. Определение сплюснутости земного эллипсоида (сфероиды) из наблюдений силы тяжести

Чтобы определить сплюснутость земли по многочисленным наблюдениям силы тяжести в разных точках земного шара, Гельмерт воспользовался формулой, связывающей ускорение силы тяжести g с широтой места наблюдения φ и имеющей вид

$$g = g_0 (1 + a \sin^2 \varphi). \quad (3)$$

g_0 есть ускорение силы тяжести на экваторе (широта $\varphi = 0$) и $g_1 = g_0(1+a)$ есть сила тяжести на полюсе ($\varphi = 90^\circ$).

Работы Гельмерта, охватившие многочисленные наблюдения над величиной g в разных точках земного шара, показали, что формула (3) лучше всего удовлетворяет действительным наблюдениям, если положить

$$g = 978,052 (1 + 0,005285 \sin^2 \varphi). \quad (4)$$

Отсюда находят легко ускорение силы тяжести на экваторе ($\varphi = 0$) и на полюсе ($\varphi = 90^\circ$), откуда и вычисляется по формуле Клеро сплюснутость земного сфероиды. Сплюснутость оказывается равной

$$\mu = \frac{1}{296,9} = 3,37 \cdot 10^{-3}.$$

Сплюснутость земного сфероиды, найденная из наблюдений силы тяжести, лежит между величиной, найденной Бесселем, и величиной, определенной Кларком.

Таблица 3

Метод определения μ	Автор	Сплюснутость μ
Триангуляция	Бессель	$\frac{1}{299,2} = 3,34 \cdot 10^{-3}$
Сила тяжести	Гельмерт	$\frac{1}{296,9} = 3,37 \cdot 10^{-3}$
Триангуляция	Кларк	$\frac{1}{294,9} = 3,39 \cdot 10^{-3}$

Крайние отклонения не превышают $2\frac{0}{10}$ (1,7%). Особенно интересным для определения сплюснутости сфероида является метод наблюдения силы тяжести потому, что он позволяет найти форму земного сфероида для тех мест, где невозможны обычные геодезические операции, например, в океанах. Мейнец, построив особые маятники, позволяющие работать при качке, сделал целый ряд наблюдений в подводной лодке в океане. Эти наблюдения могут дать результаты выдающегося интереса.

Сторгие и точные обработки более многочисленных наблюдений привели к заключению, что формулы (3) и (4) настоящего параграфа не выражают изменения g по поверхности земного шара. Изменение сложнее, чем дает простейшая формула, и сила тяжести зависит еще от долготы. Был предложен ряд эмпирических формул для выражения g . Мы не будем останавливаться на этом, пока еще не достаточно ясною вопросе.

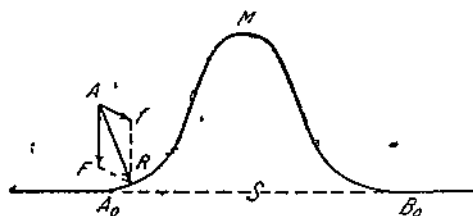
§ 17. Геоид

Мы видели выше, что все подсчеты, сделанные на основании определений как геодезических, так и гравитационных, основанных на измерении силы тяжести, приводят к одному: поверхность земного шара может быть представлена без больших погрешностей поверхностью эллипсоида вращения, поверхностью сфероида.

На поверхности сфероида равнодействующая складается из силы тяготения всех частей земли и из центробежной силы. Эту равнодействующую мы будем называть силой тяжести. По принципу Гюйгенса сила тяжести должна стоять нормально к поверхности сфероида. На самом деле этого нет, и во многих случаях ясны причины отклонения.

Пусть между точками A_0 и B_0 (фиг. 14) сфероидальной поверхности земли возвышается гора M . Если бы горы не было, на груз, помещенный в A , действовала бы по нормали к сфероиду сила F . Благодаря притяжению горы возникает вторая сила f . Равнодействующая сил F и f есть сила R , которая не будет нормальна к сфероиду. Таким образом вертикальные линии или, как их называют, отвесы, будут отклонены.

Как легко понять, отклонение отвеса наблюдается не только при появлении над идеальной сфероидальной поверхностью земли гор; отклонение наблюдается и в том



Фиг. 14

случае, когда под землей находятся скопления более плотных масс, когда там расположены, например, залежи магнетита. В этом случае при полной идеальной горизонтальности поверхности почвы силы притяжения, исходящие из подземных тяжелых масс, будут вызывать отклонение вертикала.

Если представить, что в целой серии точек поверхности реального земного шара определено направление силы тяжести, и если ко всем этим направлениям проведена поверхность, к которой силы тяжести нормальны, мы получим сложную геометрическую поверхность, зависящую не только от рельефа земной поверхности, но и от расположения ближайших к поверхности подземных масс. Полученная таким образом поверхность носит название геоида. Как показывают расчеты, геоид дает представление о всех изменениях структуры земли и о всех изменениях ее рельефа, причем отклонение геоида от сфероида всегда меньше, чем отклонение от сфероида реальной поверхности земли.

§ 18. Влияние солнца и луны на положение вертикала

Как мы видели выше, положение отвеса складывается из притяжений всех частиц земного шара на данную массу, лежащую у поверхности земли, и из центробежной силы, действующей на ту же массу. Если вращающийся земной шар был бы жидким, его поверхность была бы всегда нор-

мальна к силе тяжести. На тяжелую массу, помещенную у поверхности земли, помимо составляющих силы тяжести, а именно двух сил — силы ньютоновского притяжения частиц земного шара и центробежной силы, действуют еще силы тяготения, исходящие от солнца и луны. Лунно-солнечные притяжения гораздо меньше, чем силы притяжения массы земного шара и центробежная сила, составляющие силы тяжести, и могут быть открыты только при тонких и точных методах наблюдения.

Изучение сил солнечно-лунных притяжений было впервые задумано гениальным физиком и химиком М. В. Ломоносовым. Идея Ломоносова была очень проста. Он брал тяжелый шар, подвешенный на длинной и тонкой нити. Силы действия луны и солнца должны были дать горизонтальные составляющие, действующие на шар и отклоняющие его из его положения равновесия. Чем длиннее нить, тем заметнее должны быть отклонения маятника. Метод Ломоносова, верный в идее, не был достаточно точным и не дал на практике положительных результатов. Во всяком случае эффект, ожидаемый Ломоносовым, должен был бы получиться, если бы земля была совершенно твердым телом.

Наоборот, если бы земля была вполне жидкой массой, покрытой тонкой твердой оболочкой, принимающей форму находящейся под ней жидкости, то эффекта солнечно-лунного притяжения не было бы совершенно.

Геккер и Швейдар предприняли дальнейшее изучение эффекта, предполагаемого Ломоносовым, со всей точностью, допускаемой современной физической техникой. Зная массы солнца и луны и их расстояние до земли, можно было по закону Ньютона подсчитать силы лунно-солнечных притяжений и сравнить перемещения частей приборов, вычисленные по теории, с перемещениями, непосредственно наблюдаемыми на опыте.

Из опытов Геккера и Швейдара оказалось, что земля не может быть рассматриваема как совершенно твердое тело, как это можно было предполагать в упрощенной теории явления; земля деформируется под влиянием притяжений луны и солнца, как всякое реальное твердое тело, обладающее определенной упругостью.

ТВЕРДАЯ ОБОЛОЧКА ЗЕМНОГО ШАРА

Глава 5

ОБРАЗОВАНИЕ ЗЕМНОЙ КОРЫ. ЕЕ ВОЗРАСТ

§ 19. Охлаждение земли и ее отвердевание. Возраст земли

Земной шар представлял по теории Джинса в начальные периоды своего существования, после отделения его от массы солнца, расплавленное тело, излучавшее в космическое пространство огромное количество лучистой энергии, потеря которой вела к постепенному охлаждению земли. Охлаждение с поверхности приводило к тому, что поверхностные слои, делавшиеся более холодными и плотными, опускались глубже внутрь земли, вытесняя на поверхность внутренние, более горячие массы. Возникшие благодаря перемещению частей жидкости разной температуры конвекционные токи перемешивали жидкие массы земного шара, уменьшая разницы их температур на различных глубинах под поверхностью. Когда охлаждение поверхности дошло до такой температуры, ниже которой наступало отвердевание горных пород, составлявших массу земли, образовались твердые островки, которые, будучи удельно тяжелее, чем жидкость, их образовавшая, опускались под поверхность, подвергаясь снова расплавлению. При дальнейшем постепенном охлаждении температура достигла наконец такой величины, при которой поверхностные отвердевшие горные породы, опускаясь внутрь, не превращались в жидкость, а оставались твердыми, заполняя постепенно внутренние части земного шара. Процесс заполнения продолжался до тех пор, пока весь земной шар не был выпол-

нен твердыми массами с расплавленной магмой между ними. После этого образовавшиеся на поверхности земли твердые массы постепенно создали сплошную твердую оболочку, которая вначале имела температуру отвердевания горных пород (от 1000 до 2000° С).

Образование твердой оболочки было началом быстрого охлаждения поверхности земли.

Время, протекшее от момента отделения земли от солнца до образования твердой сплошной коры, по всем данным чрезвычайно велико. Точного подсчета этого времени, однако, сделать нельзя.

Если известны теплопроводность коры земли и начальная температура твердой ее поверхности, можно подсчитать время, потребное на остывание раскаленного тела земли до такого состояния ее, когда по поверхности можно было ходить без боязни ожога.

Как показывают точные подсчеты В. Томсона и Кирхгофа, это время очень невелико. Через год после образования твердой раскаленной коры земного шара поверхность земли приняла температуру, близкую к современной.

Совершенно другого порядка получаются цифры при определении времени, протекшего с того момента, когда поверхность земли приняла температуру, наблюдаемую в настоящее время, и до того момента, когда распределение температуры внутри земного шара стало таким, каким мы его наблюдаем в настоящее время.

Это последнее время по новейшим исследованиям составляет около 22 миллионов лет, причем начальная температура поверхности земли принята в 1000° С, т. е. весьма близкой к температуре вытекающих из недр земли лав.

Температура лав должна лишь незначительно разниться от температуры внутренних частей земного шара.

Из сказанного мы видим, что теоретический разбор вопроса об охлаждении земного шара показывает, что земля является твердой не только на своей поверхности, но что вся масса земного шара должна состоять из твердых частей. Данные, полученные современной физикой, рисуют нам внутреннее состояние земли совершенно иначе, чем это представляли себе ученые середины прошлого столетия, полагавшие, что внутренность земли остается жидкой и даже газообразной до настоящего времени.

Основанием для такого представления явилось то обстоятельство, что температура от поверхности в глубь земли регулярно поднимается на 1° при углублении на 30 м.

Повышение температуры не везде одинаково, есть места, где температура поднимается на 1° при меньшем углублении под поверхность, есть места, где температура растет медленнее и нужно углубиться значительно больше, чем на 30 м, чтобы получить повышение температуры в 1° . Считая в среднем, что на 30 м углубления имеется повышение в 1° , мы можем предположить, что повышение идет пропорционально углублению, и найти, что на глубине 3 км температура будет достигать 100° , на глубине 30 км 1000° и, наконец, при глубине в 60 км температура будет выше температуры поверхности, примерно, на 2000° . Здесь, по мнению ученых прошлого века, должна лежать граница твердой оболочки земли и глубже лежащие слои должны быть сплошь жидкими. Мы видим, что теоретическое изучение охлаждения земного шара заставляет отвергнуть представление о жидком состоянии всего земного шара. Землю нужно представлять как твердое тело, внутри которого могут быть полости, заполненные расплавленной массой.

Проблема охлаждения земли при излучении с ее поверхности и исследования одновременно возникающих конвекционных токов в жидком теле земли в настоящее время еще не разрешены. Решение этой задачи, имеющей огромное значение, должно объединить работы математиков, механиков и физиков, что позволит нам глубже проникнуть в прошлое земного шара.

§ 20. Возникновение океанов, морей и рек

Как мы видели выше, твердая оболочка земного шара образовалась в результате охлаждения земли и покоится на твердых массах, заполняющих внутренность земного шара. Дальнейшее охлаждение твердого слоя оболочки привело к тому, что поверхность земли постепенно получала все более и более низкую температуру, дойдя, наконец, до 100°C . Дальнейшее понижение температуры имело для поверхности земли колоссальное значение. Вид земли до того момента, когда ее температура стала ниже 100° , напоминал пустыню. Нигде не было воды, не было ни океанов, ни морей, ни озер, ни рек, ни ручьев. Вся вода в виде паров носилась в атмосфере и так как при этих условиях не могло быть растительности, это еще больше усугубляло сходство земли с пустыней. Понижение температуры поверхности земного шара ниже 100° сразу вызвало конденса-

сацию воды. Вода не могла находиться в воздухе в парообразном состоянии и значительная часть ее выпала в виде грандиозного дождя на землю. Все углубления поверхности земли наполнились водой и, таким образом, образовались первичный океан, моря, озера и реки. Выпавшая на землю в виде дождя вода не содержала солей, и первичный океан отличался от современного тем, что его вода была близка по составу к дистиллированной воде.

§ 21. Соли доставляются океану реками. Возраст земли, определяемый из солености океанов

Реки, протекая по руслу, состоящему из горных пород, содержащих в себе растворимые соли, несли растворы их в океан, воды которого, испаряясь и поднимаясь в виде паров с теплым воздухом в верхние слои атмосферы, снова конденсировались после охлаждения в мельчайшие капельки, собиравшиеся в виде облаков над землей. Перенос облаков и выпадение дождя пополняли в реках, морях и океанах убыль воды вследствие ее испарения. Таким образом, устанавливался круговорот воды, при котором вода океанов переходила в водяные пары воздуха и после конденсации, в виде облаков, снова выпадала в виде дождя и снега на землю, на горы, давая потоки воды в реки, питающие моря и океаны.

Вследствие постоянного притока растворов солей, доставляемых реками, вода океанов все более и более обогащалась солями. Зная ежегодное количество соли m , доставляемое океану реками, зная количество соли M , находящееся в океане в настоящее время, можно найти количество лет τ , необходимое для того, чтобы соленость океана достигла современной величины. Этот период τ определяется таким образом по формуле

$$\tau = \frac{M}{m}. \quad (5)$$

Время τ представляет собой возраст земли, найденный из солености океанов. При подсчете мы делаем предположение, что количество ежегодно доставляемой реками соли в океан есть величина постоянная. Количество соли, растворенной в водах океана, равно, как и количество соли, доставляемое реками ежегодно в океан, можно с некоторым приближением определить на основании многочисленных наблюдений экспедиций, изучающих рельеф дна океа-

на и рельеф рек, и скорость их течения. Это позволяет найти объем воды в океане и объем воды, вливаемой реками в океан. Зная концентрацию солей в океане и в реках, находят количество соли в океане и количество соли, ежегодно доставляемое реками в океан; отсюда находят τ .

Найденный таким образом возраст земли оказывается по исследованиям английских и американских ученых равным от 80 до 95 миллионов лет.

Возраст земли, найденный из солёности океанов, несомненно преуменьшен, так как земля, покрытая твердой оболочкой, не имела вначале гор и горных хребтов. Равнины были преобладающим пейзажем первых стадий существования нашей планеты. Течение воды в реках при меньших наклонах русла рек было медленнее и величина ежегодно доставляемой в океан соли была меньше современного количества. Отсюда ясно, что τ , найденное методом исследования солёности океанов, преуменьшено.

§ 22. Возраст земли, определяемый из океанских отложений

Можно определить возраст земли, зная количество доставляемых ежегодно осадков, отлагающихся на дне океанов и морей, и определив толщину всех осажденных пород. Начало счета времени относится к тому моменту, когда впервые стали отлагаться осадки и когда температурные условия не отличались значительно от современных. Полученный по методу изучения осадков возраст земли определяется приблизительно в 90 миллионов лет.

Подсчеты возраста земли по трем методам — по методу изучения тепловых явлений в земле, по методу исследования солёности океанов и по методу определения толщины осадочных пород — дают в отдельных рядах наблюдений числа, колеблющиеся от 22 до 95 миллионов лет. Наименьшие значения получаются из тепловых определений; исследования солёности океанов и толщины осадочных пород дают колебания в различных рядах наблюдений от 70 до 95 миллионов лет. Интересно сопоставить полученные современной наукой числа с числом в 5508 лет, которое считает от начала мира до нашей эры библейская история.

Примитивному человеку период в 5508 лет казался огромным, между тем как современному ученому, вооруженному всеми данными точной науки, прекрасно известно, что даже число в 95 миллионов лет не является чем-то очень большим. Он знает, что в течение этого времени

должны были протечь процессы эволюции животного и растительного мира, изменившие поверхность нашей планеты и превратившие ее из безжизненного состояния пустыни в ее современный вид.

§ 23. Необходимость добавочных источников тепла в коре земли. Радиоактивные явления

Методы определения возраста земли, применяемые геологами, а именно метод солености океанов и метод, основанный на изучении толщины осадков на дне океанов и морей, приводят к значительно большим цифрам для возраста, чем более точные методы термические. Геологические методы дают цифры около 90 миллионов лет. Физические, термические методы дают 22 миллиона лет. Расхождение возраста земли, определяемого разными методами, не может быть объяснено ошибками измерений физических постоянных горных пород, и единственно, что могло объяснить расхождение результатов термических и геологических методов, это присутствие в коре земли новых источников тепла, не принятых во внимание Томсоном и его последователями.

В самом деле, если земной шар только что покрылся твердой раскаленной оболочкой с температурой около 1000° , то наружные слои каменной коры земли быстро отдавали тепло. Из более глубоких горячих частей земли тепло подтекало медленно, благодаря весьма малой теплопроводности минералов, образующих земную кору. Поэтому достаточно только года, чтобы наружные части каменной оболочки земли охладились до современной температуры. Плохая теплопроводность делает то, что в эти начальные моменты жизни земли на небольшой глубине наблюдалась высокая температура; подток тепла из глубины, ведущий к охлаждению земного шара, происходил и происходит с весьма малой скоростью. Постепенно отдавая свое тепло наружу, внутренние части земного шара охлаждались, и разность температур слоев, лежащих на определенной глубине, и наружных слоев делалась с течением времени все меньше и меньше.

Если в коре земли можно было бы найти такие процессы, которые, развивая тепло, замещали бы ушедшую наружу тепловую энергию внутренних слоев, то охлаждение было бы гораздо медленнее, и возраст земли, вычисляемый по изменению температуры с глубиной, у поверхности был

бы найден более значительным. Процессы, развивающие тепло, могли бы достигать такой интенсивности, что все ушедшее внутреннее тепло замещалось бы теплотой, вновь возникающей от процессов, выделяющих тепловую энергию. Могло казаться, что разность температур с глубиной не изменяется или даже нарастает со временем.

Вопрос заключается только в том, можно ли найти такие процессы. Попытки привлечь для объяснения более медленного охлаждения земли химические реакции не привели ни к чему, и возможность получения физическими и геологическими методами одного и того ж возраста земли стала реальной только после открытия явлений радиоактивности.

§ 24. Радиоактивные элементы, их свойства. Процессы, наблюдаемые при радиоактивном распаде

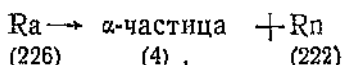
Начало настоящего столетия ознаменовалось рядом великих открытий, произведших полную революцию в учении о материи и энергии. Вслед за открытием (1895) Рентгеном лучей, носящих его имя, последовал ряд замечательных исследований Беккереля, Марии Кюри-Склодовской, Пьера Кюри и Резерфорда, показавших, что среди элементов имеются особые неустойчивые виды, атомы которых самопроизвольно распадаются, давая новые тоже самопроизвольно распадающиеся элементы. Такие элементы были названы радиоактивными, и явление распада простых тел — радиоактивностью.

При распаде радиоактивные атомы могут выделять положительно заряженные атомы гелия с атомным весом 4 и с двумя зарядами (так называемые α -лучи). Кроме α -лучей из радиоактивных тел выделяются отрицательные электроны с массой в $\frac{1}{1840}$ долю атома водорода — так называемые β -лучи. Наконец, при радиоактивном распаде может излучаться эфирная, аналогичная свету или рентгеновским лучам радиация, так называемые γ -лучи. γ -лучи имеют длину волны, значительно меньшую, чем рентгеновские лучи.

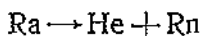
Чтобы привести иллюстрацию простейших радиоактивных превращений, мы рассмотрим распад атома радия, имеющего атомный вес 226. Атом радия выбрасывает α -частицу (атомный вес 4) и превращается в emanацию радия с атомным весом 222.

Радий переходит в α -частицу + эманация радия.

Пользуясь химическими знаками, мы можем написать реакцию так



или, что то же самое



Числа 226, 222 и 4, поставленные в скобках, представляют атомные веса радия, эманации радия и гелия (α -частица). Эманация радия в свою очередь переходит в RaA, RaB, RaC и т. д. и, наконец, после выбрасывания 4 атомов гелия (четырёх α -частиц) в нерадиоактивное тело с атомным весом 206. Такого элемента в периодической системе элементов Менделеева нет.

Второй ряд радиоактивных элементов начинается с тория, превращающегося в газообразную эманацию тория и далее в ряд твердых радиоактивных элементов — торий А, торий В и т. д. В конце концов радиоактивные превращения дают элемент с атомным весом 208, которого также нет в системе Менделеева.

Изучение элементов с атомными весами 206 и 208 показало, что мы имеем дело с простыми телами, не отличающимися химически от свинца. Элемент с атомным весом 206 получил название радиосвинца, элемент с атомным весом 208 — торioso свинца; атомы радиосвинца и торioso свинца являются атомами с одинаковыми химическими свойствами, но разным атомным весом. Элементы, обладающие такими свойствами, получили название изотопов. Два свинца $\text{Pb} = 206$ и $\text{Pb} = 208$ являются, таким образом, двумя изотопами свинца.

Замечательный физический метод, разработанный на основе исследований Дж. Дж. Томсона, Астроном, позволил открыть огромное количество изотопов у всех элементов. Интересно, что если у элементов атомный вес дробный, как например, у хлора ($\text{Cl} = 35,45$), то это значит, что атомы данного элемента имеют разные атомные веса; оказалось, что у хлора один сорт атомов имеет атомный вес 35, другой сорт 37. Изотопы в последнее время открыты у самого

легкого элемента — у водорода. Их атомные веса 1, 2 и 3. Изотопы в настоящее время могут быть получены в виде чистых веществ.

По современным представлениям атомы элементов состоят из сложного положительно заряженного ядра, вокруг которого движутся отрицательные электроны. Число электронов равно числу положительных зарядов ядра, которое равно порядковому номеру элемента в периодической системе. Так, водород, первый элемент в системе Менделеева, имеет ядро с одним положительным зарядом. Ядро гелия — второго элемента — несет два заряда. Третий элемент — литий — включает в ядре три положительных заряда и т. д.

Ядра состоят из положительно заряженных частиц с массой, равной массе ядра водорода и называемых протонами, и из почти равных им по массе, но нейтральных частиц — из нейтронов.

При радиоактивном распаде разложению подвергается только ядро, причем нейтрон, выбрасывая отрицательный электрон (β -частицу), превращается в положительный протон. Два протона и два нейтрона, соединяясь вместе, дают одну α -частицу.

Выбрасывание α -частиц в разных атомах одного и того же радиоактивного элемента совершается всегда с одной скоростью. Зная скорость α -частиц, можно подсчитать энергию, теряемую за единицу времени массой данного радиоактивного элемента и превращающуюся в тепло.

Вылетание β -частиц происходит с разной скоростью и с разной энергией у разных атомов одного и того же элемента. Подсчеты показывают, что тепловые действия радиоактивных элементов зависят почти исключительно от их α -лучей.

§ 25. Содержание радиоактивных элементов в коре земли и их роль

Из анализа минералов земной коры мы получаем, что различные породы, заключающиеся в ней, содержат на 1 г породы от $11 \cdot 10^{-13}$ до $31 \cdot 10^{-13}$ г радия. В метеоритах, имеющих характер каменных пород, радий встречается в количестве около $7,4 \cdot 10^{-13}$ г на 1 г породы. В железных метеоритах содержание радия почти в десять раз меньше ($0,76 \cdot 10^{-13}$).

Небольшие концентрации радия достаточны, чтобы вызвать значительное добавочное нагревание и, если сделать

вероятные предположения об общем количестве радия в земном шаре, то можно получить такое добавочное количество тепла, которое достаточно, чтобы при тепловом методе подсчета возраста земли получить возраст не только равный возрасту, получаемому из геологических данных, но даже и превосходящий его.

§ 26. Радиоактивный метод определения возраста земли

Как мы видели, радий и торий, совершая ряд радиоактивных превращений, выделяют α -частицы, представляющие собой заряженные атомы гелия, и переходят в конце концов в нерадиоактивные вещества — в 2 вида свинца. Атом радия, переходя в атом свинца ($Pb = 206$), отдает 5 α -частиц, притягивающих свободные электроны и переходящих в 5 нейтральных атомов гелия. Каждый грамм радия выделяет в определенное время определенное количество гелия и определенное количество свинца. Радий сам является продуктом других радиоактивных элементов; исходным элементом для радия является уран.

Если мы имеем урановые минералы, переходящие при радиоактивных превращениях в радий, то можно по содержанию в них свинца и гелия судить о времени, в течение которого урановые минералы подвергались радиоактивному распаду.

Определяя отношение урана к свинцу и урана к гелию, мы должны получить показатели, позволяющие найти одинаковый возраст породы. На опыте этого нет, и имеется ряд погрешностей методов, которые уже с самого начала должны дать различие возраста по свинцовому и гелиевому методу.

Гелий, как газ, может диффундировать из пород, и содержание гелия может быть меньше, чем его образовалось за время жизни породы. Возраст породы, таким образом, будет найден меньшим, чем он есть на самом деле. С другой стороны, по свинцовому методу возраст может быть найден большим, так как в породе с самого начала мог заключаться свинец. Во всяком случае, радиоактивный метод позволяет определять с некоторой приближенностью возраст пород, принадлежащих разным геологическим эпохам.

