

ТЕОРИЯ ИЗОСТАЗИИ, ЕЕ РАЗВИТИЕ И РЕЗУЛЬТАТЫ ¹⁾.

А. Прей.

ВВЕДЕНИЕ.

Когда мы требуем от необразованного человека, чтобы он поверил в шарообразность земли, мы, разумеется, тем самым требуем большого доверия к своей учености. Приморские жители и жители равнин, быть может, еще и поверят этому; но жителям гор представить себе землю в виде шара, действительно, очень трудно. В самом деле, шар — это круглое гладкое тело, а жители гор видят вокруг себя лишь вершины утесов, упирающихся в облака и принимающих самую причудливую форму. Расстояния по вертикали кажутся нам гораздо большими, чем горизонтальные расстояния; подняться на 100 м нам гораздо труднее, чем пройти такое же расстояние по равнине. Вот почему жители гористых стран не могут освободиться от представления, что горы велики, а земля мала, между тем в действительности имеет место совершенно обратное. Неровности земной поверхности, так сильно бросающиеся в глаза, очень незначительны по сравнению с ее размерами, но узнать это мы можем только при помощи измерения. Нужно удивляться смелости древних ученых, которые, основываясь на своем убеждении в простоте законов природы, сначала пришли к выводу о шарообразности земли, и потом лишь предприняли измерения. То обстоятельство, что Эратосфен, повидимому, не был слишком удивлен, когда найденный им объем земли выразился слишком большим числом, можно объяснить двумя причинами: во-первых, он мог также слабо представлять себе действительную величину земли, как и мы теперь, а во-вторых, сведения о размерах известного в то время „мира“ были настолько неточны, что тогда не знали, какую часть всего земного шара представляет собой этот „мир“.

Измерения, которые мы можем производить, разделяются на два вида: на чисто геометрические и на физические. Мы займемся сначала первой группой измерений.

¹⁾ Ergebnisse der exakten Naturwissenschaften. Vierter Band. 1925.

Триангуляция.

Как было уже упомянуто, первые измерения исходили из того, что видимые неравномерности в распределении масс наземной поверхности не имеют большого значения; итак, поставили себе задачей определить радиус земного шара. При этом в качестве теоретической поверхности земли рассматривали поверхность моря, так как эта часть земли имеет наибольшее сходство с геометрическим видом шара. Измерения были произведены на материке; однако, вначале этому обстоятельству не придавали никакого значения. Впоследствии эти измерения были приведены к поверхности моря. Когда начали выводить следствия, вытекающие из Ньютоновского закона, то оказалось, что земля должна быть сплюснута. Это предположение было подтверждено также и измерениями. С тех пор стали считать землю эллипсоидом вращения, и, таким образом, нужно было определить еще две величины: большую ось земли и ее сжатие. Под влиянием стремления получить возможно точнее эти величины, развилось искусство градусных измерений. Но вскоре оказалось, что различные градусные измерения давали различные значения одних и тех же величин. Эти разницы выходили далеко за пределы погрешностей измерений; таким образом, увидели, что нельзя вполне пренебрегать неравномерностью в распределении масс на земной поверхности. При попытках освободить результаты вычислений от влияния этой неравномерности в распределении масс обнаружились факты столь исключительного интереса, что вопрос, ранее не вызывавший к себе интереса — вопрос о ничтожных поправках — незаметно сделался главным предметом исследований. Таким образом измерение земли пришло в соприкосновение с другой наукой, которая с самого начала изучала распределение масс в земной коре, а именно с геологией. Совместная работа этих двух наук оказалась очень плодотворной.

После того как нашли, что теоретическая поверхность земли не может быть ни шаром, ни эллипсоидом вращения, явилась необходимость в более точном определении этой поверхности. Для этого воспользовались известным в гидростатике понятием о поверхности уровня, т. е. поверхности, которую принимает свободная оболочка жидкости, и главное свойство которой состоит в том, что в каждой своей точке она нормальна к действующей на нее силе. Такой, например, поверхностью уровня является морская поверхность, если не принять в расчет всех неровностей, вызываемых порывами ветра и давлением воздуха, приливами и отливами и т. п. явлениями. Форма этой поверхности определяется гравитационным полем земли и центробежной силой, обусловленной вращением земли. Эта поверхность уровня и ее продолжение под континентами и составляет теоретическую поверхность земли, которая носит название геоида. Так как притяжение масс

зависит от их величины и их внутреннего строения, то маленькие и мельчайшие неравномерности в массах отображаются на геоиде в виде небольших изгибов и притом в очень „уплощенной“ форме. Вследствие сложности поверхности земли, мы не можем найти для нее никакого аналитического выражения и должны строить эту поверхность по точкам.