В табл. 4 мы даем данные о возрастах различных геологических эпох, заимствованные из книги О. Гана «Радиоактивность и возраст земли».

Таблица 4

Геологическая эпоха	Возраст в миллион лет
Плиоцен	1,5
Мiocен	5,7
Олигоцен	7,0
Пермь	38
Карбон	Данные разноречивы
Девон	112
Силур	226
Нижний докембрий . . .	570

Для некоторых минералов были получены и еще большие возрасты в 950 миллионов лет, в 1600 и 2500 миллионов лет.

Мы можем таким образом считать, что предельный максимальный возраст земли, определяемый по возрасту образовавшихся урановых минералов, должен быть около 2,5 миллиардов лет.

Различные породы, относящиеся к различным геологическим эпохам, должны обнаруживать разный возраст. Исследования, проделанные в разных лабораториях, показывают действительно, что с изменением геологического возраста минерала изменяется и число лет его существования, определяемое «свинцовым» и «гелиевым» методами. Огромное количество определений, произведенное в лаборатории Кюри, показало, что качественное разделение на различные эпохи, принятое геологами, соответствует различиям в годах, получаемым точнейшими физическими методами. Породы, принадлежащие разным эпохам, имеют возраст от сотен миллионов до миллиардов лет.

Интересный метод определения возраста минералов описал Джоили. Он пользовался особыми окрашенными в прозрачных минералах (например, в слюде) кружками, видимыми под микроскопом и вызываемыми присутствием радия. Этот метод, как и методы свинцовые и радиевые, предложенные Резерфордом, Холмсом, Стретом и Болтвудом, позволяют со значительной точностью определять возраст горных пород.

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ЗЕМНОЙ КОРЫ

§ 27. Изменения плотности земной коры

Исследования геологов показали, что мы можем разделить твердую оболочку земного шара на части, составляющие массы материков, и на части, которые лежат глубже, подстилая континенты. Знаменитый геолог Эдуард Зюсс дал веществам, составляющим континентальные менее плотные массы, название «сиал». Более плотные вещества, лежащие глубже и подстилающие континенты, объединены Зюссом под названием «сима».

До сих пор еще не решен вопрос, покрывает ли менее плотный «сиал» всю твердую оболочку земли, или на дне океанов встречается «сима» и «сиал» в этих местах исчезает.

Известный геофизик Вегенер полагает, что «сиал» образуется первичными горными породами и имеет плотность 2,6—2,8. Такую плотность имеют, например, гнейсы.

Плотность базальтовых пород, содержащих железо и составляющих «симу», колеблется около 2,9, доходя до 3,3.

Химический состав более поверхностного и более удельно легкого «сиала» значительно отличается от удельно более тяжелой «симы». Зюсс выбрал самые названия «сиал» и «сима» так, чтобы они указывали на главные химические элементы, входящие в состав указанных частей земной коры. Названия «сима» и «сиал» состоят из начальных букв тех элементов, которые преимущественно встречаются в данном слове. «Сиал» это область земной оболочки, богатая кремнием (по латыни *Silicium*, химический знак кремния Si) и алюминием (по латыни *Aluminium*, химический знак его Al). «Сима» это начальные буквы латинского названия кремния Si и магния (по латыни *Magnesium* — Mg). Мы видим таким образом, что главными составными частями твердой оболочки являются кремний, алюминий и магний.

Чтобы дать представление о распределении плотностей в коре и ядре земли, мы приведем в табл. 5, наряду с плотностью пород, их глубину под поверхностью и общую их характеристику.

Таблица 5

Глубина	Плотность	Характер пород
От 0 до 120 км . .	2,8	Силикатная оболочка:
" 120 " 1200 км . .	3,6—4	Сжатые силикаты
" 1200 " 2900 км . .	5—6	(лой сульфидов и окисей
" 2900 до центра земли	около 8	Металлическое ядро (никелевое железо)

(по Гольдшмидту)

§ 28. Химический состав верхних 16 километров земной коры

Химический состав земной коры точно изучен на относительно небольшую глубину. Наиболее глубокая буровая скважина имеет глубину всего 4,5 км. Из картины расположения складчатых горных пород можно вывести ряд заключений о составе коры до глубины в 16 км.

Кларк и Вашингтон произвели для определения состава наружных частей коры свыше 5000 исследований изверженных горных пород.

В двух нижеследующих таблицах мы дадим содержание, с одной стороны, главнейших элементов в коре, и, с другой стороны, — содержание их окислов. Это последнее сопоставление важно потому, что все элементы встречаются, как представляет Гольдшмидт, в виде окислов.

Как видно из таблиц, только 12 элементов встречаются в коре в количествах выше 0,1%. Огромная масса элементов находится в количестве, значительно более низком (от 0,05% и ниже до 0,001%).

Таблица 6

Элемент	Химический знак элемента	% содержания
Кислород	O	46,59
Кремний	Si	27,72
Алюминий	Al	8,13
Железо	Fe	5,01
Кальций	Ca	3,63
Натрий	Na	2,85
Калий	K	2,60
Магний	Mg	2,90
Титан	Ti	0,63
Фосфор	P	0,13
Водород	H	0,13
Марганец	Mn	0,10

Резкий скачок в процентном составе имеется между магнием и калием, с одной стороны, и титаном — с другой. Все указанные элементы составляют 98,63% всей земной коры.

В очень малом количестве встречаются свинец (0,002%), кобальт (0,001%) и бор (0,001%).

Таблица 7 дает содержание окислов элементов в земной коре.

Таблица 7

Название оксида	Химический знак	% содержания
Оксид кремния	SiO ₂	59,12
Оксид алюминия	Al ₂ O ₃	15,34
Оксид кальция	CaO	5,08
Оксид натрия	Na ₂ O	3,84
Оксид железа	FeO	3,81
Магнитная закись — оксид железа	Fe ₃ O ₄	3,008
Оксид магния	MgO	3,49
Оксид калия	K ₂ O	3,13
Вода	H ₂ O	1,15
Оксид титана	TiO	1,05
Фосфорный ангидрид	P ₂ O ₆	0,299

§ 29. Объяснения состава земной коры с точки зрения современной физики

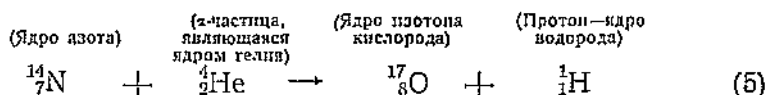
Распределение элементов в земной коре может получить интересное объяснение, если воспользоваться данными современной физики о строении атомов элементов. Как показали работы теоретиков-физиков, атом элемента можно рассматривать как планетарную систему с центральным телом, положительно заряженным тяжелым ядром, расположенным в центре; вокруг ядра по определенным орбитам движутся электроны, обладающие отрицательным зарядом. Ядра атомов элементов, в свою очередь, также сложны и состоят из ядер водорода, масса которых по отношению к ядру кислорода ($O = 16$) равна приблизительно единице (1,0081), и из нейтронов с массой, немного большей, чем масса протона, и также близкой к единице (1,0091).

Если около ядра элемента пролетает с большой скоростью заряженное тело небольших размеров (протон или ядро гелия с двумя положительными зарядами), то при достаточной близости заряженного ядра и пролетающих

заряженных частиц возникают внутри ядра атома настолько значительные электрические силы, что атом может распадаться. Одним из первых описанных Резерфордом распадений ядер элементов был распад под влиянием α -лучей ядра азота. Чтобы представить в виде формулы ядерную реакцию, нужно написать символы элементов (азот N, гелий He, кислород O и водород H), снабженными двумя значками. Один значок, расположенный слева и снизу от символа элемента, обозначает число положительных зарядов в ядре элемента. Эта величина удобно и точно определяется на опыте. Другой значок располагается слева и сверху и соответствует массе атома данного элемента. Так как число положительных зарядов в ядре атомов определенного элемента постоянно, то нижний левый значок для данного элемента постоянен.

Как мы знаем, атомы одного и того же элемента имеют разные массы; например, водород может иметь атомы с массой 1, 2 и 3; у кислорода массы атомов равны 16, 17, 18. Таким образом не все атомы каждого элемента обладают одинаковой массой, но разделяются на группы, на изотопы, обладающие совершенно определенным и одинаковым весом и одинаковой массой.

Принимая во внимание все сказанное, реакция, открытая Резерфордом, может быть написана таким образом



Стрелка ($\rightarrow$) показывает направление превращения

Открытие превращаемости элементов, подготовленное всеми предшествующими исследованиями Резерфорда, супругов Кюри, Рамзая, Содди и других, создало эру в новейшей физике и химии. Те мечты, которые делались в течение столетий алхимики, осуществились гениальным открытием Резерфорда, который был совершенно прав, говоря по поводу превращений элементов о создании современной алхимии.

Работы, проделанные Резерфордом и его учениками и продолженные венской школой, открыли целый ряд ядерных превращений, происходящих в большом числе элементов под влиянием бомбардировки α -частицами радиоактивных веществ или под действием искусственно ускоренных протонов. Число превращений элементов еще

увеличилось, когда удалось получить медленные и быстрые нейтроны (символ 1_0n).

Особенно интересны те реакции, при которых происходит нарушение закона сохранения вещества, когда материя кажущимся образом или исчезает или вновь создается. К таким реакциям относится превращение ядер лития (^7_3Li) под влиянием быстрых протонов (^1_1H) в ядра гелия (^4_2He).

Реакция превращения может быть написана так



Если определить точно массу ядра лития (она равна $\text{Li} = 7,0180$), массу ядра водорода — протона (она равна $\text{H} = 1,0081$) и ядра гелия ($\text{He} = 4,0039$), то по закону сохранения вещества должно быть

$$\text{Li} + \text{H} = 2\text{He}.$$

Но правая часть равна $2\text{He} = 8,0078$, левая часть равна $\text{Li} + \text{H} = 7,0180 + 1,0081 = 8,0261$. Таким образом при переходе от ядра лития, бомбардируемого водородными ядрами, к ядрам гелия происходит потеря массы, равная 0,0183. На первый взгляд может казаться, что мы, получив нарушение закона сохранения вещества, получили полное противоречие с самыми основами точного естествознания.

Однако очень легко понять, в чем тут дело, если мы обратимся к уже известной нам формуле, связывающей массу m (в г) и энергию E (в эргах)

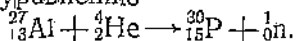
$$m = \frac{E}{9 \cdot 10^{20}}. \quad (7)$$

Согласно этой формуле, если масса m исчезает, она должна появиться в виде эквивалентного количества энергии $E = m \cdot 9 \cdot 10^{20}$.

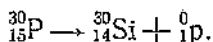
Таким образом изменение массы при реакции (6) должно сопровождаться увеличением энергии, и следовательно, ядро лития (Li) и протон (H) должны обладать в сумме меньшей энергией, чем два ядра гелия (He). Определение энергии при реакции (6) действительно показывает, что при потере массы происходит эквивалентное увеличение энергии, вычисляемой по формуле (7). Реакция превращения под влиянием быстрых протонов ядра лития в быстрые ядра гелия дает в первый раз подтверждение замечательного, открытого Эйнштейном, соотношения между массой и энергией.

При бомбардировке ядер элементов α -лучами могут возникать радиоактивные изотопы элементов, испускающие положительные электроны — позитроны — с массой, равной массе электрона ($\frac{1}{1840}$ массы ядра водорода) и с положительным зарядом, равным и противоположным по знаку с зарядом электрона. Ввиду малости массы позитрона мы его можем символически написать так: 0_1p .

Как пример превращения ядер с образованием новых радиоактивных элементов можно привести действие α -частицы (4_2He) на ядро алюминия (${}^{27}_{13}Al$) с образованием изотопа фосфора (${}^{30}_{15}P$) и с испусканием нейтрона (1_0n). Реакция протекает по уравнению



Ядро изотопа фосфора ${}^{30}_{15}P$ радиоактивно и быстро распадается с образованием ядра кремния (${}^{30}_{14}Si$) и с испусканием позитрона 0_1p .

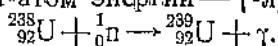


В настоящее время найдено большое количество подобных реакций и изучено большое количество получаемых искусственно радиоэлементов.

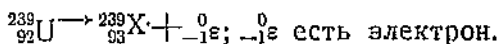
Очень важно было открытие, сделанное Ферми и обнаруживающее возможность построения элементов, лежащих за пределами периодической системы Менделеева.

В периодической системе химических элементов имеется 92 элемента, порядковый номер которых равен числу положительных зарядов ядра. Так, первый элемент — водород — имеет ядро с одним зарядом — протон. Второй элемент — гелий — имеет ядро, обладающее двумя зарядами. Литий — третий элемент — несет в ядре три положительных заряда и т. д. Каждый элемент характеризуется его порядковым номером, равным числу зарядов ядра атома. Что касается массы ядра, то эта масса у одного и того же элемента может быть различна, смотря по тому, какой из изотопов мы рассматриваем. Так, у водорода (H) имеются три изотопа, ядра которых будут 1_1H , 2_1H , 3_1H . У кислорода изотопов также три ${}^{16}_8O$, ${}^{17}_8O$, ${}^{18}_8O$ и т. д.

Ферми показал, что под влиянием нейтрона (1_0n), действующего на последний — девятый второй элемент — уран (${}^{238}_{92}U$), получается новый элемент — изотоп урана и испускается квант-атом энергии — γ -лучей.



Изотоп урана, являющийся радиоактивным телом, выбрасывает электрон с весьма малой массой, которую практически мы, как и у позитрона, можем положить равной нулю, и превращается в элемент, в котором число зарядов ядра на единицу больше, чем у урана, так как выбрасывание одного отрицательного заряда электрона повышает на единицу положительный заряд ядра и, следовательно, повышает на единицу порядковый номер элемента.



Элементы, образовавшие после застывания расплавленной массы твердую оболочку земли, находились в течение миллионов и миллиардов лет под влиянием радиоактивных излучений радиоэлементов, заложенных в коре земли. Несмотря на небольшое количество радиоэлементов в коре земли, продолжительное их действие на элементы, входящие в состав твердой оболочки, вызывало медленное и постепенное изменение элементарного состава ее. Химический состав коры эволюционировал веками, причем из ряда расположенных вместе атомов элементов быстрее всего превращались те ядра элементов, которые были наименее прочны.

Из того обстоятельства, что ядра элементов состоят из нейтронов и протонов, имеющих массы, практически равные единице, ясно, что образованные из них ядра будут иметь массы, выражаемые целыми числами. Этого, однако, нет, и причина отступлений от целых чисел или, как говорят, причина дефекта массы ядра лежит в том, что при соединении нейтронов и протонов в ядро теряется энергия, а следовательно, по закону Эйнштейна должна уменьшиться и масса. Ядра, у которых отступление от целых чисел больше, являются ядрами наиболее прочными и при прочих равных условиях эти ядра должны сохраняться в большем количестве, чем менее прочные ядра, меньше отступающие по массе от целых чисел.

В системе Менделеева у элементов четных столбцов дефект массы больше, чем у элементов нечетных столбцов и поэтому элементы четных столбцов, как более прочные, должны встречаться в коре в наибольшем количестве.

Мы видим, что идеи эволюции, зародившиеся в геологии благодаря знаменитым работам Ляйеля и охватившие благодаря гениальным трудам Дарвина весь животный и растительный мир земли, проникают и в самое существо земного шара, в его химический состав.

СОСТОЯНИЕ МАТЕРИИ ВНУТРИ ЗЕМНОГО ШАРА. ПЛАСТИЧНОСТЬ ВНУТРЕННИХ ЧАСТЕЙ ЗЕМНОГО ШАРА. ИЗОСТАЗИЯ

§ 30. Данные о состоянии внутренних частей земного шара

Опыт, сделанный геологами при огромном числе бурений, показывает, что повышение температуры с глубиной составляет в среднем 1°C на 30 м. Изменение глубины, соответствующее повышению температуры в 1°C в Северной Америке значительно больше, чем в Европе; имеются области (Южная Америка), где повышение на 1° наблюдается при углублении даже на 74 м. В Европе наблюдаются области, где повышение температуры в 1° наступает уже при опускании всего только на 27 м под поверхность. Условия передачи тепла в разных точках земного шара оказываются, таким образом, весьма различными. Отметим, что и форма поверхности земли является весьма неодинаковой в различных ее точках. Как мы уже видели выше, в Америке земля представляет более сплюснутый эллипсоид, чем в Европе. Весьма возможно, что малая теплопроводность коры, связанная с большим расстоянием по вертикали точек, разнящихся по температуре на 1° , и более значительная сплюснутость поверхности земли, наблюдаемая в Америке, связаны между собой.

Если бы мы допустили, что повышение температуры с углублением на всякой глубине одно и то же, мы получили бы, как это мы видели выше, уже на небольшой глубине в 60 км, — на глубине, составляющей только 0,01 доли земного радиуса — температуры около 2000° , когда все породы должны находиться в жидком состоянии. Однако заключение о прямой пропорциональности глубины и повышения температуры неверно, и наблюдения, сделанные в разных точках поверхности земли, показывают, что чем больше глубина, тем меньше пространство, на котором наблюдается подъем температуры на 1°C .

Так, в Гамбурге (Германия) в слоях от 0 до 250 м повышение на 1°C наблюдается при опускании на 36 м, а в глубоких слоях (от 950 до 1040 м) повышение температуры на 1°C находится на расстоянии всего 29 м.

То же явление наблюдается и в Бразилии. Таким образом температура растет с глубиной еще быстрее, чем это следует из наблюдений у поверхности.

Для температур, наблюдаемых на больших глубинах, можно дать только предельные крайние значения. Нижней границей этих температур является температура лавы в вулканах. При вытекании из кратера лава может не только охлаждаться, но и получать благодаря возникающим в ней химическим процессам повышение температуры. В среднем температура лавы должна считаться около 1150° , что и можно принять за низшую возможную температуру внутренних частей земли. Высший предел должен лишь незначительно отличаться от низшего предела. Некоторые ученые считают его лежащим много выше, именно около 6000° C.

Большинство исследователей полагает, что температура внутри земли должна быть не выше 2500° C. Последние исследования указывают на температуру 2200° , как на высший предел температуры внутри земли.

Излагая выше законы охлаждения земли, мы видели, что земной шар должен представлять скопление твердых масс, между которыми должна залегать отдельными озерами жидкая лава. Более плотные части земли должны залегать ближе к центру, на периферии должны располагаться удельно более легкие вещества. Между отдельными массивами твердых частей может располагаться жидкая лава, имеющая в верхних слоях земли температуру около 1000° C.

Мы пришли, таким образом, к заключению, что земной шар должен быть сплошь твердым и лишь местами имеются ограниченные участки жидких масс.

Из изучения формы земли делались некоторые заключения о состоянии внутренних частей земного шара. Из измерений можно было видеть, что земля показывает немого меньшую сплюснутость, чем обладала бы жидкая вращающаяся масса. Отсюда заключили, что твердая оболочка должна быть настолько массивна, чтобы она могла сдерживать давление внутренних частей земли, предполагаемых жидкими. Меньшая сплюснутость земли приписывалась меньшей скорости ее вращения в те эпохи, когда вся земля была жидкой. Различия сплюснутости, вычисленной из теории вращения жидкого тела, и сплюснутости, наблюдаемой геодезически, однако, так невелики, что мы можем считать их практически равными нулю и полагать, что вычисление фигуры земли из ее вращения дает совпадающие результаты с данными, полученными из геодезических определений. Метод геодезический не является, однако, вполне

надежным для решения задачи о состоянии земного шара, и гораздо более надежными методами, позволяющими судить о внутренних частях земли, являются изучения прецессии, приливов и отливов.

Можно показать и теоретически и на опыте, что как явления прецессии, так и явления приливов и отливов невозможны у жидкого тела, покрытого тонкой твердой оболочкой, приспособляющейся к изменениям сил, воздействующих на земной шар. Таким образом все явления, указанные выше, говорят, что земной шар должен вести себя как твердое тело, обладающее определенной упругостью.

§ 31. Явления, доказывающие пластичность масс, образующих земной шар

Мы видели, что земной шар ведет себя во многих случаях как твердое тело. Его форма, явление прецессии и явление приливов и отливов говорят за то, что земной шар тверд во всех своих частях.

Еще более убедительное доказательство твердости внутренних частей земли заключается в явлениях землетрясений, в явлениях сейсмических. Как мы увидим ниже, при землетрясениях в земле на большую глубину проникают упругие волны, дающие продольные и поперечные перемещения частиц коры земли. Поперечные перемещения могут, как мы знаем, наблюдаться только в твердых телах, и следовательно, сейсмические явления говорят за твердость внутренних частей земли. Есть, однако, такие процессы, которые заставляют считать земной шар образованным из масс, обладающих в значительной степени подвижностью частиц, овойственной жидкостям.

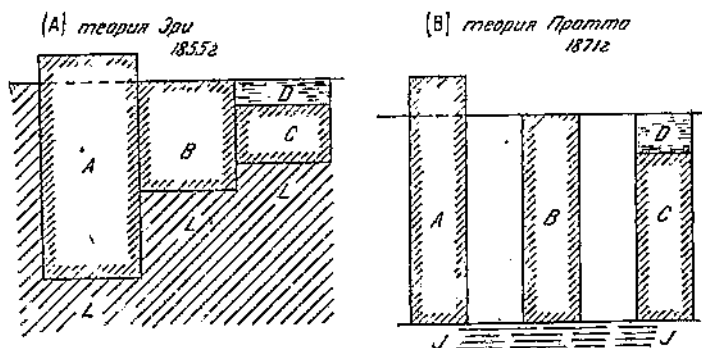
Мы увидим ниже, что обширные части материков могут испытывать значительные перемещения по вертикали в течение веков. Так например, Скандинавия и в частности Финляндия показывают непрерывное поднятие почвы, которое, как обнаруживают точные исследования, зависит от того, что материк Скандинавии, плавающий в пластической массе, подстилающей материк, был в последний ледниковый период покрыт огромными ледниками. Таяние ледников сделало вес материков меньше, соответственно чему они должны всплывать в вязкой подстилающей массе, в которую погружены основания континентов. Если бы вязкость основной подстилающей жидкости, в которой плавают

материки, была бы мала, материки всплыли бы в очень короткое время, но вследствие огромной вязкости, приближающей пластические массы, подстилающие континенты, к твердым телам, всплывание происходит очень медленно, так что поднятие поверхности земли происходит только на десятки сантиметров в столетие.

Из вышеуказанных перемещений мы можем, таким образом, заключить, что слой, лежащий под материками, является слоем, обладающим свойствами жидкости, в которой плавают и перемещаются перпендикулярно и вдоль поверхности земли материки, подчиняясь действию внешних сил.

§ 32. Изостазия

Еще задолго до установления основных фактов, подтверждающих твердость внутренних частей земного шара, в 1885 г. Эри высказал интересную гипотезу, которой впоследствии суждено было сыграть очень большую роль в уче-



Фиг. 15

нии о явлениях, происходящих в твердой коре земного шара. Эри предположил, что кора земного шара разделена щелями и трещинами на отдельные куски, которые плавают и поддерживаются гидростатическими силами. Среда, окружающая плавающие части твердой коры, имеет большую плотность, чем сама кора, и поэтому расположение отдельных масс коры таково, как представлено на фиг. 15 (А). Эри считал, что среда, поддерживающая части коры, жидкая и называл ее лавой, предполагая, что жидкость имеет весьма большую вязкость. Материк В плавает

таким образом, что его поверхность почти совпадает с уровнем океана *D*. Часть *C*, подстилающая дно океана *D*, погружена менее глубоко в лаву *LLL*, чем континентальные массы *B*, так как плавающие массы *D* и *C* имеют меньший вес, чем масса материка *B*. Наконец, горы *A*, возвышающиеся над уровнем океана, должны образовать глыбы, погружающиеся более глубоко в лаву, чем континентальные массы *B*.

В 1871 г. Пратт придал теории равновесия твердой коры несколько иную форму, объясняющую многие интересные факты, наблюдаемые геофизиками. В теории Пратта предполагается, что внутренние части земного шара являются жидкими, обладающими огромной вязкостью. В начале застывания кора представляла собой слой, не отличающийся по форме от жидкого слоя, из которого образовалась твердая кора. Постепенное охлаждение внутренних частей земного шара вызвало образование складчатости коры, как это мы более подробно изучим ниже. Получились подъемы и углубления коры, соответствующие горам и глубоким долинам. Более глубокие части земного шара, сохранившие свою жидкую, вязкую консистенцию, имеют форму поверхности, которую приняла бы вращающаяся жидкость. Если мы вырежем вертикальными сечениями колонки с равным основанием и соответствующие материкам *B* (фиг. 15) (*B*), горам *A* и дну *C* океанов *D*, то при равновесии жидкого слоя *JJ*, на который давят колонки, давление их должно быть одинаково. Таким образом вес колонок от верхней поверхности до поверхности равновесия пластической части земли (до *JJ*) должен быть везде одинаков. Если бы мы удалили со всей земли колонки *A*, *B*, *CD* и открыли бы глыбе лежащие ее части, поверхность *JJ* не изменила бы своей формы.

Поверхность *JJ*, несущая над собой массы колонок неравной высоты, но равного веса, называется поверхностью изостазии. Самое явление уравнивания коры гидростатическими давлениями получило название изостазии. Между воззрениями на изостазию Эри и Пратта принципиального различия не существует. Как понятно из фиг. 15 (*B*), плотности колонок *A*, *B* и *C* должны быть различны. Плотность у *A* должна быть наименьшая, следующая по величине плотность должна быть у *B* и наибольшая плотность имеется у *C*. В теории Эри плотности масс могут быть одинаковыми; в этом и заключается различие представлений Эри и Пратта.

Наблюдения над силой тяжести, вызываемой притяжениями всех масс земли, показали, что над горами А притяжение меньше, чем над континентами В. Наибольшее притяжение наблюдается на океанических островах. Явление изменения силы тяжести легко объясняется из представлений Пратта, и таким образом теория изостазии получает интересное подтверждение на практике.

По теории Пратта, внутри земного шара существует поверхность, охватывающая всю землю и делящая ее на две части. Внутренняя часть состоит из пластической массы, находящейся в гидростатическом равновесии, и внешняя часть, ограниченная неровной поверхностью земли, находится в изостатическом равновесии.

Сделав некоторые предположения о распределении плотности в коре земли, можно, пользуясь наблюдениями силы тяжести или отклонением вертикала, подсчитать глубину слоя изостазии. Таким способом Гайфорд и Титтман нашли для Соединенных Штатов Америки глубину слоя изостазии в 122 км. Гельмерт нашел для континентальных частей Европы глубину 118 км.

Можно было бы думать на основании прекрасных совпадений глубины, вычисленной Гельмертом и Гайфордом, что теория изостазии является строго обоснованной. Однако дальнейшие новые работы дали для глубины слоя изостазии в разных областях земли различные значения. Это все заставило Гайфорда изменить предположения Пратта и допустить, что слой изостазии проходит параллельно наружной поверхности каменной оболочки — литосферы. Таким образом под поверхностью гор слой изостазии лежит выше, чем под поверхностью океана.

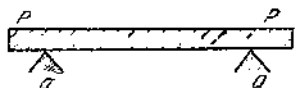
Так как в основе подсчетов глубины слоя изостазии лежат гипотезы о законе распределения плотности с глубиной, которые совершенно нам неизвестны, то понятно, что остроумные соображения Пратта не могут считаться до сих пор окончательно подтвержденными, и потребуются еще огромное количество экспериментальных и теоретических исследований, прежде чем теория изостазии получит прочную физико-математическую базу.

§ 33. Свойства пластических тел и приложение их к объяснению явлений в земном шаре

Как мы видели выше, земной шар должен представлять собой сплошное твердое тело, обладающее упругостью. За это говорят наблюдения формы земли, явления прецес-

сии, приливов и отливов и поперечность сейсмических волн, проникающих глубоко в тело земли. С другой стороны, подъемы и опускания материков и их перемещения вдоль поверхности земли, указанные Вегенером, требуют, чтобы под континентальными массами находилась пластическая жидкая масса, позволяющая совершать определенные, свойственные жидкости движения.

Как же примирить эти два на первых порах кажущиеся непримиримыми выводы о свойствах земли? Мы можем получить ответ на это, если ближе изучим физические свойства пластических тел. Примером таких тел при комнатной температуре является асфальт, при температуре около $500-600^{\circ}$ — стекло. Мы рассмотрим ближе свойства пластических тел и покажем, как можно ответить на поставленный выше вопрос.



Фиг. 16



Фиг. 17

Если призматический кусок стекла PP (фиг. 16) при температуре около $500-600^{\circ}$ положить на 2 опоры aa и оставить его только при воздействии силы тяжести, то уже этой небольшой силы достаточно, чтобы вызвать медленное прогибание призмы, изображенное на фиг. 17 (QRS). Требуются недели, чтобы такое прогибание стало заметно. Твердая на первый взгляд призма при длительном воздействии силы течет, изменяя свою форму.

В простой и всем доступной форме поразительные опыты, обнаруживающие пластичность веществ, можно произвести с асфальтом, причем с этим последним опыты можно производить при комнатной температуре. Если взять кусок асфальта и бросить его на каменный пол, он расколется, как раскалывается стеклянный предмет. Сделанный из асфальта камертон, при легком ударе о него, звучит, как звучит камертон стальной, обладающий способностью сохранять свою форму. С другой стороны, можно с куском асфальта проделать ряд опытов, которые заставляют заключить, что твердый с первого взгляда материал показывает при медленном воздействии сил такие перемещения, которые свойственны жидким телам.

Положим кусок асфальта неправильной формы в такой водный раствор, который бы имел одинаковый с асфальтом

удельный вес. Неправильный кусок с течением времени примет форму шара. Такую же шарообразную форму принимает жидкость, помещенная в другую жидкость, не растворяющую ее и имеющую тот же удельный вес, как первая жидкость.

Силы, действующие на поверхность жидкости и играющие роль в образовании жидкого шаровидного тела, наблюдаются и в асфальте.

Можно и другим образом демонстрировать свойства асфальта, присущие жидкости. Положим кусок асфальта в воронку и будем в течение многих месяцев наблюдать, что будет происходить с куском. Мы заметим, что кусок будет все более и более заполнять воронку и, наконец, заполнив ее нацело, будет медленно вытекать из ее отверстия так, как вытекает жидкость.

Такие тела как асфальт, стекло, обладающие при кратковременных действиях сил свойствами твердого тела и обнаруживающие при длительном действии свойства жидких тел, носят название тел пластических. Существование таких пластических тел внутри земного шара нужно предполагать, чтобы объяснить явления, о которых мы говорим.

При быстрых сейсмических колебаниях внутренность земного шара ведет себя как твердое тело, наоборот, вековые изменения, вызываемые длительно действующими силами, показывают такие изменения, которые свойственны жидкости. К таким изменениям относятся поднятия, опускания и перемещения материков.

Очень интересно, что обширные и глубокие исследования Тамманна над стекловидным состоянием показывают, что при больших давлениях и высоких температурах (около 1000°) стекловидное состояние тел, свойственное стеклу, асфальту и другим пластическим телам, является наиболее устойчивым состоянием, в которое переходят, например, вещества, имеющие кристаллическое состояние.

Во внутренности земли тела находятся под огромным давлением. Мы знаем, что вблизи центра земли вычисленное гидростатически давление должно достигать миллионов атмосфер. Допущение пластичности веществ, составляющих тело земли, находит, как мы видели, подтверждение в ряде явлений, наблюдаемых в лаборатории. В заключение отметим, что лавы, вытекающие из вулканов, обладают свойствами пластических веществ, медленно протекая по твердым подкладкам, образуемым склонами горы, и в то же время показывая ряд свойств, присущих твердым телам.

§ 34. Свойства твердых тел при больших давлениях

Для объяснения явлений, происходящих в земном шаре, представляет большой интерес изучение свойств твердых, главным образом металлических тел при больших давлениях.

Подобные опыты были предприняты целым рядом ученых (Спринг, Треска, Тамманн, Бриджмен) и дали исключительные по интересу результаты. Оказалось, например, что при большом давлении свинец начинает себя вести как жидкое тело, вытекая из отверстий в стальном цилиндре, в который помещен свинец, испытывающий давление стального поршня. Мелкие кусочки свинца, не имеющие на поверхности окисей, слипаются, сплавляются при обыкновенной температуре, образуя однородный, целый кусок, если давление, приложенное к ним, достигает сотен атмосфер. Таким путем можно приготовить сплавы, подвергнув большим давлениям мелкие перемешанные порошки золота и свинца.

Если взять два цилиндрика, хорошо пришлифованных основаниями, причем один цилиндрик оделан из золота, а другой из свинца, и если подвергнуть их значительным давлениям вдоль оси цилиндриков, то по прошествии некоторого времени цилиндрики окажутся плотно соединенными, как бы спаянными, хотя опыт произведен при обычной температуре.

Явления слипания при длительных опытах можно наблюдать даже в том случае, если один хорошо пришлифованный кусок золота лежит на куске свинца. По окончании опыта, длящегося ряд десятилетий, можно обнаружить не только полное слипание кусков разнородных металлов, но и доказать присутствие золота в прилегающих частях свинца и свинца в прилегающих частях золота. Мы имеем как бы диффузию атомов и молекул твердых тел.

Область физики, кратко изложенная в последних параграфах, еще очень мало изучена. Из сказанного ясно, какие огромные перспективы для геофизики открываются при изучении этой части молекулярной физики.

ДВИЖЕНИЯ ЗЕМНОЙ КОРЫ

§ 35. Общие понятия о движениях земной коры

По представлениям древних, которые были поэтически изложены Гомером, земля, являвшаяся центром мироздания, была плоской фигурой, которая со всех сторон обтекалась рекой «Океаном», и осуществляла собой неподвижность, покоем.

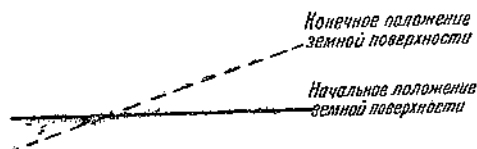
Как мы указывали выше, уже у древних астрономов возникали идеи о шарообразной форме земли, но представление об ее неподвижности, об ее центральном положении в мироздании сохранялось вплоть до того времени, когда Коперник (1473—1543 гг.) в своей бессмертной книге «О движении миров» показал, что все явления, происходящие на небе, могут быть объяснены движением земли около солнца и вращением ее около оси. Земля низводилась, таким образом, к простому спутнику солнца, и в центре мироздания стало солнце. Более точные исследования новейшего времени показали, что вся наша солнечная система перемещается по отношению к системе неподвижных звезд.

Таким образом земля как целое показывает сложнейшие движения. Тонкие и точные работы показали, что и в самом теле земли, в ее твердой оболочке, несмотря на ее кажущуюся твердость, все время происходят разнообразные движения и ни одна точка поверхности земного шара не остается в покое. Смещения в коре земли совершаются с разной скоростью и достигают различной величины. Бывают незначительные медленные смещения, открываемые только в течение столетий при точнейших методах, примененных для их исследования, бывают быстрые, колоссальной величины смещения, сопровождающиеся грандиозными катастрофами. Описание всех подобных смещений и является предметом настоящей главы.

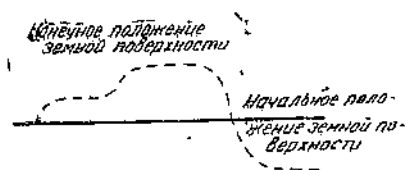
§ 36. Эпирогенез

Наблюдения, произведенные в течение последних столетий, показали, что земная кора совершает непрерывные, медленные движения, причем обширные области или поднимаются или опускаются в зависимости от условий, в которых они находятся. Как пример, можно привести Скандинавию, где уже простые грубые наблюдения свидетель-

ствуют о непрерывном её поднятии. Можно видеть, что причальные кольца, которые были ввернуты в скалы несколько столетий назад у уровня моря, находятся в настоящее время высоко над водой. Поднятие всей почвы Скандинавии происходит крайне медленно и достигает в столетие величины около 50 см, так что ежегодный подъем материка составляет около 5 мм. Еще меньший подъем наблюдается на побережьях Северного моря, где в течение 100 лет перемещение почвы достигает всего только



Фиг. 18



Фиг. 19

ко 20 см; ежегодный подъем составляет, таким образом, 2 мм.

Точные нивелировки, произведенные во Франции в период 1857—1867 гг. и 1884—1893 гг., показали, что разные части страны ведут себя различно. На юге Франции за время, протекшее между нивелировками, наблюдается понижение уровня поверхности земли на несколько

сантиметров. Наоборот, побережье Северного моря, принадлежащее Франции, поднялось приблизительно на 100 см. Если принять во внимание, что промежуток между первой и второй нивелировкой был 17 лет (между 1867 и 1884 гг.), то годичное повышение составляет приблизительно 6 см.

Огромные пространства, охватывающие целые страны, движутся иногда, не сохраняя параллельного положения, а перемещаются в разных местах с разной скоростью. В результате таких движений могут наступать не только изменения наклона местности (фиг. 18), но и появление террас, как это представлено в сильно преувеличенном виде на фиг. 19.

В вулканических местностях явления могут достигать огромных размеров. Классическим примером движений земли в вулканических местностях является движение почвы, наблюдаемое около Пучцуоли (близ Неаполя), где имеются развалины храма Сераписа. По следам, оставленным на колоннах храма уровнем морской воды, омывавшей храм, можно ясно видеть, что колонны, стоящие в настоящее вре-

мя выше уровня моря, производили сложное движение по вертикали. Начиная с 205 г. нашей эры, наблюдалось постепенное понижение почвы, на которой находился храм. Понижение достигло максимальной величины в 9 м ниже уровня воды. Затем наступило поднятие почвы до той же высоты и в настоящее время наблюдается второе медленное опускание.

Медленные движения земной поверхности, описанные выше, носят название эпирогенеза.

§ 37. Причины эпирогенических явлений

Чтобы объяснить явления эпирогенеза, мы должны прибегнуть к теории изостазии, изложенной выше. По теории изостазии материк плавает в пластической массе магмы, подстилающей его основание. Допустим, что масса материка изменяется, тотчас же изменяются и условия равновесия материка в магме. Если материк делается тяжелее, он погружается в магму на большую глубину, если, наоборот, материк становится легче, он медленно, в течение веков, всплывает вверх в поддерживающей его магме. Мы уже видели, что поднятие поверхности земли в Финляндии зависит от таяния ледников, покрывавших в предшествующий период геологической жизни земли Скандинавию. Перемещения при эпирогенезе крайне медленные, и они должны быть отнесены к разряду вековых перемещений. Однако явление изостазии не является единственной причиной эпирогенеза. Возможны значительные расширения масс, находящихся вблизи слоёв изостазии, под действием тепла, чаще всего зависящего от радиоактивных явлений. При таких условиях должны появляться местные поднятия почвы, местные вспучивания. Наконец, причиной эпирогенеза могут быть, как это считают геологи, движения твердых подкорковых масс в пластическом веществе ядра земли.

§ 38. Орогенез

В противоположность эпирогенезу, характеризующему медленные поднятия или опускания больших поверхностей земного шара, происходящие без изменения морфологических особенностей поверхности, под орогенезом разумеют движения верхних частей твердой оболочки, связанные с подъемами или опусканиями, резко меняющими общий характер расположения слоев. От движений пород

могут образоваться горы, связанные с резким изменением морфологии страны, могут образоваться разрывы коры с перемещением частей друг по отношению к другу, могут возникать складчатости коры. Все эти изменения, меняющие морфологию местности, происходят по большей части гораздо более быстро, чем это наблюдается при эпирогенезе. Один из крупнейших знатоков этих процессов — Штилле — называет эпирогенез тектонической эволюцией, в то время как орогенез, по его терминологии, характеризует тектоническую революцию.

Наблюдения над орогенетической деятельностью показывают, что она наступает периодически, и можно в течение геологической жизни земли отметить два периода особенно сильного горообразования.

§ 39. Причины образования гор

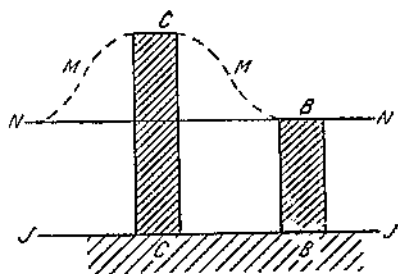
В настоящее время имеется ряд теорий орогенеза, теорий горообразования. Мы остановимся подробнее на одной теории, которая обязана своим первым появлением гениальным соображениям великого французского физика и математика Декарта и которая была развита в последнее время трудами одного из крупнейших геологов последнего времени Эдуарда Зюсса.

Идея теории горообразования Декарта — Зюсса очень проста. Как известно, земля представляет собой сильно нагретое тело, покрытое твердой оболочкой. Наружная поверхность твердой оболочки имеет температуру, зависящую от количества тепла, доставляемого солнцем, и не зависящую практически от внутренней теплоты земли. Так как солнечное излучение не изменялось в течение многих тысячелетий, то температура поверхности земли оставалась в среднем постоянной. Это влечет за собой то, что тонкий слой наружной поверхности земного шара, имеющий постоянную температуру, сохраняет неизменными свой объем и величину поверхности в течение тысячелетий. Что касается до внутренних частей земли, то они, отдавая наружу тепло, излучаемое наружным слоем, медленно, но постоянно охлаждаются и уменьшаются в объеме. Внутренние слои земного шара сокращаются, в то время как наружные остаются при том же объеме. Все происходит так, как если бы мы поместили яблоко в сухое пространство. Мякоть яблока, теряя влагу, сокращается в объеме, в то время как плотная кожа, покрывающая яблоко и не меняющая свое-

го объема, образует морщины, приспособляясь к объему мякоти яблока. Чтобы на опыте продемонстрировать теорию Декарта—Эюсса, Вальтер поступает так: на поверхность гуттаперчевого, легко раздувающегося шара накладывается, после того как шар раздут, тонкий слой муки, смоченной водой, или слой влажного гипса. Уменьшая выпускаяем воздуха объем шара, мы заставим наружный слой муки или гипса приспособляться к поверхности внутреннего гуттаперчевого шара. При этом легко заметить в слое муки или гипса образование складок и морщин, как это наблюдается при высушивании яблока.

Хорошее подтверждение возможности горообразования от изменения объема внутренних частей земли дал Гейн, изучая смещения в Юрских горах.

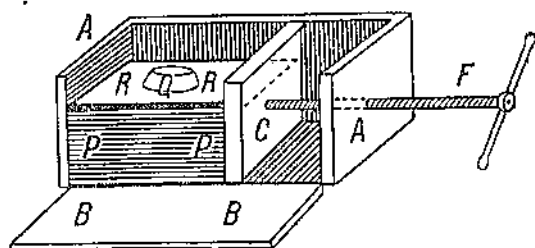
При подъемах и опусканиях поверхности земли, связанных с горообразованием и с понижением или исчезанием гор, должны возникать силы натяжения в породах, образующих земную кору. Как пример, мы разберем следующий случай. Допустим, что в некоторую геологическую эпоху поверхность земли *NMSMB*, изображенная на



Фиг. 20

фиг. 20 пунктиром, отсекает колонки *BB* и *CC* одинакового сечения, соответствующие долине и горе такой массы, что их давление на слой изостазии *JJ* одинаково. Благодаря действию воды и ветра выступающие участки континентов *MCM* постепенно разрушаются и уменьшаются в высоте и, следовательно, давление на *JJ* колонки *CC* делается по сравнению с давлением колонки *BB* все меньше и меньше. Колонка *CC* для сохранения изостатического равновесия стремится подняться всплыть, и следовательно, между нею и соседними окружающими частями горы возникают силы натяжения, которые могут сделаться настолько значительными, что в породах, образующих гору, могут возникнуть разрывы пластов вещества. Нарушения изостатического равновесия могут дать повод к боковым давлениям, искривляющим существующее расположение горных пород. Появляющиеся при боковых давлениях смещения могут быть удобно продемонстрированы на приборе, изображенном на фиг. 21.

Прибор состоит из деревянного ящика AA с откидной стеклянной стенкой BB и из подвижной стенки C , перемещающейся при помощи винта F . В отделении ящика PP помещается в виде горизонтальных слоев или разноцветная бумага или разноцветный пластический материал, расположенный горизонтальными слоями. Сверху на бумагу или систему листов пластической массы давит равномерно доска RR с грузом Q . При опыте стекло BB закрывается и сквозь него ведется наблюдение. Если закручивать винт F , то осуществляются силы, возникающие при сморщивании земной коры, вследствие потери землей тепла. При этом в слоях PP мы получим искривления, аналогичные тем, которые наблюдаются в горных местностях.



Фиг. 21

Считая, что перемещения вызывают различные натяжения в земной коре в разных широтах, можно, пользуясь теорией изостазии, показать, что наиболее значительное горообразование должно быть в средних широтах. Околополярные и экваториальные части земного шара являются такими местами, где горообразование должно быть менее значительным, чем в средних широтах. Это явление наблюдается в действительности.

Теория горообразования Декарта—Зюсса вызвала целый ряд возражений. Были сделаны попытки привлечь к объяснению горообразования другие процессы. Прежде всего нужно отметить движение пластических масс, на которых покоится кора. Подобные воззрения, развитые Амплером и Швиннером, приводят к заключению о возникновении вихревых движений в подкорковом слое земли, движений, сходных с циклонами и антициклонами. Движение коры и образование гор вызываются движением пластической подстилки коры. Как справедливо замечает по поводу

этих теорий известный геолог и геофизик А. Борн, «эти гипотезы течений имеют тот недостаток, что они, во-первых, требуют относительно большую подвижность материи, лежащей под корой, и, с другой стороны, трудно понять происхождение энергии для возникновения подобных движений».

Мы пока еще не в состоянии дать законченное, ясное и точное представление о горообразовании, и развитие физико-математической теории орогенеза явится делом будущего.

§ 40. Перемещения слоев земли в горизонтальном направлении. Движение континентов по Вегенеру

Помимо вертикальных перемещений поверхности земного шара, ряд ученых допускает существование медленных горизонтальных перемещений, незаметных в течение коротких промежутков времени даже при точнейших современных наблюдениях, но производящих огромные действия в течение геологических эпох. Перемещение этого рода можно наблюдать в небольшом масштабе на горных породах, представляющих иногда в вертикальном разрезе картины явных горизонтальных движений (фиг. 22).

По мнению Вегенера горизонтальные движения могут совершаться не только в отдельных частях горных пород, целые материи могут, отделившись от своих первоначальных положений, перемещаться вдоль поверхности земли, плавая в пластической массе, подстилающей основания материков. В частности, Америка, по Вегенеру, составляла в отдаленные геологические эпохи одно целое с Европой и Африкой и лишь по прошествии многих тысячелетий Американский материк, отколовшись от Европы и Африки, медленно перемещался на запад, заняв в нашу эпоху настоящее его положение.

Теория Вегенера объясняет многие непонятные факты зоологии, ботаники, геологии, географии. Как гипотеза, позволяющая направить исследования, теория Вегенера представляет значительный интерес. Однако против нее выдвигались существенные возражения такими учеными, как Эрик Дригальский,



Фиг. 22

Прежде всего нужно было доказать существование таких сил, которые могли бы перемещать по поверхности земли тела в направлении меридиана и в направлении параллели. Эти вопросы были поставлены и решены двумя выдающимися теоретиками — физиками П. С. Эпштейном и Швейдаром.

Из теоретических исследований выясняется, что на всякое плавающее тело, вращающееся вместе с землей, действует всегда сила, направленная от полюса к экватору и стремящаяся перемещать тело к югу. Так как континенты по теории изостазии плавают своими основаниями в пластической массе, составляющей их подкладку, то одна из сил, требуемых теорией Вегенера, является обоснованной. Однако по подсчетам эта сила так мала, что является неясным; может ли она даже при длительном действии вызвать необходимые перемещения.

Известный геофизик А. Борн считает вероятным возможность перемещений по меридианам под влиянием силы, действующей на плавающие в магме тела и вызванной вращением земли.

Мы знаем из теории Вегенера, что необходимо допустить и другую силу, действующую вдоль параллелей. Такая сила должна действовать, чтобы переместить, например, материк Америки в направлении к западу от материков Европы и Африки, слитых вначале с Америкой в один огромный континент.

Швейдаром была обстоятельно изучена подобная сила, зависящая по его исследованиям от прецессии. По подсчетам Швейдара, эта сила значительно больше силы, действующей вдоль меридиана, и, как полагают Швейдар и А. Борн, достаточна, чтобы вызвать перемещение континента Америки к западу. Максимум этой силы лежит при 36° северной и южной широты.

Вегенером перед его трагической смертью во время путешествия через Гренландию, делались попытки определения перемещения за короткое время островов при применении точнейших астрономо-геодезических приемов. Выбирались такие острова, которые по теории должны были дать значительные перемещения. Исследования Вегенера, однако, не дали положительных результатов.

Мы видим таким образом, что поверхностные слои земли совершают под влиянием разнообразнейших сил сложнейшие и запутаннейшие движения, приводящие к изменениям положений слоев земли, открываемых геологией.

§ 41. Сбросы, землетрясения. Вулканы, их роль в землетрясениях

При уменьшении объема внутренних частей земли ее наружный покров, сохраняющий постоянный объем и постоянную наружную поверхность, испытывает натяжения, которые, доходя до известного предела, до предела упругости, вызывают разрыв горных пород и быстрое их перемещение. Таким путем образуются сбросы. Внезапный разрыв горных пород, связанный с их смещением, сказывается для обитателей данного района в виде одного или нескольких толчков и составляет наиболее частый случай землетрясения.

Теория показывает, что натяжения в земной коре различны в разных широтах. Этим объясняется интересная зависимость частоты землетрясений от широты, открытая Мореном. Из его работы видно, что максимальное количество землетрясений приходится на экваториальную зону земли, где натяжения в коре благодаря максимальной центробежной силе наибольшие. Наименьшее число землетрясений наблюдается в полярных областях, где центробежная сила и вызванные ею натяжения в коре минимальны.

Любопытно отметить, что иногда разность барометрических давлений в двух соседних местах может обусловить добавочные силы, достаточные, чтобы вызвать игру сил, производящих землетрясения.

Помимо общих причин, связанных с натяжением в твердой оболочке земли, могут быть и чисто местные причины землетрясений. От выщелачивания растворимых горных пород протекающей водой могут образоваться огромные подземные пещеры. Обвалы стенок этих пещер вызывают землетрясения в областях земного шара, расположенных над пещерами.

Землетрясения, зависящие от смещения отдельных частей земной коры, являются самыми частыми видами движений коры земли и носят название тектонических землетрясений.

Как показал в своих классических работах известный французский ученый Монтеассю де Баллор, землетрясения чаще всего связаны с двумя узкими зонами, расположенными по двум большим кругам земного шара. Эти дуги образуют друг с другом угол в 67° , и вдоль них лежат две складки земли, две так называемые геосинклинали, в рай-

оие которых кора земли обладает наибольшей податливостью. В области этих зон происходит более 95% всех землетрясений, наблюдаемых на земле. С линиями Монте-сью де Баллора связан и Кавказ, являющийся одним из частых очагов землетрясений.

Гораздо более редкой причиной землетрясений являются вулканические явления. В начале развития учения о землетрясениях вулканическим процессам приписывалась исключительная роль. Затем в учении о землетрясениях наступил период, когда роль вулканов совершенно отрицалась. В настоящее время можно утверждать, что в редких случаях землетрясения вызываются извержениями вулканов. Однако не всякое извержение вулкана непременно связано с землетрясением. 1 сентября 1923 г. священный вулкан Японии Фузияма не обнаруживал никакой деятельности. Действовал лишь маленький вулкан на острове Ошима. Между тем в Токио и Йокоте было колоссальное землетрясение. Наоборот, как это многократно наблюдалось в Японии, во время сильного действия вулканов, не наблюдается никаких колебаний земной коры.