Это построение геоида происходит следующим образом. Углы, которые измеряются при триангуляции, представляют собой горизонтальные углы, т.-е. они лежат в плоскости перпендикулярной направлению силы тяжести, и потому можно считать их лежащими на поверхности геоида. Итак, для приведения сетки необходимо знать еще кривизну в различных точках геоида. Однако эта кривизна неизвестна, и поэтому мы вынуждены заменить ее более простой кривизной эллипсоида вращения. Эта замена сводится к тому, что сетку с углами, которые были измерены на геоиде, представляют себе нанесенной на эллипсоиде вращения. Для того, чтобы это можно было сделать, необходимо фиксировать исходную точку и направление одной стороны. С этой целью определяют астрономическим путем географическое местоположение одной из вершин треугольника и азимут одной из сторон, начинающихся в этой исходной точке; затем ищут на эллипсоиде вращения точку, которая имеет те же географические координаты, принимают ее за исходную точку и проводят сторону, азимут которой соответствовал бы измеренной величине. Таким образом, положение сетки на эллипсоиде вращения оказывается вполне определенным. Взаимное положение эллипсоида вращения и геоида определены тем, что эти две поверхности в избранной исходной точке имеют общую касательную плоскость. В результате приведения всей сетки, географические координаты всех вершин треугольников и азимуты их сторон получаются такими же, какими они были бы, если бы сетка была нанесена на эллипсоиде вращения. Определив географические координаты и азимуты других вершин треугольника астрономическим путем, можно сравнить между собою результаты астрономических и геодезических измерений. Разницу между ними называют отклонением отвеса, так как это последнее можно себе представить также как разницу между зенитами, вычисленными географическим путем и астрономически определенными.

Эти отклонения отвеса имеют следующий характер: в исходном пункте отклонение отвеса равно нулю, так как в этой точке мы заставили эллипсоид вращения совпасть с геоидом. Начиная от этого пункта, отклонения отвеса неравномерно увеличиваются. Это увеличение отклонения объясняется тем, что эллипсоид вращения имеет другую среднюю кривизну, чем геоид, и поэтому, начиная с исходного пункта, обе поверхности будут все более и более расходиться (рис. 1).

Эту систематическую часть отклонений отвеса можно заставить исчезнуть, выбрав эллипсоид вращения с другой кривизной, т.-е. с дру-

гой большой осью и другим сжатием. Еще удобнее построить эллипсоид вращения таким образом, чтобы отклонение отвеса исчезало не в исходном пункте, а в среднем во всей области, которая подлежит исследованию, т. е. так, чтобы положительные и отрицательные значения отклонений уравнивали друг друга.

Остаток, который после этого остается, отличается неравномерностью своего распределения; его и считают собственно возмущением

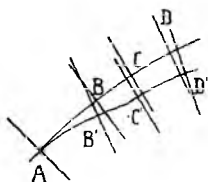


Рис. 1.

отвеса. Он может произойти только от того, что геоид имеет весьма неравномерную кривизну вследствие тех возмущений, которые испытывает отвес из-за неравномерного распределения масс на земле.

Таким образом пришли к мысли принять во внимание притяжение возмущающих масс, поскольку эти массы известны, и тем самым освободить измерения от влияния этих возмущений. В результате

должны были исчезнуть неравномерности в возмущениях отвеса и должно было получиться гораздо большее совпадение с эллипсоидом вращения. Первые попытки такого рода были произведены в Индии.