Дж. Дарвин указал, что образование паров воды под большим давлением в слое расплавленных пород земли, в слое, занятом магмой, может вызвать поднятие поверхности земли с образованием гор и с возникновением новых вулканов. С этой точки зрения понятно, что вулканические явления могут быть одной из причин горообразования и землетрясений.

По мере того как уточняются методы наблюдения колебаний почвы, ежегодно насчитывается все большее и большее количество землетрясений. В настоящее время можно утверждать, что ежегодно происходит от 8000 до 10000 землетрясений. Таким образом, на один час приходится около одного землетрясения. Приблизительно половина их может ощущаться человеком. Многие землетрясения происходят в необитаемых частях земного шара, многие возникают в морях, но это не уменьшает их значения для геологической жизни нашей планеты.

Число землетрясений, простирающееся до десятка тысяч в год, показывает, что мы имеем дело с почти регулярным, постоянным явлением в жизни земли. Благодаря землетрясениям неустойчивые состояния твердой коры земного шара, вызванные натяжениями, переходят постепенно в более устойчивые, сохраняющиеся до тех пор, пока в породах, образующих кору, не возникнет в силу новых яв-

лений предельных натяжений, дающих разрывы и сопровождающие их землетрясения.

Описанным механизмом можно объяснить то, что некоторые землетрясения прекращаются не сразу, а вслед за начальными по большей части частыми и сильными толчками наблюдаются иногда в течение нескольких лет последующие более слабые и редкие толчки и колебания. Перемещения коры, вызвавшие первые колебания почвы, привели ее не сразу к состоянию устойчивого равновесия. Состояние относительного равновесия достигается путем последовательных обросов и перемещений пород, которые и вызывают последовательные землетрясения. В некоторых случаях возникает две группы толчков. Сначала возникает первая группа — более слабых толчков, за ней следует главная группа сильных подземных ударов, связанная с настоящим землетрясением.

Для учения о землетрясении, для так называемой сейсмологии, важно то, что бывают периоды, когда землетрясения особенно часты и обычны. Это обстоятельство зависит от того, что неустойчивость земной коры показывает изменения во времени.

Наблюдаемые при землетрясениях перемещения земной коры и их скорости колеблются в весьма широких пределах. В некоторых землетрясениях колебания почвы так малы, что человек их совершенно не ощущает и только инструментальная запись показывает существование весьма малых скоростей в 2 мм/сек. От слабых землетрясений мы имеем постепенные переходы к землетрясениям, вызывающим огромные катастрофы с уничтожением всех зданий. Такие катастрофы наблюдаются при скоростях перемещения в 5 м и более в секунду. Начало разрушений домов, образование трещин, отпадение штукатурки происходят уже при скоростях в 50—100 мм/сек.

Частота землетрясений в разных местностях земли весьма различна. Есть целая область сейсмических местностей, например, Алма-Ата (раньше Верный), где землетрясения — обычное явление.

Совершенно ровные местности, обладающие правильным расположением геологических слоев, не застрахованы от землетрясений. Так, во Владимире наблюдалось землетрясение в 1230 г. В 1802 г. землетрясение отмечено в Москве и Петербурге.

Энергия, освобожденная при больших землетрясениях, колоссальна. Так, при землетрясении в Исык-Куле в Тур-

кестане в 1911 г. выделялась энергия, способная поднять температуру $100 \cdot 10^{12}$ тонн воды от нуля до точки кипения.

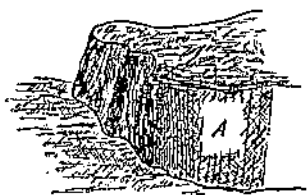
Для того, чтобы дать картину большого землетрясения, мы воспользуемся описанием знаменитого землетрясения в Верном (ныне Алма-Ата) 9 июня 1887 г., данным известным геологом, покойным И. В. Мушкетовым. «Землетрясение, — пишет он, — разразилось внезапно над спящим городом. Утром 9 июня в 4 ч. 35 м. раздался сильный подземный гул и почувствовался сильный толчок, разбудивший спящих. Колебания земли продолжались не более секунды. Так как здесь землетрясения очень часты, то все скоро успокоилось, но через несколько минут раздался второй гул, за этим гулом последовали сильные удары. Моментально начала сыпаться штукатурка и попадали печи и потолки. Эти резкие колебания продолжались 5 минут. В первые минуты казалось, что город более не существует, что разрушены все здания без исключения.

Всего ужаснее были последствия землетрясения в горах. Целые скалы обрушивались в ущелья и запрудили реки. Погибло много скота. Грохот и гул были оглушительными. В самом городе из 1790 домов уцелел только один, но число человеческих жертв оказалось небольшим — убитых оказалось 332 человека. В течение целого года отдельные, хотя и слабые толчки повторялись довольно часто с промежутками в 2—3—5 дней. Общее число сотрясений было около 600».

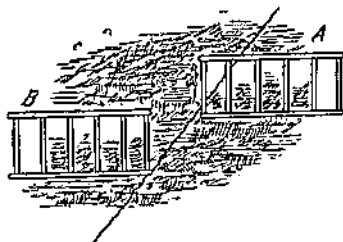
§ 42. Физические явления, сопровождающие землетрясения. Упругие волны, распространяющиеся из центра землетрясения

При всяком землетрясении происходит целый ряд движений почвы, которые при больших смещениях могут быть легко констатированы уже при тубом осмотре местности, где произошло землетрясение. Часто при землетрясениях можно видеть вертикальные смещения почвы А, наблюдаемые прямо на-глаз, как это изображено на фиг. 23. Горизонтальные смещения почвы могут быть также иногда легко констатированы. Если, например, забор разделен землетрясением на две части и одна часть А переместилась по отношению к другой В (см. фиг. 24), то ясно, что произошло горизонтальное смещение разорванных пород. Наконец, при землетрясениях возможны вращательные дви-

жения, которые легко констатируются иногда наблюдением составных памятников, состоящих из тяжелой колонны А (фиг. 25, I), помещенной подвижно на пьедестале В, соединенном с почвой. При быстром вращательном движении почвы колонна А благодаря инерции отстает от движения пьедестала В (фиг. 25, II), и после землетрясения наблю-

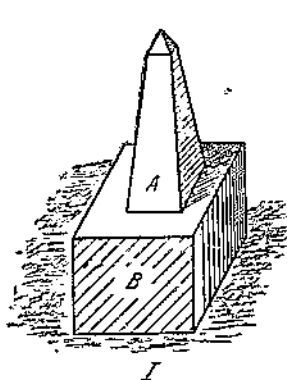


Фиг. 23

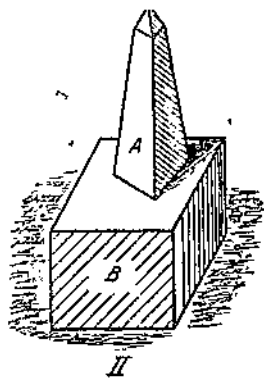


Фиг. 24

дается повертывание А по отношению В. Движения почвы могут быть и комбинированными, состоя из вертикальных, горизонтальных и вращательных перемещений.



I



II

Фиг. 25

I — до землетрясения; II — после землетрясения

До сих пор мы говорили о землетрясениях, как об одном из важнейших факторов физики земли, позволяющем коре земного шара, оказавшейся благодаря постепенному охлаждению в неустойчивом состоянии, принимать более устойчивую форму. Освобождающаяся при землетрясениях энергия может дать представление об устойчивости нового со-

стояния по отношению к старому, так как по законам физики, чем больше выделяется энергии при превращении, тем более устойчивым должно быть новое состояние. Наиболее устойчивым должно быть такое состояние, переход в которое сопровождается максимальным выделением энергии.

Землетрясения интересны для геофизики не только потому, что они играют огромную роль в придании земле наибольшей прочности, они интересны еще и потому, что благодаря упругим волнам, возникающим при землетрясении, мы можем подробно изучить внутренние части земного шара.

Чтобы разъяснить эту роль землетрясений, мы рассмотрим волны, распространяющиеся от места возникновения землетрясений. Для простоты рассуждений допустим сначала, что земной шар является однородным телом, в определенной точке которого S (фиг. 26) возникает землетрясение.



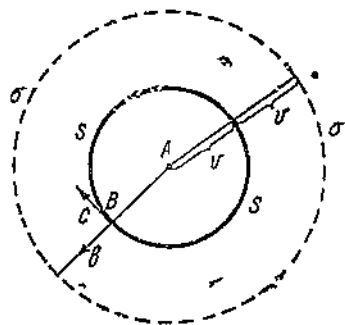
Фиг. 26

На самом деле, землетрясение происходит не в одной точке, часто оно охватывает огромные пространства, ограниченные большими поверхностями. Но так как величина областей, разрушаемых землетрясением, мала по отношению к размерам земного шара, мы можем при построении теории землетрясений принять всю область, охваченную землетрясением, за точку. Эта точка S (фиг. 26) носит название гипоцентра. Если опустить перпендикуляр из гипоцентра на горизонтальную поверхность земли AB , мы получаем точку E , которая носит название эпицентра.

Сотрясения, возникающие в гипоцентре при землетрясениях, вызывают в окружающих очаг землетрясения твердых горных породах упругие волны, распространяющиеся из места их возникновения во все стороны.

Если следить за тем, что происходит в среде после сотрясения, произведенного в одной ее точке A (фиг. 27), то прежде всего мы заметим, что вокруг A в виде шара (S) распространяется сжатие или разрежение среды, причем пространство, которое пробегает за единицу времени сжатие или разрежение, остается постоянным, так что если за 1 сек. сжатие или разрежение, возникшее в A , распространилось до шара SS , то через 2 сек. сжатые или разреженные

части будут находиться на сфере $\sigma\sigma$ с радиусом, вдвое большим, чем радиус сферы SS . Если бы мы стали наблюдать движение какой-нибудь точки среды, например точки B , то мы заметили бы, что она при прохождении сжатия или разрежения совершает движения вдоль радиуса сферы AB (по линии Bb , и обратно). Подобное распространяющееся возмущение в среде называется волной продольных колебаний, и мы можем сказать, что прежде всего при сотрясении в точке A среды распространяется шаровая волна продольных колебаний или, как ее называют иногда, шаровая продольная волна.



Фиг. 27

Можно доказать теоретически и экспериментально, что в твердой среде, наряду с продольной волной, распространяется волна поперечного колебания, в которой перемещение частиц среды происходит при прохождении волны в направлении Bc , перпендикулярном к радиусу AB волны. Частица при прохождении волны через точку B движется по линии Bc и обратно.

Волны продольные распространяются в упругой среде быстрее волн поперечных. Мы сопоставили в табл. 8 данные, относящиеся к скоростям продольных и поперечных волн в земной коре на разной глубине.

Таблица 8

Глубина слоя в км	Скорость про- дольных волн в км/сек	Скорость попе- речных волн в км/сек
57	8,0	4,4
71	8,0	4,4
1 200	$12\frac{1}{4}$	$6\frac{3}{4}$
1 700	$12\frac{1}{2}$	$7\frac{1}{4}$
2 450	$13\frac{1}{4}$	$7\frac{1}{2}$

(по Гутенбергу)

Линия AB , дающая направление, по которому распространяются упругие волны, вызванные землетрясением в точке A , называется сейсмическим лучом.

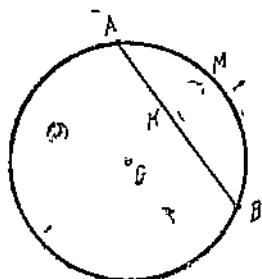
Энергия, выделившаяся при землетрясении, производит, во-первых, местные разрушения и, во-вторых, передается как энергия продольных и поперечных волн. Эта последняя энергия, принадлежащая волнам, распространяется при движении волн все на большее и большее расстояние от A , распределяясь по поверхностям все больших и больших сфер. Таким образом через 1 см^2 проходит по мере удаления от A все меньшее количество энергии.

В настоящее время имеются методы, позволяющие записывать колебания почвы в любой точке шара при возникновении землетрясения в отдаленных местах коры земного шара. Таким путем в Пулкове (около Ленинграда) записываются землетрясения, возникающие, например, в Японии.

Заканчивая обзор волновых явлений в твердой оболочке земли, необходимо отметить, что из места землетрясения, помимо продольных и поперечных волн, распространяются вдоль самой поверхности земли волны, приводящие поверхность почвы в колебания, совершенно аналогичные колебаниям, наблюдаемым на поверхности морей и океанов. Эти поверхностные волны распространяются медленнее всего и носят название релеевских волн.

§ 43. Определение места землетрясения

Пользуясь данными о распространении упругих волн в среде, мы можем определить, наблюдая в трех станциях упругие волны, исходящие из места землетрясения, ту точку в земном шаре, где возникло землетрясение. Способ определения легче всего объяснить, если принять, что земной шар однороден и возникшие в нем колебания (продольные и поперечные) распространяются везде с одинаковой скоростью.



Фиг. 28

Пусть изображенный на фиг. 28 круг представляет сечение земли, проходящее через ее центр O , через место возникновения землетрясения A и через место наблюдения B . Так как очаги землетрясений располагаются

вблизи поверхности земного шара, то мы будем считать, что точка A , лежащая на шаре и представляющая эпицентр землетрясения, совпадает с гипоцентром. При масштабе,

взятом для фиг. 28, это совпадение практически является вполне точным.

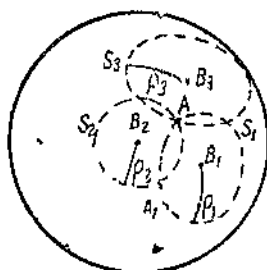
От A до B добегают по линии AKB продольные и поперечные волны, причем сначала доходят более быстро распространяющиеся продольные волны и позднее волны поперечные. Зная скорости тех и других волн и разность времени их подхода в точку B , можно вычислить вдоль поверхности земли расстояние AMB , отделяющее место наблюдения от очага землетрясения. Таким образом наблюдение на одной только станции B сразу определяет длину дуги $AMB = \rho$, которая определяет положение точки землетрясения A по отношению к точке наблюдения B .

Пусть наблюдатель, находящийся в B_1 (фиг. 29), определил по разности времени подхода продольных и поперечных волн расстояние вдоль земной поверхности ρ_1 , от точки наблюдения до места землетрясения A .

Из наблюдений в точке B_1 можно заключить, что точка землетрясения находится на окружности S_1 , отстоящей от B_1 вдоль поверхности земли на расстоянии ρ_1 . Наблюдения подхода продольных и поперечных волн со второй станции B_2 определяют вторую окружность S_2 , лежащую на расстоянии ρ_2 от B_2 и включающую точку землетрясения A . Из двух наблюдений мы сразу находим две точки A и A_1 , где могли бы возникнуть землетрясения, и, если бы мы имели еще третью точку наблюдения B_3 , которая дала бы третью окружность S_3 , то вопрос о месте землетрясения A был бы решен однозначно.

Однако и двух точек часто бывает довольно, чтобы найти с большой вероятностью место землетрясения. Пусть, наблюдая в точке B_1 и B_2 , мы определим два места возможных землетрясений (точки A и A_1). Можно с большой вероятностью сказать, что землетрясение произошло в точке A , если A принадлежит одному из больших кругов Монтессо де Баллора, где землетрясения встречаются наиболее часто.

Мы видели, что представление об однородной земле не удовлетворяет наблюдениям. Допустим, что земля состоит из двух частей. Из однородного ядра, состоящего из более тяжелых металлических пород с большей упругостью, и из

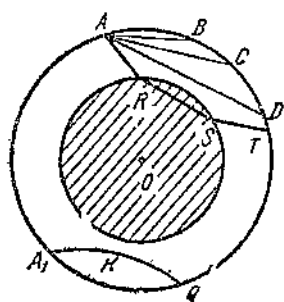


Фиг. 29

однородной каменной оболочки с меньшей плотностью и упругостью. Из опытов можно доказать, что волны в каменной оболочке распространяются с меньшей скоростью, чем в металлической. Направление, по которому волны пробегают внутри земного шара, иначе говоря, направление сейсмических лучей, изобразится прямыми AB , AC , AD (фиг. 30) для лучей, идущих в однородной каменной оболочке, и ломаной линией $ARST$ для луча, проходящего через ядро. Заштрихованный круг представляет собой сечение ядра земли.

На самом деле, плотность и упругость каменной коры земли изменяется сложным образом, и возникшее в точке A_1 колебание распространяется не по прямому, а по сложной кривой A_1KQ , которая может быть получена из наблюдений.

Более сложные подсчеты, основанные на глубокой математической теории, позволяют и для реальной земли найти пути лучей, исходящих из места землетрясения. Зная разности времен подхода продольных и поперечных волн, можно и для случая реальной земли найти расстояние от станции до места землетрясения и из показаний трех станций точно определить место землетрясения.



Фиг. 30

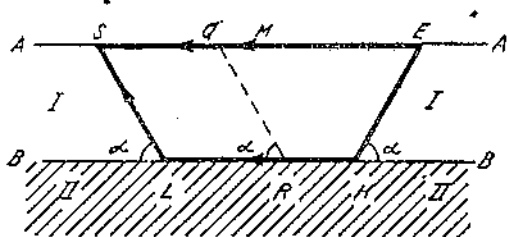
Имеются методы, позволяющие находить положение эпицентра из наблюдений, сделанных на одной станции. Методы эти гораздо более грубые, чем методы определения из данных трех или двух станций, и мы на них не останавливаемся.

Исследование упругих волн при землетрясениях, позволив определить пути подхода лучей, идущих от места землетрясения, дает представление о физических свойствах земного шара. Представление о центральном ядре и сложной каменной оболочке точно устанавливается современной сейсмологией, и изучение строения земного шара может быть выполнено сейсмологическими методами точнее и лучше, чем другими методами. В этом огромная заслуга современного учения о землетрясениях, и имена Вихерта, Голицына и Майна, создавших теорию и аппаратуру современной сейсмологии, останутся навсегда в области геофизики землетрясений.

§ 44. Искусственные землетрясения как метод изучения строения земной коры

Мы уже видели выше, что изучение землетрясений, возникающих естественным путем, позволяет путем сложного анализа записей подхода продольных и поперечных волн сделать интереснейшие заключения о строении земли.

Мы таким путем получаем общую грубую картину строения всего земного шара. Совершенно естественной является мысль, нельзя ли сотрясения почвы вызвать искусственно и использовать возникающие при искусственном землетрясении сейсмические волны для точного изучения геологического строения местности. Экспериментальная и теоретическая разработка явлений при искусственных землетрясениях позволила действительно во многих случаях решить задачу о детальном строении коры земли и в настоящее время сейсмический метод является одним из важнейших физических методов горной разведки.



Фиг. 31

Землетрясения производятся взрывом некоторого количества взрывчатого вещества или же даже просто падением груза, вызывающим возникновение продольных и поперечных волн. Запись доходящих до места наблюдения волн производится специальными чувствительными аппаратами, которые имеют в настоящее время настолько малые размеры, что могут удобно переноситься наблюдателями.

Чтобы иллюстрировать примером способ наблюдения сейсмических волн, мы рассмотрим самый простой случай структуры местности, именно случай, когда под горизонтальной поверхностью земли AA (фиг. 31) находится параллельный с поверхностью земли пласт BB. Требуется найти расстояние пласта BB от поверхности земли AA. Допустим, что в среде, лежащей между AA и BB [в первой среде (I)], упругие волны распространяются медленнее, чем во второй среде, лежащей глубже BB [второй среде (II)].

Как показывает теория, сейсмические лучи распространяются, во-первых, прямо от места взрыва E до места наблюдения S, давая лучи, идущие в первой среде вдоль по-

верхности AA . Кроме того, в S попадут волны $EKLS$, исходящие под таким углом из E , что, доходя до BB , они стекаются вдоль поверхности BB , образуя лучи KL . На своем пути лучи KL дают в сторону поверхности AA лучи RQ , делающие с границей двух сред BB угол α , равный углу, который делает с той же границей луч EK .

Зная расстояние ES , времена подхода сейсмического луча по пути ES и по пути $EKLS$, можно найти глубину залегания слоя BB . Можно решить и гораздо более сложные задачи и определить положение ряда слоев. Этот метод был особенно разработан Минтропом, Лазаревым, Заборовским и Гамбурцевым.

Чем значительнее землетрясение, тем на большую глубину может простирается изучение сейсмических волн. Особенно интересные результаты получены у нас в Союзе при взрывах, преследующих промышленные цели, когда взрывались огромные количества взрывчатых веществ и можно было на большую глубину проследить геологическое строение местности (Никифоров).

В области изучения детального строения земли метод искусственных землетрясений начинает играть все большую и большую роль, позволяя для земли сделать выводы о структуре ее коры, аналогичные тому, что позволяет сделать рентгенология для изучения структуры тела человека и животных или что позволяет для этой последней цели сделать метод выстукивания.

Глава 9

ЗЕМНОЙ МАГНЕТИЗМ И ЕГО ТЕОРИЯ

§ 45. Развитие учения о земном магнетизме

С отдаленнейших времен известно, что земной шар ориентирует магнитную стрелку так, что ее северный конец смотрит на север. Китайцы были первыми, кто за 1000 лет до нашей эры использовали для практических целей это наблюдение. Китайские путешественники издавна употребляли для определения стран света фигурку, связанную с подвижным магнитом и дающую возможность определять страны света.

В Европе свойство северного полюса магнита обращаться к северу впервые использовали для целей мореплавания

итальянцы, заимствовав эти сведения от китайцев и арабов. Флавио Джойо (1302—1330) был, повидимому, первым, кто построил морской компас, заключенный в оправу. В настоящее время мы едва можем себе представить все колоссальное значение этого изобретения. Никакие путешествия даже по ближайшим к Европе морям не были возможны без компаса, тем более невозможны были регулярные кругосветные плавания. Построение компаса было необходимым шагом к эпохе величайших географических открытий.

Во время своего знаменитого плаванья, приведшего к открытию Америки, Колумб сделал 13 ноября 1492 г. замечательное открытие — он доказал, что магнитная стрелка обращена своим северным концом не точно на север, а что между плоскостью географического меридиана и вертикальной плоскостью, проходящей через северный и южный полюсы магнитной стрелки, имеется угол D , получивший название склонения.

В 1510 г. Гартман подтвердил наблюдения Колумба, и в 1538 г. португалец де Кастро разработал удобный и точный метод измерения склонения.

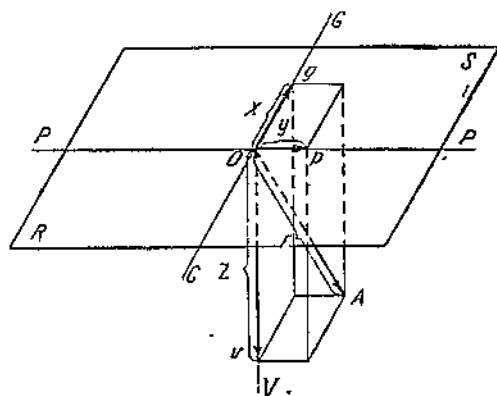
Эти открытия сделали эпоху в области земного магнетизма и имели важные практические последствия для мореплавания.

§ 46. Элементы земного магнетизма

Магнитная стрелка, помещенная в любом месте над землей, ориентируется всегда определенным образом в пространстве, обращая свой северный конец к северу. Мы можем отсюда заключить, что земля представляет собой прандиозное намагниченное тело, окруженное пространством, где обнаруживаются магнитные силы. Иначе можно сказать, что намагниченный земной шар вызывает появление вокруг себя магнитного поля. Чтобы составить себе ясное представление о свойствах земного магнитного поля, необходимо прежде всего получить точные данные о величине и направлении в различных точках земной поверхности магнитной силы, действующей на единицу магнетизма, или, как говорят, об интенсивности и направлении магнитного поля. Мы должны прежде всего указать, как определяются интенсивность и направление магнитного поля земли. Пусть (фиг. 32) RS есть плоскость, касательная к земному шару в точке наблюдения O .

Пусть GG есть направление географического меридиана, проходящего через точку O . PP есть параллель, проходящая

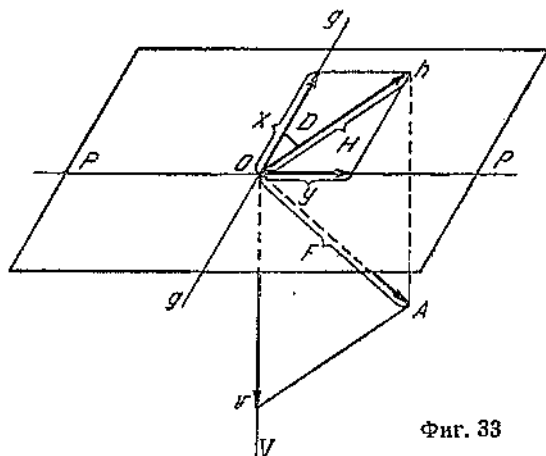
через ту же точку O . Наконец пусть V есть вертикальная линия, направленная вниз. Магнитная сила OA , действующая на единицу магнетизма, помещенного в O , характеризующая напря-



Фиг. 32

жение магнитного поля в O , может быть разложена по правилу параллелограмма на три перпендикулярные составляющие $Og = X$, $Op = Y$ и $Ov = Z$. Зная направление меридиана, параллели и вертикала, проходящих через точку наблюдения O , и измерив X , Y и Z , можно, как это легко видеть, найти

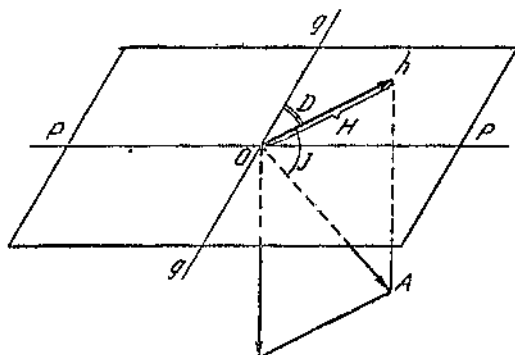
величину силы F и ее направление. Это можно сделать или построением или путем несложного вычисления.



Фиг. 33

Первый метод характеристики земного поля состоит в определении X , Y и Z , находимых непосредственным измерением. Отсюда, зная положение географического меридиана и параллели, проходящих через место наблюдения, а также вертикала, строят силу $OA = F$.

Можно поступать иначе. Можно непосредственно измерить горизонтальную составляющую земного поля $Oh = H$ (фиг. 33) и вертикальную составляющую $Ov = Z$. По правилу параллелограмма строят величину силы $OA = F$, зная перпендикулярные ее составляющие $Oh = H$ и $Ov = Z$. Остается только определить плоскость, в которой лежит сила F . Чтобы это сделать, находят угол D между географическим меридианом gg и положением горизонтальной магнитной стрелки, дающей направление Oh , направлением магнитного меридиана на месте наблюдения O . (Угол D называется *склонением*). Это второй метод определения магнитного поля в точке O , связанный с определением горизонтальной и вертикальной составляющих магнитного поля и склонения, был применен в широком масштабе при исследовании Курской магнитной аномалии.



Фиг. 34

Наконец, можно представить еще и третий метод определения поля земли, являющийся классическим методом, впервые введенным в науку Гауссом при его магнитных исследованиях, предпринятых в пятидесятых годах прошлого столетия. По этому методу определяют горизонтальную составляющую земного поля $Oh = H$ (фиг. 34) и измеряют угол D (склонение) и угол J между горизонтальной линией Oh и направлением поля OA . Угол J называется *наклонением*.

Три вышеуказанные метода можно просто уложить в следующую схему измерений:

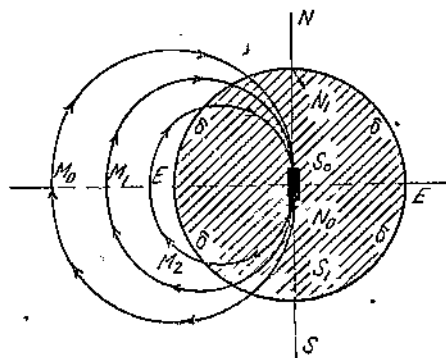
1 метод	2 метод	3 метод (метод Гаусса)
измеряются $\widehat{X, Y, Z}$	$\widehat{H, Z, D}$	$\widehat{H, D, J}$

Величины (X, Y, Z) , или (H, Z, D) или (H, D, J) , непосредственно определяемые на опыте специальными приборами и характеризующие магнитное поле земли, называются элементами земного магнетизма (или геомагнетизма).

§ 47. Законы распределения земного магнетизма.

Теория Гильберта и Био, теория Гаусса

Подробное изучение земного магнитного поля показало, что земля представляет собой огромных размеров магнит, имеющий в первом приближении два полюса. Один из них — северный — лежит в южном полушарии, другой — южный — в северном полушарии. Магнитные силовые линии M_0, M_1, M_2 (фиг. 35) начинаются у северного полюса



Фиг. 35

земли N_0 (в южном полушарии), пересекают на своем пути поверхность земли $\delta\delta$ и, проходя по окружающей твердую землю (океан, атмосфера), заканчиваются в южном полюсе земли S_0 (в северном полушарии).

Указанное представление развил впервые при первом грубом изображении земного поля Гильберт в его знаменитом сочинении «О маг-

ните» (1600 г.). Представление о центральном магните было развито в стройную аналитическую теорию известным французским физиком Био, который показал, что в первом приближении величина поля и его направление даются гипотезой бесконечно малого магнита, расположенного в центре земли. Необходимо, чтобы магнитная ось магнита N_0S_0 , соединяющая его полюсы, не совпадала с осью вращения земли, а делала бы с ней угол в 11° .

Как легко понять, картина намагничивания земли является совершенно одинаковой для всех плоскостей, проходящих через магнитную ось земли (совпадающую с магнитной осью бесконечно малого магнита N_0S_0).

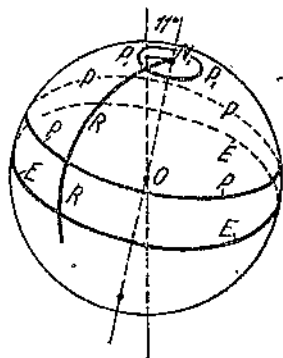
Если провести плоскость, проходящую через центр земли и, следовательно, через центр бесконечно малого магнита, перпендикулярно к его оси, то эта плоскость пересечет шаровую поверхность земли по большому кругу EE (фиг. 35), над которым силовые линии проходят параллельно поверхности земли. Угол наклона, являющийся углом между

горизонтом и направлением магнитной силы, равен здесь нулю. Если провести ряд плоскостей, перпендикулярных магнитной оси земли N_0S_0 (или NS), то эти плоскости пересекут поверхность земного шара по кругам с тем меньшим диаметром, чем ближе к магнитным полюсам земли N_1S_1 лежит плоскость. Круги, образующиеся на поверхности земли, носят название магнитных параллелей (фиг. 36).

Проводя через магнитную ось N_1S_1 плоскость RR , получаем в пересечении с землей дугу большого круга, в которой устанавливается магнитная стрелка, вращающаяся около центра тяжести. Этот большой круг называется магнитным меридианом.

Как легко понять, значения силы F во всех меридианах на одной и той же параллели равны и, следовательно, H и Z не зависят от магнитной долготы места. Вдоль одного и того же меридиана величина силы изменяется от экватора, где она наименьшая, до полюса, где сила наибольшая. Наклонение J также изменяется; как мы указывали, на экваторе $J=0$, на полюсе J равно 90° . В магнитных широтах от 0° до 90° (от магнитного экватора до магнитных полюсов) наклонение J увеличивается от 0° до 90° . В северном полушарии на северном магнитном полюсе северный конец магнитной стрелки обращен вниз и стоит вертикально. На южном полюсе к земле обращен южный полюс стрелки, также расположенный вертикально. Положение магнитной стрелки с северным (n) и южными полюсами (s) представлено на фиг. 37.

Более точные измерения показали, что гипотеза Гильберта и Био не удовлетворяет наблюдениям. Имеются отклонения от первого приближения, даваемого теорией распределения Био, и Гаусс в 1838 г. дал гениальное решение вопроса о распределении земного магнетизма, поставив задачу на строгую математическую почву. Гаусс прежде всего постарался освободиться от каких-либо гипотез. Единственно, что он принял как основание своих расчетов, это закон взаимодействия магнитных масс. Не делая далее никаких допущений о распределении магнетизма, Гаусс показал, что для всякой точки земного шара и окружающего



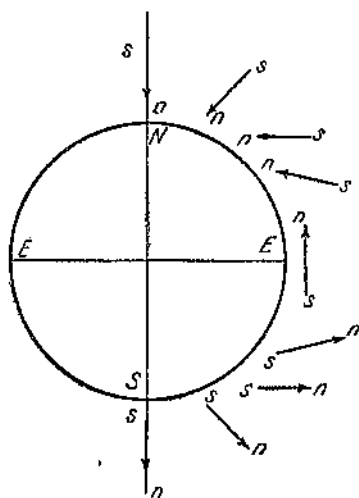
Фиг. 36

его пространства можно найти математическое выражение, из которого простыми вычислениями можно для заданной точки земли найти величины слагающих сил X , Y , Z . Выра-

жение, найденное Гауссом и играющее огромную роль в теории распределения земного магнетизма, называется потенциалом Гаусса.

Потенциал Гаусса представляет собой математическое выражение, зависящее от положения точки на земном шаре. В выражение потенциала входят члены с 24 коэффициентами, определяемыми из наблюдений, сделанных на поверхности земли.

Зная выражение потенциала Гаусса и найдя путем подсчетов из наблюдений на практике коэффициенты формулы, можно для любой точки земли найти величину и направление магнитной силы земли.



Фиг. 37

Метод Гауса приводит после обработки огромного количества наблюдений, собранных магнитологами всех стран, к иным результатам, чем упрощенная гипотеза Био.

По гипотезе бесконечно малого магнита величина силы на экваторе вдвое меньше, чем величина силы на полюсе. Пользуясь формулой Гаусса, мы находим, что отношение сил на полюсе и на экваторе не равно 2,0, а значительно больше. Теория Гаусса дает для этого отношение 2,4.

Из формул Гаусса можно найти положение магнитных полюсов земли по отношению к географическому полюсу. Расчеты дают следующие данные:

	Широта, φ	Восточная долгота λ (от Гринвича)
Северный полюс	73°35' (северная широта)	264°21'
Южный полюс	72°35' (южная широта)	152°30'

Оба полюса, как видно, не лежат на диаметре земного шара.

Были даны знаменитым американским магнитологом Бауэром и известным русским ученым Н. А. Умовым замечательные геометрические толкования гауссовой формулы. Дальнейшие работы позволили распространить сложные подсчеты Гаусса, выполненные им для сферического земного шара, на землю, имеющую форму эллипсоида вращения.

Одним из важных следствий, полученных Гауссом, явилось заключение, что постоянный земной магнетизм почти целиком зависит от причин, лежащих внутри земного шара, и может только незначительно зависеть от явлений, происходящих в атмосфере или в космическом пространстве.

Имеются ли внешние причины, создающие часть постоянного земного поля и зависящие от магнитных масс, расположенных вне тела земного шара, установить совершенно строго не удалось, хотя и имеются указания на возможность подобного поля, равно как и на возможность поля, зависящего от электрических токов.

Заканчивая настоящий параграф, мы должны указать, что абсолютное значение земного магнитного поля у поверхности почвы очень невелико. По сравнению с полями, наблюдаемыми в динамомашине, земное магнитное поле в среднем в 50 000 раз меньше.

§ 48. Организация международных работ по земному магнетизму. Работы института Карнеги

Первые исследования земного магнетизма носили неорганизованный характер. Но уже со второй половины 1600-х годов ученые начинают понимать значение организованных исследований земного магнетизма. В 1741 г. Цельзий в Упсале и Греем в Лондоне предприняли одновременные наблюдения магнетизма земли, чтобы установить влияние северных сияний.

Эпохой в развитии учения о земном магнетизме было учреждение магнитного ферейна Гауссом и Вильгельмом Вебером. По инициативе Александра Гумбольдта в то же время начинается в разных странах организация магнитных обсерваторий, имеющих задачей непрерывную регистрацию изменений элементов земного магнетизма.

Благодаря своему авторитету Гумбольдту удалось привлечь к работе большое количество государств, и магнитная

съёмка сделалась задачей, которую стали разрешать правительства и научные учреждения всех крупных культурных стран. В России были также созданы ряд первоклассных магнитных обсерваторий, из которых особенно большое международное значение приобрела магнитная обсерватория в Павловске (ныне Слуцк), где магнитные работы получили широкое развитие и оказали опомное влияние на организацию исследований геомагнетизма во всей России.

Полученный при съёмках материал концентрировался в центральных учреждениях каждой страны.

Крупнейшую роль в организации магнитных исследований в мировом масштабе сыграл Г. Ф. Неймайер, который поставил задачей своей жизни изучение магнитных процессов на земном шаре. Он был организатором двух первых полярных лет (в 1882—1883 и 1902—1903). В течение первого полярного года была исследована в магнитном отклонении Арктика, в течение второго полярного года — южные полярные страны.

Центральную работу за этот период развития науки выполняли магнитные обсерватории, первая из которых была создана в 1833 г. усилиями Гаусса и Вебера в Геттингене. В настоящее время имеется около 40 обсерваторий, ведущих часовые записи всех элементов, кроме того имеется около двух десятков станций, ведущих более упрощенную регистрацию. Наиболее известные магнитные обсерватории находятся в Слуцке (быв. Павловск, СССР), в Кью (Англия), в Парк Ст. Мор (около Парижа, Франция) и в Потсдаме (около Берлина, Германия).

В дальнейшей организации и развитии международных работ по земному магнетизму наибольшая роль принадлежит знаменитому американскому магнитологу Л. А. Бауэру. Подготовив себя к широкой деятельности в области геомагнетизма работами по магнитной съёмке Соединенных Штатов Америки, Бауэр в 1904 г. организовал при институте Карнеги в Вашингтоне Отдел земного магнетизма.

Имея обширные мастерские точных приборов, институт Бауэра снабжал инструментами не только американских исследователей, но и посылал магнитную аппаратуру далеко за пределы Америки, давая возможность ученым, не имеющим своих приборов, принять участие в общей международной съёмке.

Как понятно, вся съёмка, начатая со времени Гаусса, была связана с культурными странами. Малонаселенные области земли, вроде, например, Центральной Африки, не-

которых частей Америки, Сибири, не могли интересовать правительства этих стран и изучение земного магнетизма здесь не производилось. Укажем, например, что только после революции Б. П. Вейнбергу удалось получить первые пробные карты склонения Сибири, наблюдая угол D вдоль больших рек.

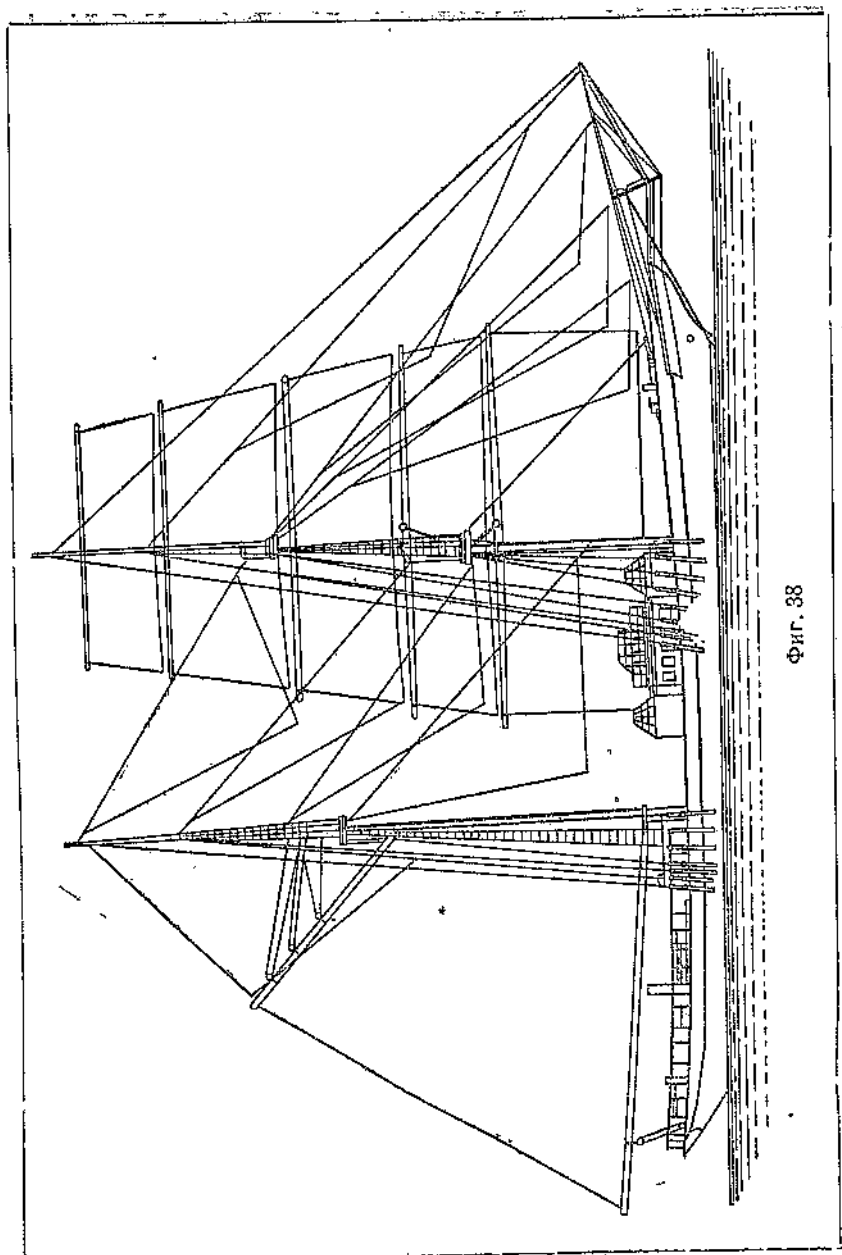
Бауэру и институту Карнеги принадлежит огромная заслуга организации ряда магнитных обсерваторий в Австралии, Африке и других малонаселенных местах. Для полного изучения земного магнетизма эти работы играли огромную роль.

Оставалась еще одна область, где изучение земного магнетизма не производилось по трудности исследования, в то же время эта область являлась наибольшей частью поверхности земного шара. Мы говорим об океане, который в магнитном отношении был почти совершенно не изучен до работ Бауэра. Бауэру принадлежит организация этих исследований, причем он вначале пользовался небольшой морской яхтой «Галилей». Главные работы выполнены знаменитой в истории магнитологии яхтой «Карнеги» (см. фиг. 38). Яхта «Карнеги» представляла сама по себе изумительный по конструкции инструмент. Все части ее, включая двигатель, якорь, цепи и арматуру, были построены из немагнитных материалов. Потребовался целый ряд сложных технических работ, чтобы можно было осуществить такое судно, где бы не было совершенно железа и где влияние отдельных частей на магнитную стрелку было бы вполне устранено. Это было выполнено с блестящим успехом, и яхта проделала ряд рейсов, давших миру изумительные по точности и по надежности сведения о распределении земного магнетизма на океанах и морях и позволивших, таким образом, еще более точно представить законы распределения земного магнетизма, чем это давали наблюдения, выполненные только на суше¹.

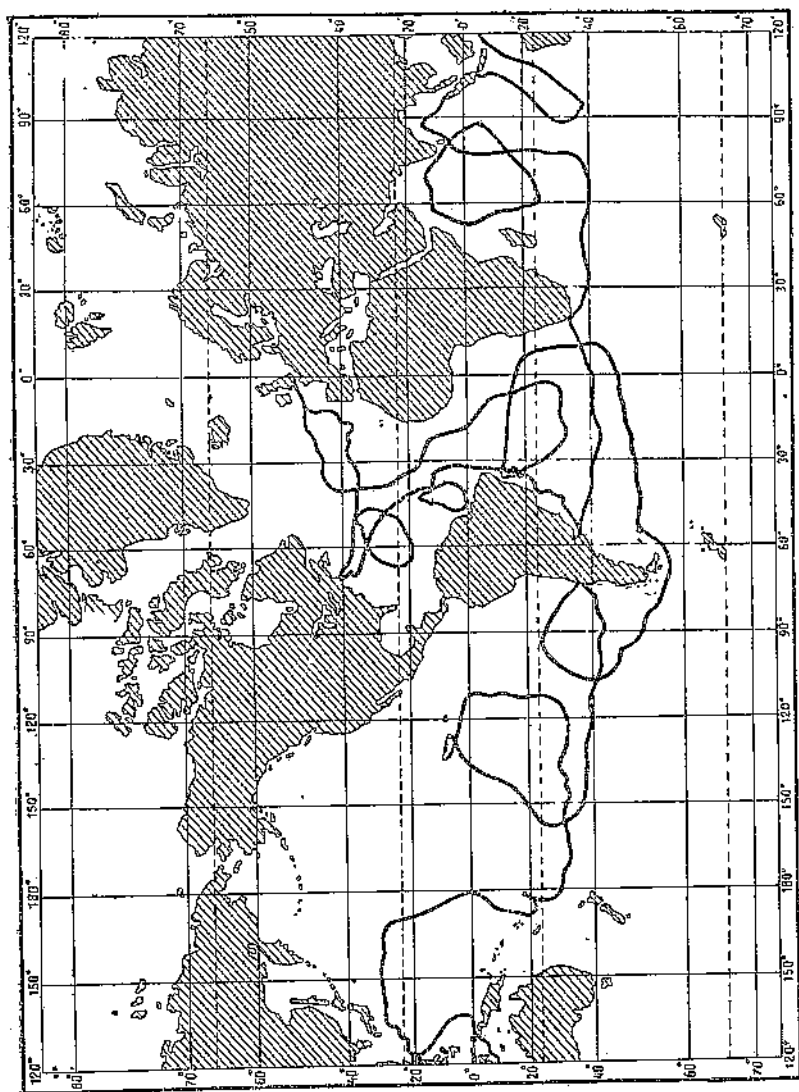
На фиг. 39 представлена карта, где линиями нанесены пути яхты «Карнеги», где были сделаны определения элементов земного поля.

Бауэр предполагал перенести исследования и в воздушную среду и исследовать поле над поверхностью земли. Эти данные были бы важным дополнением ко всем тем работам, которые были выполнены Отделом земного магне-

¹ В 1930 г. яхта «Карнеги» была разрушена взрывом, во время которого погиб ее знаменитый руководитель капитан Ауэльт.



Фиг. 38



Фиг. 39

тизма института Карнеги под руководством Бауэра и позволили бы окончательно решить задачу о количественном представлении магнитного поля земли. Задача это, однако, до сих пор не выполнена, и преемнику Бауэра после его смерти — Флемингу — предстоит огромное дело в этом направлении.

В заключение мы дадим карту распределения горизонтальной составляющей магнитного поля, причем точки с равными величинами горизонтальной составляющей соединены непрерывными линиями (фиг. 40). Если делать простейшее представление о магнетизме земного шара, допуская, что поле земли тождественно с полем весьма малого магнита, размещенного в центре с южным концом на север, то мы должны бы были получить линии одинаковых горизонтальных составляющих в виде непрерывных линий, параллельных друг другу и пересекающих экватор и параллели под определенным углом.

§ 49. Вариации земного магнетизма

При прубых исследованиях магнетизма земного поля мы можем не заметить каких-нибудь изменений в направлении и в величине магнитной силы. Если применять точные приемы регистрации, то легко заметить, что магнитные приборы не остаются, наоборот, никогда в покое, обнаруживая изменения как величины действующей силы, так и ее направления.

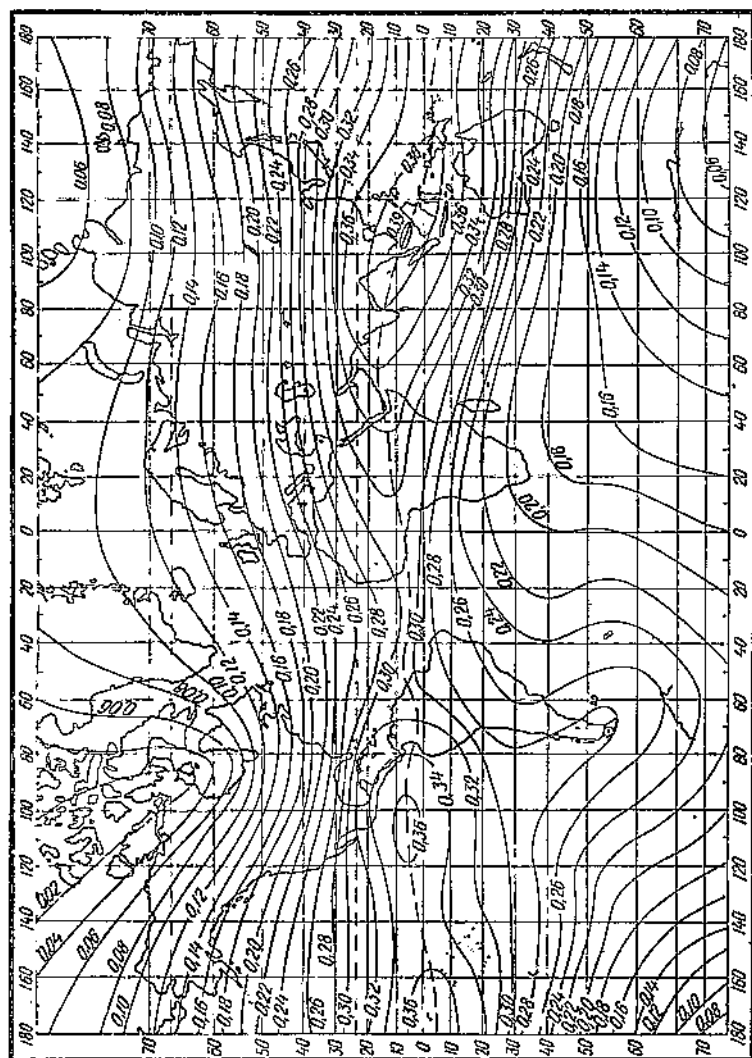
Систематические наблюдения, сделанные в различных точках земного шара, показывают, что изменения или вариации земного магнетизма могут носить различный характер.

Еще в 1682 г. Тахарт сделал в Сиаме наблюдение, что склонение D с течением времени изменяется.

Мы приведем в табл. 9 сопоставление величины склонения для ряда лет в Париже.

Таблица 9

Годы	D	Годы	D
1580	11°30' восточное	1813	22°18' западное
1618	8°0' "	1814	22°34' "
1663	0°0' "	1825	22°17' "
1678	1°30' западное	1858	19°6' "
1767	19°16' "	1874	17°30' "

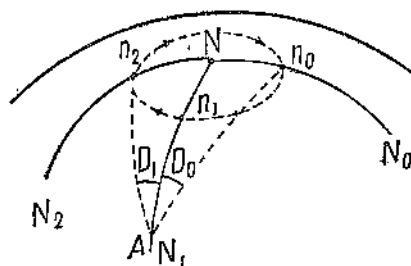


Фиг. 40

Мы видим, что склонение в Париже в 1580 г. было восточное, затем оно прошло через нуль в 1663 г., сделалось затем западным и увеличивалось до 1814 г., достигнув в этом году максимума. Затем оно опять стало уменьшаться.

Подобные изменения мы можем объяснить, если допустим, что магнитный полюс расположен не постоянно в одной точке земного шара, но что он движется около географического.

Пусть N (фиг. 41) есть географический полюс, вокруг которого по стрелке часов движется магнитный полюс (пунктирная линия p_0, p_1, p_2). В начальный момент времени магнитный полюс находится в p_0 и агогическая линия, т. е. линия, где склонение равно нулю, есть меридиан Np_0N_0 .