Уже в 1847 г. при измерении большой индийской дуги, проходящей через Эверест, бросилось в глаза, что если принять кривизну всей дуги равной ее средней кривизне, то в станции Калиана (Kaliana, $\varphi = 29^{\circ}31'$) получается возмущение отвеса в $5'' \cdot 236$ к северу, а в южной станции Дамаргиде (Damargida, $\varphi = 18^{\circ}3'$) это возмущение равно $3'' \cdot 791$ и также направлено к северу¹⁾. Сэр Андрю Во (Sir Andrew Waugh), бывший тогда начальником геодезических работ в Индии, попросил архидиакона Калькуты Джона Генриха Пратта (John Henry Pratt) заняться вопросом нельзя ли эти возмущения объяснить существованием на севере больших гор. Вычисления Пратта дали поразительный результат: притяжение горных масс оказалось огромным, приходилось удивляться, что это притяжение не влияет на наблюдения гораздо сильнее. Для трех широтных станций, которые тогда существовали, были получены²⁾ следующие значения:

Калиана	27".853 к северу — 16".942 к востоку.
Калианпур.	11 .968 „ „ — 4 .763 „ „
Дамаргида	6 .909 „ „ — 2 .723 „ „

Пратт имел гораздо меньше сведений о высоте и протяжении Гималаев, чем мы³⁾, но, вообще говоря, он скорее недооценил все

¹⁾ Burrard, S. S.: The Attraction of the Himalayan Mountains upon the plumbline in India. Survey of India, professional paper 5.

²⁾ Pratt, J. H.: On the Attraction of the Himalayan Mountains and of the elevated regions beyond them upon the plumbline in India. Phil. Trans. of London 145 (1885).

³⁾ Данные о высоте Гималаев, которыми пользовался сначала Пратт, исходят от А. Гумбольта (A. v. Humbolt). Полученные Праттом значения были им потом

высоты, чем переоценил их, и таким образом, вышеприведенные цифры скорее слишком малы, чем велики.

Вскоре Эри (Airy) ¹⁾ объяснил этот факт, предположив, что под горами имеет место большой дефект масс, который противодействует притяжению видимой части гор. Он исходил из представления, что глыбы земной коры плавают на залегающих глубже более плотных слоях подобно тому, как ледяные глыбы плавают в воде. Так как эти глыбы погружаются в более плотную массу, то эта масса вытесняется ими и, таким образом, получается компенсирующий дефект масс. Хотя Пратт ²⁾ выступил вначале против этого взгляда и искал объяснения вышеописанных явлений в более сильном искривлении Индийской дуги по сравнению с средней кривизной земной поверхности, все же в 1857 г. он согласился с этим взглядом и, развивая его дальше, попытался объяснить этот дефект, предположив, что горные хребты произошли вследствие расширения земной коры, с которым должно быть связано небольшое уменьшение плотности масс. Следующие цифры показывают какой результат можно получить, делая различные предположения о глубине, на которую простирается дефект.

Англ. мизн.	Калиана.	Калианпур.	Дамаргида.
100	26".440 юг	12".111 юг	6".855 юг
300	21 .106 „	11 .678 „	6 .866 „
500	17 .106 „	9 .622 „	6 .670 „
1000	11 .199 „	7 .386 „	5 .220 „

Таким образом, действительно оказалось возможным, что подземные дефекты компенсируют значительную часть притяжения, но все же не удалось исчерпывающе объяснить особенности индийских станций. На этот счет, однако, существовал еще и другой взгляд. Океан со своей огромной водяной массой, плотность которой равна 1, в то время как плотность земной коры равна 2.7, должен представлять собой очень большой дефект масс, действие которого подобно отталкиванию отвеса по направлению к материку. Пратт получил ³⁾, правда на осно-

исправлены согласно результатам, полученным при измерении высоты Гималаев бр. Страчей (Strachey). См. Pratt, J. H.: On the deflection of the plumbline in India caused by the attraction of the Himalayan Mountains and of the elevated regions beyond and its modifications by the compensating effect of the deficiency of matter below the mountain mass. Phil. Trans. of London. 149.

¹⁾ Airy, G. B.: On the compensation of the effect of the attraction of mountain masses, and disturbing the apparent astronomical latitude of stations in geodetic surveys. Phil. Trans. of London, 149.

²⁾ Pratt, J. H.: On the influence of the ocean on the plumbline in India. Phil. Trans. of London, 149.

³⁾ Pratt, J. H.: On the influence of the ocean on the plumbline in India. Phil. Trans. of London, 149.

вании очень неточных и неверных сведений о глубине океана, следующие данные:

Саре Соморин	19".71 к северу — 2".19 к востоку.
Дамаргида	10 .44 „ — 11 .80 „
Калианпур	9 .00 „ — 0 .48 „
Калианна	6 .18 „ — 0 .09 „

Эти цифры, хотя и не претендуют на точность, но все же могут служить ориентировочным материалом.