Фиг. 41

В Париже, расположенном в точке A на географическом меридиане Np_1N_1 , склонение, равное углу между географическим и магнитным меридианом (угол D_0), было восточное. В эпоху, когда магнитный полюс достиг в своем движении по пунктирной кривой географического меридиана Парижа Np_1N_1 (это было в 1663 г.), склонение в Париже было равно 0° .

В более поздние периоды, когда магнитный полюс находился в точке p_2 , склонение D_1 в Париже было западное.

Подобно склонению изменяется и наклонение. В 1671 г. в Париже наклонение составляло около 75° . К началу 1900-х годов оно уменьшилось, примерно, на 10° .

Изменения в наклонении можно определять для гораздо более отдаленных эпох, когда никаких магнитных измерений не было. Замечательный метод, предложенный Фольгеррайтером и Меллони, состоит в следующем.

Можно пользоваться обожженной глиняной посудой и глиняными кирпичами, в которых имеются следы железа, чтобы определить направление намагничивающей силы земного поля по отношению к горизонту. Из указаний древних авторов известно было, как при обжиге ставились сосуды и кирпичи. Обжиг этих предметов сообщал им намагничивание, направление которого, как показывает со-

временный опыт, совпадало с направлением магнитной силы земного поля. Намагничивание, полученное глиняными предметами при обжиге, очень устойчиво и мало изменяется как при нагревании на сотни градусов, так и от действия магнитного поля. Направление намагничивания, определенное таким способом, дало повод к исследованиям обломков древней посуды, причем в каждом из кусков, принадлежащих одному сосуду, направление намагничивания было такое, какое получилось бы, если бы целый сосуд обжигался в определенном положении.

Изучая намагничивание античных ваз, принадлежащих различным эпохам, Фольгерайтер доказал, что направление земного поля изменялось в разные эпохи. В районе Рима в VII в. до нашей эры величина наклона была слабо отрицательной (стрелка смотрела северным концом вверх). В конце существования римской империи, наоборот, эта величина сделалась слабо положительной.

Можно пользоваться для определения направления намагничивания в прошлые геологические эпохи существования земли намагничиванием горных пород. Согласно гипотезе Меллони, намагничивание вулканических горных пород возникает при действии земного поля во время их застывания. Пользуясь представлениями Меллони, ряд исследователей изучил магнитные свойства брусков, выпиленных из глины, залитой лавой. Интересно, что эти куски обнаруживали намагничивание, параллельное намагничиванию лавы. Зная положение брусков, выпиленных из горной породы, можно было найти как величину наклона, так и величину наклона в соответствующей местности, причем склонение, например в Ройа, оказалось на 50° превышающим современное склонение.

Изучение намагниченных образцов магнитных кварцитов, содержащих магнетит, в области Курской губернии, показало, что наклонение весьма близко к современному наклонению. Что касается до склонения, то оно не могло быть изучено.

При изучении вековых изменений наклона и наклонения было обращено внимание и на изменение напряжения земного поля. Однако только в XIX столетии удалось констатировать эти изменения, и заслуга в этом отношении принадлежит Бауэру. Бауэр мог воспользоваться целым рядом работ, произведенных различными исследователями в разные эпохи, и показал, что, пользуясь всеми данными, можно констатировать уменьшение намагничивания земли

от 1838 г. до 1884 г. Магнитный момент за это время уменьшился на 1,6%.

Во второй работе Бауэр нашел несколько более значительное уменьшение. Наконец, изучая третьим методом — методом вариаций интенсивности земного поля — Бауэр нашел величину, еще более превышающую первые определения. Таким образом мы можем из всех данных Бауэра заключить, что напряжение земного поля с течением времени для всей земли падает.

При тщательном изучении положения магнитной стрелки в течение суток уже в 1722 г. Греемом были отмечены суточные изменения склонения. Последующие наблюдения дали доказательства, что все элементы земного магнетизма обнаруживают в течение суток вариации своей величины. Многочисленные наблюдения, сделанные на станциях, рассеянных по всему земному шару, обнаружили, что эти изменения наступают в одно и то же время во всех точках поверхности земли.

Чтобы дать представление об изменениях элементов земного магнетизма в течение суток, мы воспользуемся систематическими наблюдениями в Кью за период от 1890 до 1900 г. и дадим средние отклонения, наблюденные для склонения D (в минутах), для наклонения J (в минутах) и для величины горизонтальной составляющей H . Наблюдения сделаны в спокойные дни, когда не наблюдается внезапных изменений элементов, вызванных магнитными бурями.

Таблица 10

Изменения элементов земного магнетизма в Кью (1890—1900)
для июня

	D	J	H
Минимум	— 5,02	— 0,75	— 233
Часы	7	19	10
Максимум	+ 5,60	+ 1,27	+ 153
Часы	13	9	19

Подобно тому как имеется суточный ход элементов, наблюдается их изменение в течение года и, кроме того, имеются в течение ряда лет правильные изменения суточ-

ных вариаций земного магнетизма, которые дают период изменения около 11 лет (10,33 года по подсчетам Ламона). Этот период изменения суточных вариаций, по данным английского физика и метеоролога Себина, совпадает с изменением частоты солнечных пятен. В дальнейшем мы увидим, какое огромное значение имеет деятельность солнца для магнитных явлений на земле.

Помимо правильных периодических изменений элементов геомагнетизма, они обнаруживают случайные, непериодические изменения, носящие название магнитных бурь. Магнитные бури могут охватывать всю землю; мы рассмотрим некоторые случаи магнитных бурь ниже, когда будем говорить о полярных сияниях.

Заканчивая настоящий параграф, мы укажем, что обращение земли вокруг солнца, движение луны и планет по отношению к земле могут вызывать, как показывают современные исследования, незначительные изменения элементов земного магнетизма.

§ 50. Местные и региональные аномалии

Мы видели, что для описания магнетизма земли можно в первом приближении считать, что земной шар представляет собой тело, в центре которого находится небольшого размера магнит огромной силы. Магнитные параллели и магнитные меридианы представляют собой в этом случае правильные круги; картина распределения магнетизма по поверхности земного шара была описана выше. Математический прием, предложенный Гауссом, дает более сложную картину: экватор и меридианы не представляют собой правильных линий, обнаруживая целый ряд отклонений от больших кругов (см. фиг. 40). Таким образом, если считать, что нормальный магнетизм представляется схемой малого магнита, то почти каждая точка земли является в этом отношении аномальной. Были в разное время предложены методы отделения нормальных мест и мест аномальных, обнаруживающих отклонение от нормы.

Совершенно иное будет, если мы будем исходить из гауссовой теории распределения магнетизма. Если поверхность земли была бы покрыта достаточно густой сетью точек, в которых были произведены наблюдения, то вычисленные по методу Гаусса, на основании существующих наблюдений, величина и направление силы земного поля совпадали бы в пределах погрешности с наблюдаемыми величинами и аномалий не было бы.

Однако во многих местах земного шара имеются настолько резкие отклонения в небольших районах не только от первого приближения, полученного из гипотезы бесконечно малого магнита, но и от более точного распределения, даваемого формулой Гаусса, основанного на ограниченном числе современных наблюдений, что эти места приходится выделять в особые области, которые носят название областей магнитных аномалий и, смотря по величине области распространения этого возмущения, отличают региональные и местные аномалии.

При каждой съемке в каждой стране можно отыскать области, которые должны быть отнесены к аномалиям, и для практической цели горной разведки такие местные аномалии часто могут представлять большой интерес, указывая на присутствие магнитных руд железа.

Наибольшую в мире аномалию представляет собой Курская магнитная аномалия, тянущаяся в виде ряда полос с северо-запада на юго-восток через Курскую область. Наибольшей величины аномальных магнитных полей достигает северная полоса, идущая от Дмитровского уезда бывшей Орловской губернии через уезд Щитровский, Тимский и направляющаяся дальше в область Старо-Оскольского уезда, где аномалия делится на две отдельные ветви.

Северная полоса аномалии, имея ширину возмущенной области от 2 до 10 км, тянется на протяжении более чем 200 км через всю Курскую область и переходит к северу и к югу в слабо аномальные места, характеризующие собой магнитное поле Курской области.

Южная часть аномалии состоит также из ряда полос, тянущихся параллельно главной северной полосе.

Открытие Курской аномалии принадлежит Смирнову, который, предприняв первые систематические магнитные съемки России, случайно нашел в Курской губернии ряд аномальных мест (1872—1878). После него целый ряд исследователей занимался вопросами Курской аномалии (Сергиевский, Род, Пильчиков), причем их изумительные открытия были подтверждены известным французским магнитологом Муру, который был специально приглашен для изучения аномалии в Курской губернии.

В течение 18 лет затем вопросом об исследовании Курской аномалии занимался Лейст, который, произведя по методу Гаусса в 4500 точках Курской губернии определение склонения, наклонения и горизонтальной составляющей, дал общую сводку данных, характеризующих аномалию. К со-

жалению, весь числовой материал и карты Лейста, увезенные им в Германию, после его смерти погибли для науки, и в 1918 г. по инициативе В. И. Ленина было предпринято снова переисследование всей Курской области.

Для этой работы была организована при Всесоюзной Академии наук комиссия, и руководство магнитными, гравитационными и геодезическими работами было возложено Академией на П. П. Лазарева.

Пользуясь упрощенными методами исследования магнитной силы и ее направления, указанными А. Н. Крыловым, магнитологи исследовали значительную часть севера Курской области, где была снова открыта северная полоса аномалии. С 1920 г. можно было уже приступить наряду с исследованием геофизического характера к геологическому изучению аномалии и к изучению ее путем глубокого бурения. Эти работы проводились, параллельно геофизическим работам, Комиссией, работавшей при ВСНХ¹.

Исследование силы тяжести над аномалией, выполненное по предложению Лазарева Михайловым, Никифоровым и работниками корпуса топографов, показало наличие под землей тяжелых масс. Пользуясь распределением магнитных сил в области аномалии, можно было указать те места, в которых должно было быть произведено бурение. Эти места были отмечены магнитно-гравитационным отделом, и данные бурения в точности подтвердили впоследствии эти указания.

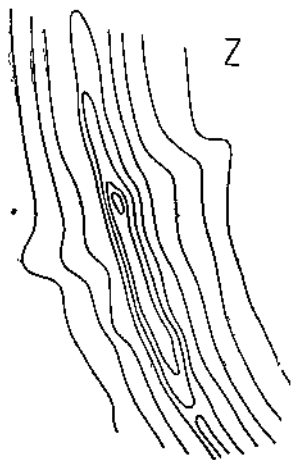
В результате исследования было обнаружено присутствие кварцитов с большим количеством магнетита. Последующие исследования, произведенные, начиная с 1930 г., по указаниям товарища И. В. Сталина, показали, что южные части северной полосы аномалии, как это и нужно было ожидать из физических определений, обладают более значительным содержанием железа, чем северные.

Мы не будем останавливаться подробно на описании этой аномалии и отсылаем интересующихся к ряду статей и книг акад. П. П. Лазарева и акад. А. Д. Архангельского, которые характеризуют эту аномалию с ее физической и геологической стороны; укажем только, что в истории прак-

¹ Председателем Комиссии ВСНХ был назначен профессор (позднее академик) Губкин, его заместителем и начальником магнитно-гравитационного и геодезического отдела акад. Лазарев, начальником Геологического отдела профессор (ныне академик) Архангельский; там же бурение производилось рядом видных специалистов по глубокому бурению под непосредственным наблюдением Губкина.

тической геофизики исследование Курской аномалии было первым случаем в мире, когда физические методы разведки были применены для нахождения полезных ископаемых на большой глубине (около 100—150 м).

Исследование Курской аномалии, давшее интересные научные и практические результаты, явилось толчком для развития геофизических методов исследования рудных залежей, и в настоящее время как за границей, так и у нас методы магнитные, гравитационные, сейсмические и электрические широко применяются для открытия полезных ископаемых.



Фиг. 42

В теоретическом отношении работы интересны потому, что они позволили установить новые приемы, развитые Лазаревым, для оценки количества руды. Эти приемы позднее были видоизменены Гамбурцевым и дали возможность, зная плотность руды и картину распределения силы тяжести над залежью, определять общее количество всей руды. Указанные приемы показали, что мы имеем в области Курской аномалии огромные залежи, которые должны получить большое практическое значение в особенности тогда, когда разрабатываемые в настоящее время залежи начнут иссякать.

Уже первый подсчет, основанный на не вполне точных данных бурового исследования и на данных магнитных и гравитационных работ, позволил Лазареву определить до глубины в 300 м количество железа в районе северной полосы Курской аномалии порядка 20—25 млрд. тонн. Таким образом практическое значение этой аномалии должно быть очень велико, и для развивающегося социалистического строительства Курская аномалия должна сыграть огромную роль. Все работы в области аномалии проходили под непосредственным и постоянным наблюдением В. И. Ленина. В последний период огромный интерес к этим работам проявил И. В. Сталин, по инициативе и указанию которого прекращенные в 1926 г. Президиумом ВСНХ работы были снова в 1930 г. возобновлены.

Мы можем сказать, что за десять лет работы над аномалией при советской власти сделано во много раз боль-

ше, чем было сделано с момента открытия аномалии Смирновым до 1918 г., т. е. в течение 40 с лишним лет. На фиг. 42 мы даем направление и величины линий, соединяющих равное Z в области Щигров, где впервые было проведено бурение.

В теоретическом отношении огромный интерес представляет собой то обстоятельство, что, пользуясь наблюдением магнетизма колонок руды, полученных при алмазном бурении, Лазареву удалось показать, что магнитное поле земли в геологические эпохи в области Курской губернии было значительно больше, чем магнитное поле, которое мы имеем в настоящее время.

§ 51. Заряд земли. Теория Аррениуса. Полярные сияния

Из многочисленных опытов известно, что поверхность земли несет отрицательный электрический заряд. Происхождение заряда земли долгое время являлось непонятным, пока работы Сванте Аррениуса не выяснили причину его появления и условия постоянства.

По представлению Аррениуса, заряд земли связан с процессами, происходящими на солнце. Как мы знаем, солнце представляет собой раскаленную на поверхности до 6000° массу, окруженную газообразной атмосферой. Излучение массы солнца содержит огромное количество ультрафиолетовых лучей, имеющих способность сильно ионизовать газы и металлические пары, поглощающие эти лучи.

Вильсон доказал, что ионы способны осаждать на себе пересыщенные пары воды и других жидкостей; по всей вероятности они осаждают на себе и пары металлов. Аррениус считает, что находящиеся в атмосфере солнца пары и газы осаждаются на ионах, образовавшихся под действием ультрафиолетовых лучей, и капельки, возникшие около положительных и отрицательных ионов, постепенно растут. Как известно из опытов Вильсона, осаждение наблюдается легче на отрицательных ионах. Это обстоятельство Аррениус особенно подчеркивает в своей теории.

В атмосфере солнца мы наблюдаем, таким образом, явление под влиянием ультрафиолетовых лучей ионизации, вызывающей осаждение на отрицательных электронах мельчайших жидких капелек, получающих отрицательный заряд. Капельки испытывают, как и всякое материальное тело, давление со стороны лучей солнца, и если они достигают определенных размеров, то давление солнечных лучей

делается больше, чем притяжение со стороны массы солнца, и капельки начинают разлетаться под влиянием сил светового давления лучей солнца в разные стороны. На своем пути к земле заряженные частички встречают магнитное поле земного шара и, двигаясь около силовых линий поля по спиралям, образуют около северного и южного магнитных полюсов скопления отрицательных зарядов. При достаточном заряде скопления отрицательных частиц могут давать разряды по направлению к земле. Разряды отрицательного электричества вызывают свечение разреженных газов, находящихся в верхних слоях атмосферы; это свечение и представляет собой полярные, или северные, сияния.

Излучение солнца в разное время изменяется по интенсивности, и максимальные излучения должны наблюдаться в том случае, если массы из внутренних горячих частей солнца достигают его поверхности. Это наступает при перемещивании вещества на поверхности солнца, которое является наиболее энергичным, когда на солнце можно наблюдать большое количество пятен. С появлением пятен связан переход внутренних, более нагретых частей солнца на поверхность и, таким образом, количество излучаемых ультрафиолетовых лучей должно идти параллельно с количеством пятен на диске солнца.

Так как степень ионизации зависит от количества ультрафиолетовой радиации солнца, то понятно, что относительное число солнечных пятен должно быть связано с количеством образующихся отрицательных ионов и с количеством заряженных частиц, которые доходят до северного и южного полюсов земли, создавая зоны отрицательных электрических зарядов.

Первое следствие, вытекающее из теории Аррениуса и подтвержденное рядом наблюдений, заключается в параллелизме между числом полярных сияний, наблюдаемых в данный год, и деятельностью солнца, выражаемой количеством солнечных пятен.

Второе обстоятельство, выводимое просто из представления Аррениуса, заключается в том, что явления полярных сияний связаны с разрядом отрицательного электричества, принадлежащего заряженным частичкам и электронам, расположенным в определенных зонах около северного и южного полюсов. Разряды по направлению к земле должны идти по спиралям вдоль магнитных силовых линий и поэтому, если бы мы находились где-нибудь около по-

люса и видели бы пути разрядов, то нашему взору представлялась бы картина, имеющая форму многолучевой звезды. Лучи северного сияния являются путями заряженных частиц, или электронов. Поэтому многолучевое сияние есть один из видов полярных сияний, которые среди других видов обращают на себя большое внимание своей изумительной красотой.

Разряды, связанные со свечением воздуха и идущие почти отвесно к поверхности земли вдоль силовых линий, могут, если на них смотреть сбоку, дать картину так называемых драпри.

После разряда остается по пути его прохождения ионизованный газ, на ионах которого легко осаждаются капли воды. Мы таким образом можем объяснить появление облаков по пути лучей северного сияния.

Движение отрицательного электричества, протекающего от верхних слоев атмосферы к земле, должно обнаружиться появлением магнитного поля. Наблюдения действительно показывают, что каждое проходящее над данным местом полярное сияние дает магнитное действие, соответствующее потоку отрицательного электричества от верхних слоев атмосферы к земле.

Движение электронов около линий земного магнитного поля должно приводить по теории Аррениуса к возможным разрядам отрицательного электричества из верхних слоев атмосферы по направлению к земле не только у полюсов, но и во всех широтах. Различные должны быть только количественным. Около полюсов разряды должны быть очень частыми, и они должны делаться все реже и реже по мере того, как мы будем переходить от севера все более и более на юг. Полярные сияния должны, таким образом, по теории наблюдаться во всех широтах. Почему же этого не наблюдается на самом деле? Аррениус дает этому следующее объяснение.

Частицы, доходящие от солнца к экватору и образующие спирали около магнитных силовых линий земли, достигают в значительном количестве, как полагает Аррениус, полюса только к позднему вечеру. Образуют там значительные скопления электричества; они дают в это время разряды по направлению к земле.

Таким образом первая причина, почему в южных широтах мы не видим разрядов, заключается в том, что частицы относятся магнитным полем земли к полюсам и разряды там более часты, чем на юге, кроме того, разряды наблю-

даются там вечером и благодаря этому яснее видны для глаза, чем разряды в более южных широтах, наступающие в более раннее время, когда ярко светит солнце.

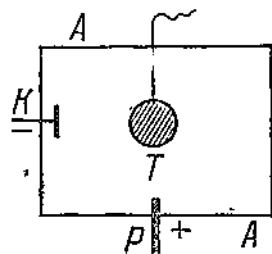
Можно применить для открытия северных сияний один метод, позволяющий более точно изучать появление разрядов в верхних слоях атмосферы. Как известно, спектр полярного сияния характеризуется своеобразной зеленой линией, подробно изученной Вегардом и зависящей, как первоначально думал Вегард, от свечения азота, выделяющегося из кристалликов твердого азота. Если направить спектроскоп с огромной дисперсией на такую часть неба, где мы желаем исследовать полярное сияние, мы можем сильно ослабить благодаря дисперсии непрерывный спектр, даваемый небом и маскирующий в обыкновенных спектроскопах появление полос, характерных для полярного сияния. Тогда мы должны увидеть линейный спектр полярного сияния. В зеленой части спектра мы должны наблюдать зеленую линию, характерную для полярного сияния. Опыты, сделанные в этом направлении рядом исследователей, дали положительные результаты, и мы можем утверждать, что полярные сияния могут наблюдаться на значительной части земной поверхности, а не только у северного и южного полюсов.

Изучение движения заряженных частичек у поверхности земли было более подробно исследовано работами двух скандинавских исследователей — Штёрмера и Биркеланда. Исследование Штёрмера показало, что можно математически определить направление и траектории движения зарядов около магнитного поля земли. Пользуясь остроумным приемом исследования, Штёрмер показал, что распределение линий, по которым происходит разряд заряженных частичек (электронов), может быть точно предвычислено.

Наблюдая далее одновременно при помощи двух фотографических аппаратов, направленных с двух далеко отстоящих пунктов на определенную часть неба, и снимая таким образом стереоскопически полярное сияние, Штёрмер мог сравнить опытную траекторию отрицательно заряженных частиц с траекторией, полученной им теоретически. При этих исследованиях получилось превосходное подтверждение расчетов, которое дополнило, таким образом, общую теорию, изложенную выше и впервые высказанную Паульсеном, а затем развитую подробно Аррениусом.

Биркеланд подошел к вопросу о полярных сияниях иным путем, создавая экспериментально на модели это яв-

ление¹. Биркеланд поступал следующим образом. В большой стеклянный призматический сосуд АА (фиг. 43), в котором можно было получать пустоту, Биркеланд впаивал электрод К, являющийся катодом и, следовательно, дающий поток электронов. Сбоку помещался положительный электрод Р. В центре сосуда находился шар Т, внутри которого имела обмотка, по которой мог проходить электрический ток. Шар, названный Биркеландом тереллой (землица), являлся, таким образом, электромагнитом, ось которого была расположена по отношению к источнику катодных лучей так, как располагается ось земли по отношению к потоку отрицательно заряженных частичек, летящих от солнца. Чтобы видеть эффект действия разряда катодных лучей на шар, Биркеланд покрывал поверхность тереллы флуоресцирующим веществом, обнаруживающим присутствие в данном месте движущихся электронов. Опыты показали, что разряд и свечение поверхности тереллы наблюдаются в двух зонах около северного и южного полюсов ее, причем все детали теории Аррениуса и Штёрмера были подтверждены экспериментальным путем. Мы видим, что в теории Аррениуса связывается



Фиг. 43

между собой целый ряд космических и геофизических явлений. Теория объясняет параллелизм между частотой полярных сияний и солнечной деятельностью, далее обнаруживается влияние числа солнечных пятен на число магнитных бурь, вызываемых полярными сияниями. Наконец, связывается отрицательный заряд земли с деятельностью солнца. Мы получаем, таким образом, в этой части геофизики стройную физическую картину явлений, зависящих от одной общей причины — от действия лучистой энергии солнца

Теория Аррениуса имела качественный характер, ее дальнейшее развитие в исследованиях Штёрмера и Биркеланда придало общим воззрениям Аррениуса количественный физический характер и создало стройную теорию обширного класса космических и геофизических процессов.

¹ Для более подробного ознакомления с замечательными исследованиями Штёрмера и Биркеланда мы отсылаем читателя к интересной статье акад. А. Н. Крылова „Северные сияния и магнитные бури“, напечатанной в „Успехах физических наук“, том 1, вып. 1, стр. 1, 1918. Исследования Штёрмера в настоящее время очень важны для исследования отклонений в поле земли потоков космических лучей.

Остается до сих пор все еще неясной природа заряженных частиц, летящих от солнца. Аррениус считает эти частицы капельками, движущимися под влиянием сил светового давления. Биркеланд предполагает, что мы имеем здесь дело с электронами, испускаемыми солнцем и образующими пучок катодных лучей.

При всей своей стройности теория Аррениуса не лишена все же недостатков, которые некоторые исследователи и пытались устранить. Прежде всего были сделаны возражения, касающиеся распространения электронов, или заряженных частиц, от солнца к земле. Так как частицы, или электроны, все имеют отрицательный заряд, то можно было бы думать, что взаимное отталкивание зарядов вызовет рассеяние пучка. Это возражение, однако, является несущественным, так как излучение отрицательных частиц и электронов происходит во все стороны и, следовательно, общий поток их во всех направлениях на одном расстоянии от солнца должен иметь одну и ту же плотность.

Более значительные трудности для объяснения представляет существование кругового экваториального тока в верхних слоях атмосферы, существование которого, как это вытекает из данных Биркеланда, необходимо для объяснения ряда явлений, связанных с полярными сияниями. Заряженные одновременно электроны в этом круговом токе должны бы были разлететься в разные стороны. Далее большое затруднение представляет собой то обстоятельство, что земное электрическое поле мало изменяется при явлениях, связанных с магнитными бурями. Шустер и позднее Чепман пытались дополнить теорию Аррениуса — Биркеланда допущением, что магнитные бури на земле не производятся непосредственно потоками электронов, летящих от солнца, а возникают благодаря этим потокам в воздушной оболочке земли. Насколько представления Аррениуса, Биркеланда и Штёрмера точны, строги и укладываются в математическую теорию, настолько эти новые воззрения пока еще не окончательно развиты и не могут поэтому считаться законченной теорией. Несомненно, что область магнитных бурь и полярных сияний еще долгое время будет привлекать внимание исследователей.

В заключение мы упомянем об интересных опытах Биркеланда, при которых намагниченная терелла являлась источником катодных лучей. В этом случае разряд, получаемый от тереллы, образовал лучи, аналогичные солнечной короне.

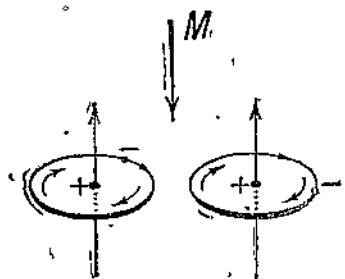
§ 52. Физические теории земного магнетизма

При изучении явлений земного магнетизма бросается в глаза то обстоятельство, что ось вращения земли и направление намагничивания земного шара почти совпадают друг с другом, делая небольшой угол в $11,5^\circ$. Это заставляет думать, что причиной земного магнетизма должно быть вращение земли.