Если прибавить эти возмущения к возмущениям, вызываемым Гималаями (стр. 34), то можно заметить, что хотя полученные таким образом величины будут больше, но они обнаруживают более равномерный ход, поэтому их разности с числами для исходной станции Калианпур меньше; все же получить отсюда какие-либо удовлетворительные результаты оказалось невозможным. В этой стадии разработка вопроса на некоторое время приостановилась. Вопрос о том, почему не заметно притяжение Гималаев и отталкивание океана, остался неразрешенным. Пратт попытался объяснить особенности Индийской широты существованием подземного скопления масс к югу от Калианпура, подобно тому, как были объяснены возмущения отвеса в окрестностях Москвы.

Пратт имел в своем распоряжении только три станции. При исследованиях в 1901 г. таких станций было 159. Полученная на этих станциях система возмущений отвеса, будучи отнесена к Калианпуру, как к исходной точке, показывает, что, начиная от Калькутты, тянется по направлению WNW вплоть до Инда полоса почти без исключения положительных, т.-е. направленных к югу возмущений; к северу и к югу от нее лежит область отрицательных возмущений, а самый юг Индии представляет собою снова область положительных возмущений. Были сделаны попытки исследовать, поскольку эти факты могут быть объяснены различными предположениями о компенсации. Притяжение гор было снова вычислено на основании современных данных; было также принято во внимание влияние океана, при чем при тех и других вычислениях исходили из предположения, что не существует никакой компенсации. При этом получились следующие результаты. (См. табл. стр. 37).

Таким образом видно, что притяжение гор и отталкивание океана друг друга дополняют, — где притяжение Гималаев становится меньшим, там возрастает влияние океана, так что числа столбца, в котором приведены суммы этих двух отклонений, обнаруживают сравнительно небольшие разности. Если мы примем Калианпур за исходную станцию и из всех чисел вычтем по 37.6, мы получим числа, стоящие в седьмом столбце. Последний столбец содержит остатки между вычисленными значениями и данными наблюдения. Разница между ними, в особенности вблизи гор, стала уже довольно маленькой. Таким образом исследования для разных географических широт говорят против компенсации Гималаев.

СТАНЦИЯ	Отклонения отвеса, вычисленные по массам:				ИТОГО.	Привед. к Калиан-пуру.	Наблюден. отклонения отвеса.	Наблюден. минус вычисленные.
	Гималаи.	Океан.	Индия.	Остальн. Азия.				
Муссуре	— 64."9	— 10."3	+ 5"	— 3."3	— 73."5	— 35."9	— 37."08	— 1."2
Дегра Дун ¹⁾ . . .	— 72.2	— 10.3	+ 12.6	— 3.3	— 73.2	— 35.6	— 37.15	— 1.6
Калиана	— 36.2	— 11.0	+ 1.9	— 2.0	— 47.3	— 9.7	— 7.00	+ 2.7
Калианпур	— 18.4	— 19.4	+ 3.1	— 2.9	— 37.6	0.0	0.0	0.0
Демаргида	— 10.4	— 26.2	+ 0.1	— 2.0	— 33.1	— 0.5	— 2.73	— 2.2
Пунаэ ²⁾	— 3.4	— 37.6	— 8.7	— 0.6	— 50.3	— 12.7	+ 1.89	+ 14.6
Бомбей ³⁾	— 7.9	— 29.6	— 1.3	— 2.2	— 41.0	— 3.4	— 10.56	— 7.2
Мангалоре ⁴⁾ . . .	— 4.9	— 28.6	— 6.3	— 2.0	— 41.8	— 4.2	+ 2.76	+ 7.0
Мадрас ⁵⁾	— 6.8	— 28.0	— 3.6	— 1.1	— 39.5	— 1.9	+ 3. 6	+ 5.5
Вальтаир ⁶⁾	— 11.0	— 33.0	— 10.9	— 0.7	— 55.6	— 18.0	— 9.18	+ 8.8
Калькутта	— 23.3	— 19.9	— 0.4	— 1.0	— 44.6	— 7.0	+ 0.67	+ 7.7

Если, однако, мы рассмотрим данные для первого вертикала, полученные частью из данных по азимутам, частью из данных по долготам, то мы получим:

СТАНЦИЯ	Отклонения отвеса			
	По вычисл. из притяж. масс	Привед. к Калиан-пуру	Наблюден.	Наблюден. минус вычисленные
Муссуре	— 41."1	— 32."6	— 26."0	+ 6."6
	— 38.6	— 30.1	— 22.1	+ 8.0
Калиана	— 20.3	— 11.8	— 4.4	+ 7.4
Калианпур	— 8.5	0.0	0.0	0.0
Демаргида	— 3.8	+ 4.7	— 9.8	— 14.5
Пунаэ	+ 0.7	+ 9.2	— 1.8	— 11.0
Бомбей	— 20.3	— 11.8	+ 6.4	+ 18.2
Мангалоре	— 22.2	— 13.7	+ 1.9	+ 15.6
Мадраф	+ 21.0	+ 29.5	— 7.0	— 36.5
Вальтаир	+ 17.5	+ 26.0	— 3.1	— 29.1
Калькутта	+ 0.8	+ 9.3	— 10.1	— 19.4

За исключением первых трех горных станций, вычисленные значения отклоняются в ту и в другую сторону от значения полученных

¹⁾ Dehra Dum, ²⁾ Punnae, ³⁾ Bombay. ⁴⁾ Mangalore, ⁵⁾ Madras, ⁶⁾ Waltair.

⁷⁾ Burrard S. S.: l. c.

при наблюдении. Таким образом отклонения отвеса в первом вертикале говорят за компенсацию Гималаев.

Наконец, нужно принять во внимание еще три долготы:

СТАНЦИИ	Отклонения отвеса		
	Вычисл. из прит. масс	Наблюден.	Наблюден. минус вычисленные
Амристар-Мултан ¹⁾	— 20."0	+ 8."22	+ 28."0
Валтаир-Бомбей	+ 39.6	— 10.06	— 49.7
Мадрас-Мангалорс	+ 44.7	— 9.27	— 5.40

Эти данные также говорят в пользу компенсации. Таким образом эти предположения приводят нас к очевидному противоречию, а потому должна существовать еще какая-то другая причина, влияющая на отклонение отвеса, она была найдена в предположении, что существует подземная цепь, которая начинается в Балазоре (Balasore), проходит по устью Гули (Hooghly) по направлению к Джодпур (Jodhpur) в Райпутане (Rajputana) и дальше тянется параллельно Гималаям. Гималаи считают некомпенсированными, Тибетское плоскогорье компенсированным на две трети, океан же считают вполне компенсированным, а потому не принимают в расчет. При этих предположениях о компенсации мы получаем следующую картину.

СТАНЦИЯ	Широта	Отклонения отвеса вычислен. по			ИТОГО	Наблюден. отклонен. отвеса	Наблюден. минус вычислен.
		Гималаям	Тибету	Подземн. цепи			
Дегра Дум	30°19	— 19"	— 18"	+ 1"	— 36"	— 35"	— 5
Калиана	29 31	— 3	— 11	+ 2	— 12	— 11	+ 2
Нох ²⁾	27 51	— 2	— 9	+ 7	— 4	— 3	+ 1
Даятгари ³⁾	24 38	— 1	— 6	+ 4	— 3	— 2	+ 1
Калианпур	24 7		— 6	+ 3	— 3	— 2	0
Лоиди ⁴⁾	23 8		— 5	— 3	— 8	— 7	0
Бадгаон ⁵⁾	20 44		— 4	— 7	— 11	— 10	0
Дамаргида	18 3		— 3	— 2	— 5	— 4	— 1
Натсбад ⁶⁾	15 6		— 2	— 1	— 3	— 2	— 1
Пуннаэ	8 9		— 1	0	0	0	0

¹⁾ Amristar — Mooltan.

²⁾ Noh, ³⁾ Daiathgari, ⁴⁾ Loidi, ⁵⁾ Badgaon, ⁶⁾ Nathabad.

Так как Калианпур лежит в непосредственной близости к подземной цепи, то за исходный пункт принимают Пуннаэ. Итак это исследование, начавшееся собственно с того, что отвергнули предположение о компенсации Гималаев, показало, однако, что по меньшей мере вся масса плоскогорья Центральной Азии большей частью компенсирована.