В настоящее время предложено огромное количество физических теорий земного магнетизма, связывающих его с действием вращения, но, ни одна из них не может претендовать на полное объяснение всех явлений. Еще в девяно-

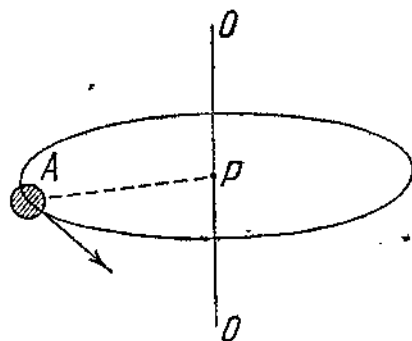
стых годах знаменитые физики Кельвин, Дж. Дж. Томсон, Шустер сделали гипотезу, что всякая нейтральная материальная масса при вращении ее может давать магнитное поле. Опытные данные и ближайшие обоснования этой гипотезы, однако, не были даны. Создание Томсоном, Резерфордом, Бором учения о строении материи позволило Эйнштейну высказать предположение, обосновывающее гипотезу Кельвина — Томсона — Шустера.

Мы знаем, что каждый атом состоит из центрального положительно заряженного тела — ядра и ряда электронов, движущихся около него по круговым или эллиптическим орбитам. Мы можем рассматривать атом, как гироскоп, в котором вращающуюся массу составляет электрон, движущийся в определенной плоскости около ядра. Эйнштейн допускает, что вращение ориентирует атомные гироскопы (фиг. 44), располагая в параллельных плоскостях плоскости вращения электронов так, что, смотря в направлении стрелки M , мы видим при определенном направлении вращения электроны, вращающиеся по стрелке часов. Движущийся по кругу или эллипсу электрон равносителен по своим действиям электрическому току, создающему магнитное поле, и, следовательно, вращение должно намагничивать нейтральное тело. Северный полюс при том направлении движения электронов, которое представлено на фиг. 44, будет обращен к наблюдателю, смотрящему сверху по M . С другой стороны, намагничивание тела должно заставить отдельные элементар-



Фиг. 44

ные атомные магниты поворачиваться, обращая свою северную сторону в одном направлении. Подобный поворот гироскопов должен создать в теле силы, приводящие его во вращение. Этот эффект и был наблюден Эйнштейном, де Гаасом и Барнетом. Однако эффект Эйнштейна, хотя на самом деле и существует, однако земного поля объяснить не может, так как оно в 10^{10} раз (в 10 миллиардов раз) больше того, что дает эйнштейновская теория. Лебедев, а за ним и другие ученые сделали предположение, что центробежная сила действует на отрицательные электроны сильнее, чем на положительно заряженные ядра атомов. На составные части нейтрального атома А (фиг. 45), вращающегося около оси ОО, дей-



Фиг. 45

ствуют, таким образом, силы, которые удаляют отрицательно заряженный электрон от его положения равновесия на большее расстояние, чем положительно заряженный остаток атома. Из таких соображений Лебедев выводит направление магнитных силовых линий вращающейся земли и, сравнивая их расположение с реальным полем земли, находит хорошее совпадение

между тем, что дает его гипотеза, и наблюдением у поверхности земного шара. Однако величина магнитного поля, полученная из данной гипотезы, во много раз (по меньшей мере в 10^{17} раз) меньше реального поля земли. Таким образом и эта гипотеза не оказывается приемлемой.

Есть возможность подойти иным путем к созданию магнитного поля вращающейся земли. Мы рассматривали до сих пор нейтральную землю и искали причин ее намагничивания во всей ее массе и видели, что ни одно из явлений, действительно наблюдаемых в природе, не является достаточным, чтобы создать такое поле, какое дает земля.

Можно, однако, принять во внимание, что земля не является нейтральной, что земля несет отрицательный электрический заряд. Вращение заряда, равносильное току, должно создать магнитное поле. Эффект магнитного действия вращающихся заряженных тел был открыт известным американским физиком Роулендом и ему же первому при-

надлежит (1876—1879) гипотеза о создании магнитного поля земли, благодаря вращению ее отрицательного заряда. Лазарев и Эйхенвальд (1908—1910) показали, что направление силовых линий у поверхности земли, вычисленное из эффекта Роуланда, совпадает с направлением, наблюдаемым в действительности. Однако величина магнитного поля земли, получаемая от эффекта Роуланда, будучи приблизительно в сто раз больше, чем эффект Эйнштейна, и во многие тысячи раз больше эффекта Лебедева, все же в 10^5 степени раз меньше, чем реальное поле земли. Можно было бы думать, что слабое магнитное поле, создаваемое движением поверхностного отрицательного заряда, может быть усилено благодаря железному ядру. Эту гипотезу высказал в 1910 г. Лазарев, однако при обычных представлениях о внутренности земли и с этим допущением ничего сделать нельзя. Известно, что железо магнитно только при температурах, лежащих ниже 750° , ниже так называемой точки Кюри. Около 750° железо делается немагнитным и на него совершенно не действует магнит. Обычно представляют себе, что вся внутренность земли имеет температуру выше 1500° и по последним данным даже около 2200° . Следовательно, железное ядро находится в немагнитном состоянии и не может влиять на увеличение поля, создаваемого вращением электронов.

Чтобы иметь возможность получить влияние железного ядра земли, можно было бы допустить изменение точки Кюри с повышением давления. Однако существующие опыты не дают оснований для подобного предположения и остается только предположить, как это и делает Лазарев, что ядро имеет температуру ниже точки Кюри, и следовательно, идя в глубь земли, мы встречаем сначала повышение температуры до известного предела (до 2200°), а затем наблюдается падение температуры.

Однако одним только роулендовским эффектом при наличии намагничивания ядра все же, по видимому, невозможно объяснить все земное поле и поэтому остается еще широкая область самых различных гипотез об изменении основных законов, гипотез, позволяющих объяснить появление магнитного поля земли.

Были предложены гипотезы об изменении электростатических законов Кулона, позволяющих при вращении нейтральной материи получить магнитное поле. Наконец, в некоторых гипотезах были использованы данные об огромных давлениях в центре земного шара, достигающих от 1

до 2 миллионов атмосфер. При таких давлениях по гипотезам авторов изменяются электродинамические законы так, что вращающаяся материя даже при очень высокой температуре дает магнитное поле.

Эти последние гипотезы особенно интересны потому, что они позволяют объяснить не только магнитное поле вращающейся земли, но и магнитное поле солнца.

Во всяком случае нужно помнить, что несмотря на огромные усилия выдающихся исследователей, теории земного магнетизма, объясняющей все явления, не существует, и для исследователей остается широчайшее поле новых возможных гипотез, которые могут привести к открытию новых явлений в области физики.

Отметим в заключение, что некоторые исследователи придавали большое значение падению температуры от центра к периферии и полагали, что эта разность может создать необходимые условия распределения зарядов, которые, вращаясь, могли бы дать магнитное поле (Лазарев). Наконец, О. Ю. Шмидт высказал предположение, что вращающееся сильно разогретое тело может дать магнитное поле. Эта гипотеза, как и ряд других предположений, нуждается в экспериментальной проверке.

Глава 10

ИЗМЕНЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ЗЕМЛИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЕЕ ДВИЖЕНИЯ ОКОЛО ОСИ И ВОКРУГ СОЛНЦА

§ 53. Общее понятие о лучеиспускании.

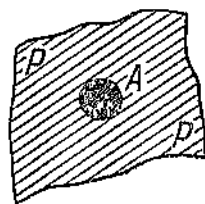
Излучение черного тела. Закон Стефана — Больцмана

Прежде чем подойти к изучению влияния солнечного излучения на температуру земли и планет, мы должны познакомить читателя с законами, управляющими испусканием энергии нагретыми телами. Этот отдел физики, развившийся благодаря работам Кирхгофа, Вина и Планка в стройную дисциплину, явился основанием для учения об атомах энергии, о квантах.

Из опыта ежедневной жизни известно, что при постепенном разогревании тела испускаемый им свет является сначала вишнево-красным, затем при дальнейшем нагревании свет, излучаемый телом, превращается в яркокрасный, затем он переходит в желтый и, наконец, в белый.

Тела разного состава и цвета при нагревании^о до одной и той же температуры дают свечение разной яркости. Мы можем простыми опытами убедиться, что чем темнее при обыкновенной температуре тело, тем оно более ярко светится, будучи накалиено до определенной температуры.

Этот первый закон излучения удобно демонстрировать следующим способом. Возьмем тонкий белый блестящий листок из платины *PP* (фиг. 46) и сделаем на нем платиновой чернью черное пятно *A*. Внесем пластинку в пламя бунзеновской горелки; мы заметим, что при накаливании листок *PP* будет менее ярким, чем пятно *A*, которое будет ярко светиться. Температура листка *PP* и пятна *A* одинакова, а между тем свечение пятна *A* сильнее, чем листка *PP*.



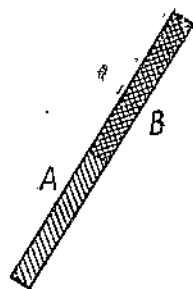
Фиг. 46

Мы можем этот опыт варьировать разными способами. Спаяем стеклянную прозрачную палочку *A* (фиг. 47) с палочкой из темной эмали *B*.

При накаливании в пламени бунзеновской горелки или в сильном спиртовом пламени бесцветное прозрачное стекло *A* светится очень слабо, между тем как накалиенная темная эмаль дает яркое излучение.

Мы видим таким образом, что, если довести до одинаковой температуры тела различной окраски, то наиболее темно окрашенные дают более яркое излучение, светятся сильнее.

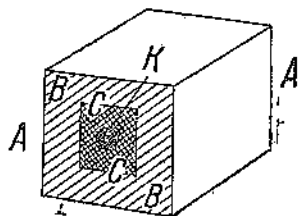
Естественно отсюда заключить, что если бы можно было найти абсолютно черное тело, не отражающее никаких падающих на него лучей и поглощающее нацело все лучи, то при нагревании до высоких температур оно дало бы самое яркое свечение.



Фиг. 47

Глубокое теоретическое исследование показывает, что для черного тела можно вывести строгие законы лучеиспускания. И естественно, является желательным сравнить теоретические выводы с опытными данными, получаемыми в лаборатории. Но для этого нужно построить абсолютно черное тело. Можно ли это сделать? Попробуем ответить на этот вопрос рядом наблюдений. Возьмем большую кубическую коробку *AA* (фиг. 48) и окрасим одну ее сторону *BB*

черной матовой краской. При сильном освещении поверхность BB будет казаться серой и, следовательно, эта поверхность, отражающая значительное количество лучей, будет по своим свойствам далека от абсолютно черного тела. Наклеим на поверхность BB кусок черного бархата CC . Этот кусок будет значительно чернее окрашенной поверхности, но и он будет казаться при ярком освещении темносерым. Прорежем в ящике и в куске бархата небольшое отверстие K . Оно нам представится чернее бархата и при самых ярких освещениях оно будет черно. Если ящик достаточно велик и отверстие K мало, свет, входящий в отверстие, не



Фиг. 48

будет обратно выходить из ящика и отражаться в плоскости отверстия, так как здесь находится такой же воздух, как перед отверстием, так и позади него, а в этих условиях отражения не наблюдается. Вошедший в отверстие свет обратно не выйдет и будет поглощен стенками ящика. Чем больше ящик AA и чем меньше отверстие K , тем ближе к абсолютно черной поверхности будет представляться отверстие K . Если бы мы хотели изучать излучение черного тела, нам нужно было бы изучить излучение, идущее через отверстие в полном металлическом раскаленном ящике.

Зная свойства черного тела и способ его осуществления, мы можем понять многие оптические явления обыденной жизни.

Известно, что открытые окна домов при рассматривании их с улицы днем нам представляются черными. Причина этого явления заключается в том, что окна являются отверстиями, куда свободно входит свет и откуда он выходит в небольшом количестве, поглощаясь и рассеиваясь стенами комнаты. Чем меньше окно в комнате определенного размера, тем чернее оно.

Мы знаем, что зрачок человеческого глаза представляет собой отверстие в радужной оболочке. Плоскость отверстия зрачка является черным телом, не отражающим лучей и не выпускающим благодаря поглощению в оболочках глаза заметного количества лучей.

Теория и эксперимент, проделанный с излучением отверстий в оболочках, согласно показали, что излучение черного тела зависит только от температуры и пропорционально

четвертой степени абсолютной температуры. Абсолютной температурой называется, как известно, температура, считающаяся от точки, лежащей ниже нуля Цельсия на 273° . Таким образом, если наблюдаемая температура по Цельсию равна 100° , абсолютная температура будет $273^{\circ} + 100^{\circ} = 373^{\circ}$.

Называя через T абсолютную температуру, через q количество тепла, теряемого единицей поверхности тела через излучение в 1 сек., мы имеем

$$q = \sigma \cdot T^4, \quad (8)$$

где σ — постоянная.

Закон, выраженный формулой (8), называется законом Стефана—Больцмана.

§ 54. Приложение закона Стефана—Больцмана к определению температуры планет

Пользуясь законом Стефана—Больцмана, можно вывести интересные заключения о температурах планет солнечной системы.

Идея замечательного приложения закона Стефана—Больцмана к излучениям в солнечной системе принадлежит известному английскому физику Пойнтингу.

Как известно из многочисленных опытов, 1 см^2 поверхности земли получает от падающих на нее перпендикулярно лучей солнца в минуту 1,94 малых калорий. Величина 1,94 носит название солнечной постоянной и является величиной, характеризующей энергию, доставляемую центральным светилом земле. Зная расстояние земли от солнца и расстояние планет от солнца, можно вычислить, сколько калорий в минуту попадает на 1 см^2 поверхности каждой из планет.

Если допустить, что вся падающая солнечная энергия нацело поглощается поверхностью планеты и если, следовательно, допустить, что планета абсолютно черна, можно вычислить температуру поверхности планеты. В самом деле, как мы уже видели выше, земля и планеты не имеют своей собственной температуры, так как поверхность после отвердевания весьма скоро охлаждается и принимает температуру, зависящую только от доставленной солнцем энергии. Так как черное тело излучает тепло только в зависимости от его абсолютной температуры (закон Стефана—Больцмана), то понятно, что при стационарном состоянии темпера-

туры у поверхности планеты полученное от солнца тепло должно равняться теплу, отданному за то же время планетой через излучение. Из сопоставлений полученного и отданного тепла можно вычислить среднюю абсолютную температуру T поверхности планеты (которая допускается совершенно проводящей тепло) и отсюда найти среднюю температуру в градусах Цельсия ($T = 273 + t$).

В табл. 11 мы даем для четырех планет их температуру t , рассчитанную по методу Пойнтинга.

Таблица 11

Планета	Температура поверхности °C
Меркурий	+194
Венера	+ 69
Марс	- 48
Нептун	-221

Мы видим, что на ближайшей к солнцу планете Меркурий температура так высока, что жизни не может существовать. Не может быть жизни и на Нептуне.

Температуры Венеры и Марса, полученные при весьма грубых подсчетах Пойнтинга, не исключают возможности существования живых существ. Если принять во внимание влияние атмосферы, изменяющее среднюю температуру планеты, а также неравномерное распределение температуры по поверхности планеты, мы не можем отрицать возможности существования жизни на двух ближайших к нам планетах.

Среди планет не отмечен Юпитер, который, повидимому, имеет еще свою собственную температуру.

Для земли подсчеты по способу Пойнтинга приводят к заключению, что температура земли должна быть около 3° C (276° абсолютной шкалы), между тем как средняя наблюдаемая температура земли равна 15° C (288° абсолютной шкалы).

Таким образом способ, указанный Пойнтингом, позволяет получить достаточно хорошие совпадения теоретически подсчитанной температуры и наблюдаемой на самом деле.

§ 55. Изменение солнечной постоянной

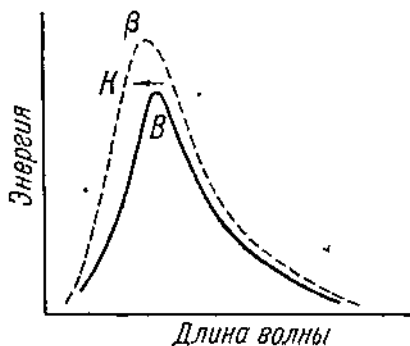
Солнечная постоянная не является величиной вполне неизменной. Во-первых, количество энергии, достигаемой поверхности 1 см^2 земли падающими лучами солнца вне атмосферы, зависит от положения земли на орбите. При наиболее далеком расстоянии земли от солнца солнечная постоянная меньше, вблизи от солнца больше. Во-вторых, уже давно открыто изменение солнечной постоянной от числа солнечных пятен. Чем пятен больше, тем солнечная постоянная значительнее. Имеются формулы, связывающие число солнечных пятен с солнечной постоянной.

Ввиду большого значения излучения солнца для земли имеется большое количество учреждений, изучающих точно это явление. У нас в Союзе имеется институт, исследующий радиацию солнца и руководимый Н. Н. Калитиным.

Наиболее грандиозно поставленный и богато оборудованный Солнечный институт находится в Калифорнии (США) на горе Вильсон, где руководителем является известный исследователь Аббот.

§ 56. Спектр черного тела. Закономерности в спектре черного тела. Законы Вина, Планка. Температура солнца

Мы видели, что можно на практике осуществить черное тело, если в полном сосуде сделать отверстие, которое и будет излучать, как излучает черное тело. Нагревая сосуд до каления, мы получим из отверстия лучи, соответствующие излучению черного тела той температуры, до которой нагрет сосуд. Разлагая при помощи спектроскопа лучи, идущие от черного тела (от отверстия в сосуде), мы получим непрерывный спектр черного тела, энергия которого распределена по отдельным длинам волн так, как это изображено на фиг. 49.



Фиг. 49

При увеличении температуры излучающего черного тела получается смещение по стрелке K максимума энергии B в сторону коротких волн (см. фиг. 49, пунктирная кривая, максимум получается в B'), причем при всех

длинах волн излучаемая энергия при высокой температуре больше, чем при низкой.

Как показывают и теория и опыт, максимум энергии в спектре $E_{\max}$ наблюдается при длине волны лучей λ_0 , связанной с абсолютной температурой черного тела T ($T = 273 + t$, где t температура по Цельсию) следующим образом

$$T \cdot \lambda_0 = (273 + t) \lambda_0 = 0,294. \quad (9)$$

Зная температуру излучающего черного тела t , легко найти длину волны, соответствующей максимуму энергии

$$\lambda_0 = \frac{0,294}{273 + t}. \quad (10)$$

Закон связи абсолютной температуры T и длина волны λ_0 , соответствующей максимальной энергии, носит название закона смещения Вина, который и открыл этот закон теоретически.

Если изучать спектральное распределение энергии солнечных лучей, то мы найдем в красном и инфракрасном спектре хорошее совпадение распределения энергии излучающего черного тела и энергии солнечных лучей. В видимом спектре солнце дает значительно большую энергию, чем черное тело, и в ультрафиолетовом — значительно меньшую.

Всего лучше распределение энергии в спектре солнца совпадает с распределением энергии излучающего черного тела, нагретого до 5725° по абсолютной шкале температур.

Можно воспользоваться законом смещения Вина для нахождения температуры солнца, рассматриваемого как черное тело. Этим способом, получается несколько отличающаяся температура поверхности солнца, а именно — $T = 6200^\circ$.

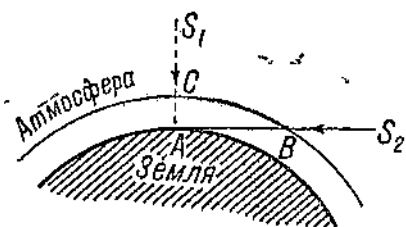
Различия в температурах излучающей поверхности солнца, полученных по распределению энергии в спектре и по закону смещения Вина, показывают, что солнце не является абсолютно черным телом и что температура его поверхности, рассматриваемой как абсолютно черное тело, может быть найдена только приблизительно.

Обычные высокие температуры, применяемые в лабораториях, достигают $3000—3500^\circ \text{C}$. Эти температуры получаются в вольтовой дуге, горящей в обычных условиях. Может на первый раз казаться странным, что температура

поверхности солнца выше температуры вольтовой дуги, в то время как свет солнца желтовато-белый, свет же, испускаемый вольтовой дугой,—яркий белый или даже слабо голубовато-белый. Дело в том, что фиолетовая и ультрафиолетовая радиация солнца сильно поглощается в атмосфере земли. Это обстоятельство имеет огромное практическое значение, так как яркие ультрафиолетовые лучи солнца действовали бы губительно на все живое, если бы они доходили до земли. Что изменение цвета солнца зависит от поглощения в атмосфере, можно убедиться, наблюдая цвет солнца при закате или восходе, когда солнечные лучи S_2BA (фиг. 50) проходят больший путь BA сквозь атмосферу, чем днем, когда лучи S_1CA падают более отвесно к поверхности земли, проходя более короткий путь CA .

При полетах в стратосферу также отмечено, что солнце делается ясно голубым соответственно ее температуре.

В настоящее время можно при особых условиях получить в лаборатории температуру в 6000° С. Для этой цели Луммер заставлял гореть вольтову дугу в сжатом до 14 атмосфер азоте. Свет вольтовой дуги, имеющей температуру в 6000° , является голубым. В кратере дуги можно наблюдать плавление не только всех металлов и окислов их, но и кипение угля, превращающегося, как думал Луммер, в графит.



Фиг. 50

Внутренние части солнца и их тепловое состояние можно изучать, пользуясь теоретическими приемами, указанными Шварцшильдом, Джинсом и Эддингтоном. Центральные части солнца имеют по приблизительному подсчету температуру во много миллионов градусов. При этих температурах все атомы находятся в состоянии распада, образуя скопления протонов, нейтронов и электронов. Небольшой кусок материи, внезапно нагретый до этой температуры, уничтожил бы мгновенно своим излучением все материальные тела на протяжении тысяч километров. Огромные температуры и распад материи в центре солнца сопровождаются по мнению ряда выдающихся ученых переходом материи в энергию по закону Эйнштейна.

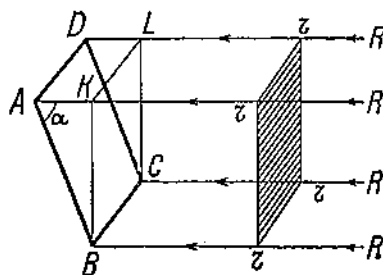
Мы уже видели, что масса m (в г) может превратиться

в энергию, величина которой в эргах равна $E = m \cdot 9 \cdot 10^{20}$. Переход материи в энергию, доказанный на опыте с ядерными реакциями в атоме, может доставить, таким образом, огромное количество энергии, теряемой постоянно солнцем. Чтобы сделать наглядным то огромное количество энергии, которое получается из материи, мы представим, что в энергию превратится только один грамм любого вещества. Энергия, полученная от этого превращения, будет больше той энергии, которую дают за сутки все электростанции, питаемые Ниагарским водопадом.

§ 57. Законы освещения поверхностей

Внутренняя теплота земли медленно теряется через каменную плохо проводящую оболочку. Если бы земля не получала тепла от солнца, она замерзала бы и ее температура была бы близка к абсолютному нулю.

Излучение солнца дает земной поверхности энергию, необходимую для всех процессов физического, химического и биологического характера, протекающих на поверхности земного шара. Поэтому представляется интересным изучить подробно явление разогревания земной поверхности солнцем, и эта задача и является целью настоящей главы.



Фиг. 51

Пусть $ABCD$ (фиг. 51) есть прямоугольник с площадью S , равномерно освещенный параллельными лучами, падающими так, что они перпендикулярны сторонам BC и AD прямоугольника. Световая энергия, падающая на $ABCD$, заключена в пучке, сечение которого плоскостью, перпендикулярной к лучам, везде одинаково и равно $BCLK$ или равно ggg . Пусть площадь ggg или $BCLK$ равна σ . Пусть угол между лучами RR и плоскостью $ABCD$ равен α . Тогда из простых геометрических соображений ясно, что $BK = AB \cdot \sin \alpha$. Умножая обе части равенства на BC , имеем $BK \cdot BC = AB \cdot BC \cdot \sin \alpha$ или, так как $BK \cdot BC = \sigma$ и $AB \cdot BC = S$, то

$$\sigma = S \cdot \sin \alpha. \quad (11)$$

Мы видим таким образом, что если площадь прямоугольника определенной величины S будет вращаться около линии AD , то площадь прямоугольника $BCLK$ изменится пропорционально синусу угла α . Через 1 см^2 площади ggg (или площади $BCLK$) проходит количество лучистой энергии, равное q . Умножая уравнение (11) на q , имеем

$$q \cdot S = S \cdot q \cdot \sin \alpha.$$

Пусть S равно 1 см^2 ; Q равно количеству лучистой энергии, падающей на 1 см^2 , наклоненной к лучам под углом α , и q равно количеству лучистой энергии, проходящей через 1 см^2 плоскости, поставленной перпендикулярно к лучам. Таким образом

$$Q = q \cdot \sin \alpha.$$

Если $\alpha = 90^\circ$, то есть если поверхность поставлена перпендикулярно к лучам $\sin \alpha = 1$, и $Q = q$, освещение данной поверхности максимально. Если $\alpha = 0$, то есть если лучи скользят по поверхности $\sin \alpha = 0$, и $Q = 0$. При всех промежуточных положениях поверхности $ABCD$ количество лучистой энергии, проходящей через нее, меняется от q до 0 .

Лучи, падающие на поверхность $ABCD$, ограничивающую данное тело, поглощаясь ею, нагревают тело. Из сказанного ясно, что нагревание тела, ограниченного с одной стороны освещенной плоскостью $ABCD$, тем больше, чем больше приближается угол между лучами и плоскостью к прямому.

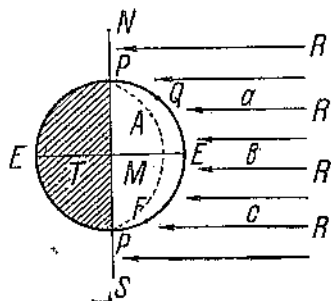
§ 58. Нагревание параллельными лучами вращающегося шара

Пусть мы имеем вращающийся около оси NS огромный шар размерами, например, с землю (фиг. 52). Пусть ось вращения NS перпендикулярна параллельным лучам $RRRR$, падающим на шар. Поток лучистой энергии является равномерным, так что через равные по величине плоскости, поставленные в любых местах a, b, c потока, перпендикулярно к лучам проходит равное количество энергии. Тогда ясно, что равные по величине маленькие площадки, поставленные в точках P, Q, F, R так, что они касаются поверхности шара, получают разное количество лучистой энергии и шар разнo нагревается в разных точках. По большому кругу EE ,

по экватору, шар нагревается максимально, на полюсах PP нагревание равно нулю.

Половина шара M освещена параллельными лучами $RRRR$. Половина находится в тени и не получает освещения. Если шар, вращаясь равномерно, совершает в течение суток полный оборот, то любая точка его поверхности 12 часов находится в полной темноте и 12 часов освещена, причем наибольшее освещение наблюдается в том случае, когда плоскость, проходящая через ось вращения PP и данную точку A (меридиан A), совпадает с направлением лучей.

Если бы шар, о котором мы говорим, являлся землей и если бы он описывал около солнца круг, мы могли бы рассматривать лучи солнца, как параллельные и мы всегда во всех широтах имели бы полсутки день — полсутки ночь, причем при одинаковом расстоянии земного шара от солнца в течение всего времени обращения земли около солнца, в течение всего года, условия освещения оставались бы неизменными и не было бы времен года.



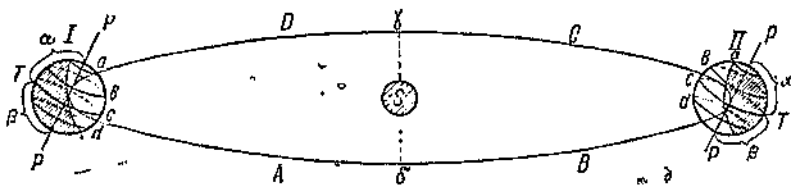
Фиг. 52

Причиной неравенства дней и ночей для данного места A в разное время года, равно как и причиной различных времен года, характеризующихся разным нагреванием лучами солнца, является наклонение оси земли по отношению к направлению лучей солнца или, что все равно, к той плоскости, которая проходит через центры солнца и земли и которая называется эклиптической. При этом ось вращения, как ось гироскопа, остается все время при обращении земли около солнца параллельной самой себе.

§ 59. Нагревание солнечными лучами земного шара, вращающегося около своей оси и вокруг солнца

Допустим, что земной шар обращается вокруг солнца по круговой орбите $ABCD$ (фиг. 53), которую мы изобразим на фиг. 53 в проекции. Для ясности чертежа мы изобразим солнце S , находящееся в центре круга $ABCD$, и земной шар T не в тех относительных размерах, которые имеются на самом деле. Пусть ось вращения земли PP на-

Клönенá к плоскóсти эклиптикí под некоторым углом. Считая, что лучи солнца падают на землю почти параллельно, мы можем легко представить те явления, которые произойдут на земле при наклонении ее оси вращения. Сначала рассмотрим землю в положении I и II. Точки, лежащие на экваторе с (I и II), находятся половину суток в тени, половину суток они освещены солнцем. В околополярной области, ограниченной кругом a , в положении I всегда наблюдается свет, здесь имеется время вечного полярного дня и области около полюса получают в это время года максимум солнечного тепла. При положении земли II в тех же полярных областях имеется постоянная полярная ночь.



Фиг. 53

Если мы пойдем по меридиану по направлению к экватору, мы будем при положении I встречать точки, в которых во время оборота освещение будет продолжаться дольше, чем темнота, и мы, следовательно, в полушарии α имеем лето с большими днями и малой ночью, причем ночь тем меньше, чем ближе к полюсу расположено место наблюдения. В полушарии β в то же время имеется обратное отношение. Как ясно из фиг. 53, здесь ночь продолжается больше дня и в околополярных пространствах темно: здесь полярная ночь, как в полушарии α , в положении II. Если добавить, что угол, образованный земной поверхностью при соответствующей широте с лучами солнца в положении I, меньше в полушарии β , чем в полушарии α , ясно, что нагревание в α в положении I больше, чем нагревание в полушарии β , и, следовательно, в α в это время лето, в β — зима.

Обратные отношения наблюдаются в положении II. Здесь в полушарии α день короче, чем ночь, и солнечная энергия подводится на 1 см^2 поверхности земли в меньшем количестве, чем в полушарии β , на соответствующей параллели. В α в это время зима, в β — лето.

При положениях земли в δ и γ , находящихся от I и II положений на равном расстоянии, день по всему земному шару равен ночи и в этих областях мы имеем весну и осень.

Простая картина смены времен года, описанная нами, осложняется тем, что орбита земли немного вытянута, она имеет форму эллипса, очень близкого к кругу. Кроме того земля покрыта воздушной оболочкой, изменяющей те явления нагревания, которые можно ожидать на земле без оболочки. Но в первом грубом приближении указанные выше соображения дают объяснения температурных смен на поверхности земли, связанных с освещением солнцем поверхности земного шара.

КРАТКИЙ ПОЯСНИТЕЛЬНЫЙ СЛОВАРЬ

Атом, ядро атома. Атом есть наименьшая часть простого тела, входящая как таковая во все соединения, заключающие данный элемент. По представлению Бора, атом состоит из центрального ядра, заключающего положительно заряженные протоны и не имеющие заряда нейтроны, собранные в небольшом объеме. Вокруг этой центральной положительно заряженной массы вращаются по определенным траекториям отрицательно заряженные электроны. Если принять массу протона за 1, то нейтрон имеет приблизительно ту же массу и электрон массу $\frac{1}{1840}$. Положительный заряд протона численно равен отрицательному заряду электрона.

Базальт. Горная порода темного цвета, очень твердая и однородная. Состоит из стеклообразной массы, заключающей ряд минералов. Базальтовые лавы легкоплавки.

Бунзеновская горелка есть прибор, позволяющий получить некоптящее газовое пламя с весьма высокой температурой. Достигается это тем, что газ до зажигания смешивается с воздухом, дающим газу возможность полного сгорания.

Геодезия есть наука, изучающая фигуру земли и ее размеры на основании геометрических и астрономических измерений на поверхности земли или из измерений силы тяжести. Особый отдел геодезии занимается фигурой земли, рассматриваемой как вращающееся жидкое тело, находящееся в состоянии равновесия. Геодезия занимается также изображением поверхности сферической земли на плоском отрезке бумаги. Эта часть геодезии называется картографией.

Геомагнетизм то же самое, что земной магнетизм.

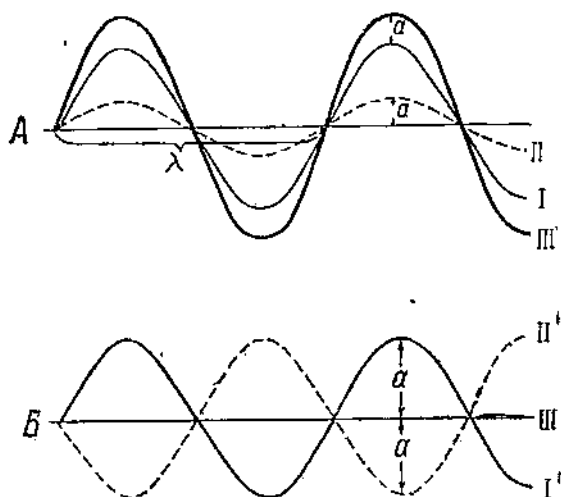
Гидростатика — учение о равновесии жидких тел.

Гнейс — горная порода слоистого сложения, представляющая собой по составу породу, похожую на гранит. Часть

гнейсов образовалась из осадочных пород (парагнейсы), другая благодаря преобразованию изверженных (ортогнейсы).

Гомер, древнейший греческий поэт. Как полагают, он жил в IX в. до нашей эры и был родом из Ионии. Он считается творцом двух бессмертных произведений: «Илиады» и «Одиссеи», ярко рисующих мифологию древних греков.

Гранит, весьма часто встречающаяся горная порода, состоящая из кварца, полевого шпата и слюды. Иногда гранит содержит очень мало слюды, тогда он плотен и называется пегматитом.



Фиг. 54

I — первое колебание; *II* — второе колебание; *III* — колебание, получающееся от сложения первого и второго колебаний; *I'* — первое колебание; *II'* — второе колебание; *III'* — сложение дает отсутствие колебаний

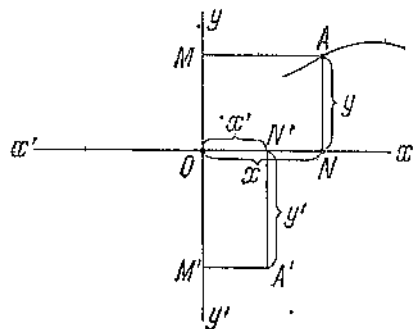
Дина, единица силы в абсолютной системе единиц, где за единицу массы принята масса 1 г, за единицу длины 1 см и за единицу времени 1 сек.

Как известно, сила тяжести у поверхности земли, или иначе говоря, сила, представляющая вес тела, дает массе в 1 г ускорение в 981 см в течение 1 сек. Дина есть сила, которая массе в 1 г дает ускорение в 1 см в течение 1 сек. Следовательно, дина в 981 раз меньше притяжения земли, действующего на массу в 1 г или веса 1 г. Таким образом вес 1 г равен 981 дин. Дина равна $\frac{1}{981}$ веса 1 г или немного больше веса одного миллиграмма.

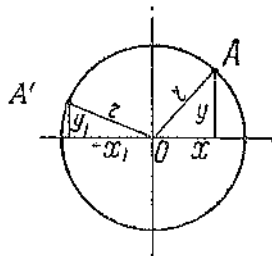
Интерференция, сложение колебаний — одной и той же длины волн, приводящее к усилению или ослаблению колебаний. Свет представляет собой волнообразный процесс с колебаниями частиц среды, направленными перпендикулярно распространению волн.

Две волны, имеющие одинаковую длину λ , распространяющиеся по одному направлению, могут или усиливать друг друга, если колебания среды направлены в одну сторону (фиг. 54, А), или ослаблять или даже уничтожать (фиг. 54, Б), если колебания, приходящие в исследуемую точку, направлены в разные стороны.

Калория малая, количество тепла, необходимое для нагревания 1 г воды на 1°C . Количество тепла, в тысячу раз большее и соответствующее количеству тепла, необходимого для нагревания 1 кг воды на 1°C , называется большой калорией.



Фиг. 55



Фиг. 56

Конвекция, конвекционный. Связанный с механическим переносом. Конвекционный электрический ток есть перенос электричества, связанного с материей. Тепловая конвекция есть перенос тепла, связанного с нагретой материей. Конвекция наблюдается, если сосуд с жидкостью нагревается снизу. Жидкость, расположенная внизу сосуда и делающаяся от нагревания теплее и легче, поднимается кверху, так что теплота переносится движущейся материей.

Кривая. Если провести две перпендикулярные прямые линии $x'ox$ и $y'oy$ (фиг. 55), так называемые оси координат, и считать, что расстояния от O , называемого началом координат, вдоль ox и oy положительны, вдоль ox' и oy' отрицательны, то положение точки A (или A') определяется дву-

мя перпендикулярами AM и AN (или $A'M'$ и $A'N'$), опущенными из A (или A') на оси координат. Длины перпендикуляров x , y (или x' , y') называются координатами точки A . Если координаты A непрерывно меняются, A перемещается в плоскости, описывая кривую линию.

Связь между x и y для любой точки кривой выражается уравнением. Так, взяв круг, центр которого есть начало координат, мы получаем связь между любыми двумя координатами точки A (или A') в виде уравнения $x^2 + y^2 = r^2$, где r радиус круга (фиг. 56).

Магнитное поле, пространство, где обнаруживается действие магнитных сил.

Магнитные силовые линии, кривые линии, совпадающие в каждой точке с направлением магнитной силы.

Мифология, учение о мифах, являющихся преданием из доисторических времен, связанным с догматами древних религий или с божествами их.

Нивелировка, способ определения разности высот двух точек A и B .

Нивелировка выполняется или непосредственным определением разности высот A и B при помощи простейших геометрических операций или же для нивелировки применяется определение барометрического давления в A и B , откуда по формулам, выведенным теоретически, можно найти вертикальное расстояние A и B . Этот прием носит название барометрического нивелирования.

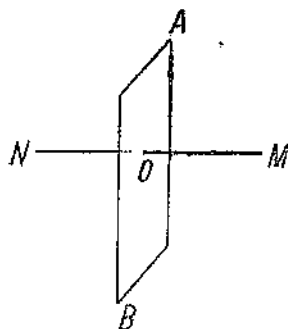
Нормаль к кривой. Изобразим на плоскости кривую AB (фиг. 57). Через одну из ее точек M проведем прямую MP , которая пересечет кривую в точке N . Если будем около M в направлении стрелки K вращать прямую MP , точка N попадет в точку L , которая будет далее непрерывно приближаться к точке M . При некотором положении прямой (при положении MQ) точка L сольется с M и прямая MQ будет иметь с кривой только одну общую точку — точку M .

Такая прямая называется касательной к кривой, и точка M называется точкой прикосновения или касания. Если в этой точке (в точке M) опустить на касательную перпендикуляр $N'MN''$, то эта прямая называется нормалью.

Как понятно, нормаль к прямой есть перпендикуляр к ней в точке M . Нормаль к кругу есть радиус с его продолжением.

Нормаль к кривой поверхности. Если мы имеем какую-нибудь выпуклую поверхность, то плоскость, вообще говоря, пересекает эту поверхность по некоторой замкнутой кривой. Мы можем так провести плоскость, что она и кривая поверхность имеют только одну общую точку T , тогда эта плоскость называется касательной плоскостью, и перпендикуляр, восстановленный к касательной плоскости в точке T , называемой точкой прикосновения, есть нормаль. Мы можем рассматривать кривую поверхность как многогранник с бесконечно большим числом бесконечно малых граней, и тогда касательная плоскость есть продолжение одной из граней, а нормаль — перпендикуляр, восстановленный к определенной грани.

Порядок кривой, максимальное число точек пересечения данной кривой с прямой. Если при любом перемещении прямой максимальное число точек пересечения будет 4, 4 будет порядком кривой и говорят, что данная кривая есть кривая четвертого порядка. Мы указали, что нужно определить максимальное число точек пересечения кривой с прямой. Если мы возьмем произвольную прямую, то она может пересечь кривую в меньшем числе точек, чем это соответствует порядку кривой. Прямая может пересечь другую прямую не больше, чем в одной точке. Прямая, таким образом, есть кривая первого порядка. Число точек пересечения круга с прямой равно двум. Круг есть кривая второго порядка.



Фиг. 58

Пропорциональность. Две переменные величины x и y называются пропорциональными, если одна из них, например y , может быть получена умножением другой на постоянную величину a , называемую коэффициентом пропорциональности. Таким образом

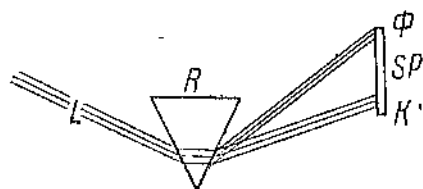
$$y = ax.$$

Сила есть причина, заставляющая тело, находящееся в покое, прийти в движение, а движущееся равномерно и прямолинейно тело изменить свое движение.

Симметрия. Для точки M (фиг. 58), расположенной по одной стороне от плоскости AB , можно найти такую точку N , расположенную по другую сторону от той же плоскости так, что M и N лежат на перпендикуляре OM к плоскости AB и $OM = ON$; точки M и N называются симметричными и плоскость AB является плоскостью симметрии. Если для всех точек одной поверхности, расположенной по одну сторону от AB , являются симметричными точки другой поверхности, расположенной по другую сторону от AB , то поверхности являются симметричными.

Кроме симметрии точек по отношению к плоскости возможна симметрия по отношению к линии AB , когда две точки, лежащие на перпендикуляре к линии, находятся от нее на равном расстоянии. Возможна также симметрия точек по отношению к точке O . В этом случае точка A и точка B , ей симметричная, лежит на одной прямой, проходящей через точку O , называемую центром симметрии, причем $OA = OB$.

Спектр. Под спектром разумеют цветную полоску SP , получаемую в результате прохождения узкого пучка солнечного света L через прозрачную призму P (фиг. 59). Спектр можно отобразить на экран, и расположение цветов в спектре снизу вверх (от K до Φ), считая от ребра призмы к ее основанию, такое: красный — оранжевый — желтый — зеленый — голубой — синий — фиолетовый.

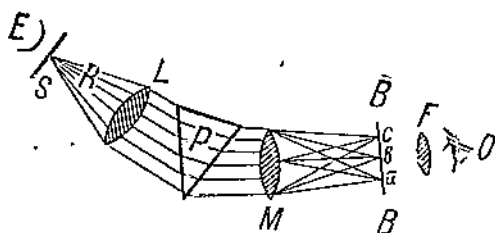


Фиг. 59

Все лучи спектра, дающие ощущение разного цвета, имеют разную длину волны. Самые длинные волны имеют красные лучи, самые короткие — фиолетовые. Можно получить рядом приемов невидимые лучи более короткие, чем фиолетовые, — так называемые ультрафиолетовые лучи, и более длинные, чем красные лучи, так называемые инфракрасные лучи.

Спектроскоп, прибор, построенный впервые Кирхгоффом и Бунзенем и позволяющий точно изучать спектр тел. Спектроскоп состоит из узкой щели S (фиг. 60), перед которой находится яркий источник E изучаемого света. Мы допускаем, что источник испускает свет одной длины волны λ . Расходящиеся из щели лучи R выходят из линзы L

параллельным пучком. На пути параллельных лучей ставится стеклянная призма P , отклоняющая лучи, собираемые линзой M , в изображение b , имеющее ту же форму и окраску, какую имеет освещенная щель S . Если свет источника E заключает ряд волн, то для каждой длины волны получается свое изображение a , b , c , и если источник содержит все волны белого света, то в плоскости BB получается непрерывный спектр. Спектр, получающийся в BB , может быть отброшен на экран, стоящий в плоскости BB . Здесь может быть расположена фотографическая пластинка, позволяющая фотографировать спектр. Наконец, можно поставить в F лупу и рассматривать глазом O спектр в увеличенном виде.



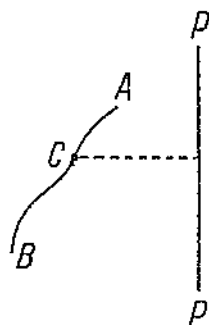
Фиг. 60

Тело вращения. Если какая-нибудь кривая линия AB (фиг. 61) вращается около прямой PP так, что каждая точка кривой C описывает в плоскости, проходящей через C и перпендикулярной к оси вращения PP , окружность, говорят, что кривая при своем движении образует поверхность вращения. Если поверхность вращения замкнута, то говорят, что часть пространства, ограниченного поверхностью вращения, есть тело (геометрическое) вращения.

Кривая образует тело вращения в том случае, если начальная и конечная точки (точки A и B) дуги кривой AB лежат на оси вращения PP .

Температура абсолютная есть температура, отсчитываемая от абсолютного нуля, лежащего на 273° C ниже обычного нуля температур. Как легко понять, абсолютная температура T получается из температуры Цельсия t , если к этой последней прибавить 273. Таким образом $T = 273 + t$.

Траектория—путь, проходимый при движении точкой.

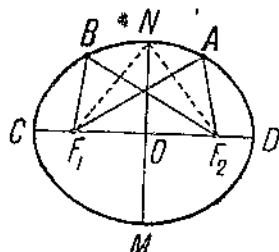


Фиг. 61

Эллипс есть кривая, для каждой точки A (фиг. 62) которой сумма расстояния AF_1 и AF_2 от двух постоянных точек F_1 и F_2 , называемых фокусами, есть величина постоянная.

Таким образом, если взять точку B , то

$$AF_1 + AF_2 = BF_1 + BF_2.$$



Фиг. 62

Прямая, проходящая через F_1 и F_2 , пересекает эллипс в двух точках C и D . Длина CD , обозначаемая обычно через $2a$, называется большой осью.

На половине длины CD расположена точка O , называемая центром кривой.

Для точек D и C имеем по свойству эллипса соотношение

$$2a = DF_1 + DF_2 = DF_2 + F_2F_1 + DF_1$$

и

$$CF_1 + CF_2 = CF_1 + CF_1 + F_1F_2 = 2a.$$

Отсюда

$$2a = 2DF_2 + F_1F_2 = 2CF_1 + F_1F_2$$

или, отнимая по F_1F_2 от обеих частей равенства, имеем $DF_2 = CF_1$.

Через центр O перпендикулярно большой оси проходит малая ось MN , обозначаемая через $2b$. Так как $NF_1 + NF_2 = 2a$ и, кроме того, из прямоугольных треугольников NOF_1 и NOF_2 имеем, что ON есть общая сторона и $OF_1 = OF_2$, отсюда $NF_1 = NF_2 = a$.

Расстояние

$$OF_1 = OF_2 = \sqrt{(NF_2)^2 - (ON)^2} = \sqrt{a^2 - b^2}.$$

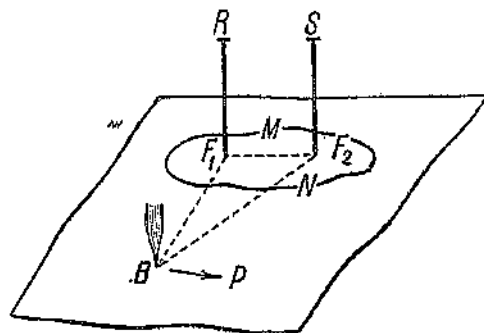
Для черчения эллипса можно поступить так. Втыкают в фокусы F_1 и F_2 (фиг. 63) две булавки R и S и набрасывают нить MN , завязанную так, чтобы после ее натяжения, когда она примет положение F_1F_2B , изображенное пунктиром, длина $F_1B + BF_2$ равнялась большой оси $2a$ эллипса. Кроме того, расстояние F_1F_2 должно быть равно расстоянию фокусов искомого эллипса. Помещая в B карандаш, натяги-

вая нить и проводя карандаш B в направлении p , мы получим на листке бумаги непрерывную кривую, которая и есть эллипс.

Эллипсоид вращения получается от вращения эллипса (см. эллипс) около большой или около малой оси.

Эллипсоид вращения около малой оси MN (фиг. 62) является сплюснутым телом.

Эллипсоид вращения около большой оси CD представляет собой вытянутое тело, у которого плоскости, перпендикулярные к оси вращения CD , пересекают поверхность эллипсоида по кругам.



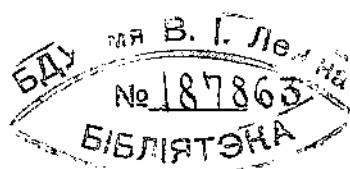
Фиг. 63

Эллипсоид трехосный, или эллипсоид о трех осях, геометрическое тело, симметрично расположенное около трех перпендикулярных основных плоскостей A , B и C , причем сечения трехосного эллипсоида плоскостями, параллельными трем основным плоскостям, являются эллипсами.

Эмпирический, не основанный на теории. Эмпирическая формула — формула, полученная подбором для связи ряда величин, находящихся между собой в некоторой теоретически не изученной зависимости. Например, закон Бойля-Мариотта связывает при постоянной температуре давление газа p на 1 см^2 и его объем v . Закон гласит, что $p \cdot v$ есть величина Постоянная K ; $pv = K$ представляет собой эмпирическую формулу. В ряде отделов физики и техники эмпирические формулы имеют большое значение.

Эрг, единица работы в абсолютной системе единиц, где за единицу массы принята масса в 1 г , за единицу длины 1 см и за единицу времени 1 сек .

Работа равна произведению силы на путь, проходимый точкой приложения силы в направлении действия силы. В абсолютной системе за единицу работы принимается работа 1 дины на протяжении 1 см. Эта работа и есть диносантиметр, или эрг.



СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	3
-----------------------	---

ЧАСТЬ ПЕРВАЯ

ЗЕМНОЙ ШАР КАК КОСМИЧЕСКОЕ ТЕЛО

Глава 1. Форма и размеры земного шара, полученные на основании непосредственных измерений	5
Глава 2. Движения, совершаемые землей	16
Глава 3. Опытное исследование закона Ньютона. Определение средней плотности земли. Распределение плотности внутри земного шара	28
Глава 4. Теория фигуры земли. Формула Клеро и ее приложения. Лунно-солнечные притяжения	32

ЧАСТЬ ВТОРАЯ

ТВЕРДАЯ ОБОЛОЧКА ЗЕМНОГО ШАРА

Глава 5. Образование земной коры. Ее возраст	40
Глава 6. Химический состав земной коры	51
Глава 7. Состояние материи внутри земного шара. Пластичность внутренних частей земного шара. Изостазия	58
Глава 8. Движения земной коры	67
Глава 9. Земной магнетизм и его теория	86
Глава 10. Изменение температуры земли в зависимости от ее движения около оси и вокруг солнца	116
Краткий пояснительный словарь	129

Редактор А. Т. Акимова

Технич. редактор III. Б. Вайнштейн

Сдано в набор 8/IV 1939 г.

Прот. ТКК № 33

Тираж 6.000 экз.

Объем 17,5 уч. авт. л.
18 $\frac{3}{4}$ печ. л.

Индекс: ГТР-65-3-4

Подписано к печати 16/IX 1939 г.

Формат бумаги 84×109 $\frac{1}{32}$

Изд. № 94

Учетный № 1184

Уполн. Главлита № А-17337

Заказ 765