Мысль о компенсации внешних неравномерностей в распределении масс была, между тем, подтверждена также обширными исследованиями Гельмерта (Helmert) о распределении силы тяжести. Таким образом, факт существования компенсации стал несомненным, и оказалось необходимым при всех геодезических операциях обратить на этот факт внимание. Исследование этого вопроса было широко поставлено во время американских работ. Была использована вся обширная система отклонений отвеса, полученная на основании всех триангуляций в Соединенных Штатах¹⁾. Все точки были приведены к штандарту Соединенных Штатов, т.е. географическому положению и астрономически измеренному азимуту в Мидэс Рэнч (Meades Ranch)

$$(\varphi = 39^{\circ}13', \lambda = 98^{\circ}32'),$$

который был принят за исходный пункт; положение эллипсоида вращения было выбрано так, что в этом пункте геодезические и астрономические зениты совпадали друг с другом. Вся система охватывала 381 широтных станций, 131 долготных станций и 253 станции для определения азимутов. Между этими станциями были 32 так называемых „пункта Лапласа“, в которых одновременно определяли как долготу, так и азимут, и которые служили для контроля.

Прежде всего для всех этих пунктов было вычислено влияние видимой неравномерности в распределении масс для области радиусом в 2564 англ. мили (4125 км). Расчет был применен тот же самый, какой обыкновенно употребляют при вычислении подобных влияний масс: всю область разделяют на отдельные части при помощи кругов, центр которых лежит в данной станции, и радиусов, проведенных с таким расчетом, чтобы притяжение отдельных участков можно было вычислить с достаточной точностью, исходя из средней высоты. Таким образом размеры этих частей сообразуются, главным образом, с расстоянием отдельных точек от наблюдательных станций, и, кроме того, эти части выбираются таким образом, чтобы вычисление их притяжения было по возможности проще. Предполагая, что возмущающие массы находятся на одной высоте со станцией, можно применить формулу

$$D = 12''44 \frac{\delta}{\Delta} h (\sin a' - \sin a) \log \operatorname{nat} \frac{r'}{r}.$$

¹⁾ Hayford John F.: The figure of the earth and isostasy from measuments in the U. S. Coast and geodetic survey. Washington 1909— Он же Supplementary investigation in 1909 of the figure of the earth and isostasy Coast and geodetic survey. Washington 1910.

Здесь через r и r' обозначены внутренний и наружный радиусы рассматриваемой области; через a и a' азимуты радиусов, отделяющих одну часть области от другой; h обозначает среднюю высоту, и наконец, δ и Δ поверхностную и среднюю плотности земли.

Разность синусов для большей простоты приравнивают какой-либо простой дроби, например, 0.25. В таком случае, для притяжения, направленного с севера на юг, западные и восточные участки будут больше северных и южных, что не существенно, так как они дают очень маленькую составляющую вдоль меридиана. Для вычисления притяжения в направлении восток-запад все поворачивают на 90° . Для δ принимают значение 2.67, а для $\Delta = 5.576$ (по Гаркнесу); таким образом,

$$\frac{\delta}{\Delta} = \frac{1}{2.09}.$$

Так как на американских картах высоты выражены в футах (1 миля = 5280 футов), то мы получаем следующую формулу

$$D = 12'' 44 \frac{1}{2.09} \frac{h \text{ в футах}}{5280} 0.25 \log \text{nat} \frac{r'}{r}. \quad (1)$$

Если разделить область на части так, чтобы

$$\frac{r'}{r} = 1.426,$$

то окажется, что

$$D = 0'' 0001 (h \text{ в футах}) \quad (2).$$

Таким образом, чтобы узнать притяжения отдельного участка, достаточно прочесть на картах его высоту в футах; притяжение этого участка выразится таким же числом $0'' 0001$, каким высота выражается в футах; всякие дальнейшие вычисления отпадают. Для очень больших расстояний нужно принять в расчет кривизну земли. Сообразно с этим, шесть внешних радиусов выбираются несколько большими, для того, чтобы можно было сохранить простоту, о которой мы только что говорили. Для областей, которые всецело лежат на поверхности океана, h надо взять отрицательным, так как здесь нехватает части земной коры; зато здесь присоединяется водяная масса, плотность которой равна 1.027. Если вставить вместо 2.67 это значение, то коэффициент в нашей формуле уменьшится в отношении $\frac{1.027}{2.27} = 0.385$; таким образом мы имеем:

$$D'' = -0'' 0001 h (1 - 0.385) = -0'' 0001 h \cdot 0.615.$$

Но так как на американских картах морская глубина нанесена в саженях, то левую часть в этом равенстве нужно умножить на 6 и таким образом получится:

$$D'' = -0'' 000369 \times (\text{глубина в саженях}). \quad (3)$$

Итак вычисления, действительно, сведены к очень простой форме. При очень больших разностях высот между отдельными пунктами и исходной точкой нужно ввести еще небольшую поправку на наклон притягивающей силы. Эта поправка берется из небольшой таблицы и вводится, конечно, только для наиболее узких кругов.

У станций, которые лежат близко друг от друга, внешние круги большей частью перекрываются, а потому разность влияний горных массивов в таких станциях очень незначительна. Таким образом, если вычисления проведены для трех станций, то для лежащей между ними четвертой станции притяжения внешних кругов могут быть найдены с помощью простой интерполяции. Такой способ вычисления имеет своим следствием огромную экономию в работе ¹⁾.

Рассмотрение найденных таким образом возмущений, вызываемых внешними массами, показывает, что и в данном случае значения эти гораздо больше, чем возмущения отвеса, которые они должны были объяснить. Так как, однако, массы, вызывающие возмущения, несомненно, существуют и притягивают отвес, то безусловно должна быть другая причина, которая оказывает на отвес противоположное действие, и мы должны принять, что внешним скоплениям масс соответствуют подземные дефекты масс. Если бы компенсация была полной, то влияние видимых масс должно было бы почти совершенно исчезнуть и остатки не должны бы зависеть от внешней формы земли. В Соединенных Штатах, это, однако, отнюдь не наблюдается. Можно перечислить целый ряд случаев, где более или менее отчетливо можно заметить связь между внешними формами и возмущениями отвеса. Однако эти возмущения очень незначительны по сравнению с большими внешними неравномерностями в распределении масс, а потому нужно считать, что эти последние в значительной степени компенсируются в глубоко залегающих слоях.

В дальнейшем мы будем исходить из предположения о существовании полной компенсации.

Все говорит за то, что находящиеся внутри земли массы находятся в состоянии известной пластичности, так что все разности давлений внутри земли со временем исчезают и там устанавливается гидростатическое равновесие. Поверхности одинаковой плотности совпадают здесь с так называемыми эквипотенциальными поверхностями. Но, очевидно, что верхние слои земли не подчиняются этому закону. В этих слоях мы наблюдаем хаотическое смешение масс различной плотности и формы. Таким образом, если мы станем переходить изнутри земли к ее поверхности, то мы должны будем, несомненно, встретить эквипотенциальную поверхность, которая будет последней поверхностью,

¹⁾ Критику метода Гайфорда можно найти в статье R. Helmer't'a: Die isostastische Reduction der Lotrichtungen. Sitzungsber. d. preuss. Akad. d. Wiss 14, 1914.

еще соответствующей гидростатическому равновесию. Она должна обладать тем свойством, что единица ее площади везде должна находиться под одинаковым давлением. Гипотеза, которая предполагает полную компенсацию внешних масс, состоит в том, что давление на каждую единицу площади вышеупомянутой эквипотенциальной поверхности зависит только от нормально на ней лежащих масс, и таким образом, вес всех этих столбов, опирающихся на такие единичные площадки, и нормальных к ним должен быть на всей земле одинаков. Это состояние равновесия масс называют изостазией, а эквипотенциальная поверхность, на которой, согласно нашему предположению, нагромождены неравномерно распределенные массы, называется изостатическим слоем.

Для удобства вычислений предполагают, что компенсирующие массы между различными глубинами вплоть до изостатического слоя распределены равномерно. Мы впоследствии увидим, что это предположение имеет свою физическую интерпретацию.

Для того, чтобы основные предположения выполнялись, необходимо, чтобы всей возвышающейся над уровнем моря массе соответствовал недостаток массы внутри земли. Если мы обозначим высоту над уровнем океана через h , поверхностную плотность земли через δ , глубину залегания изостатического слоя через T , то дефективная плотность δ_1 определится из равенства

$$\delta h = \delta_1 T, \quad (4)$$

при чем эта плотность, как дефективная, должна быть отрицательной. На эту величину δ_1 плотность всего слоя должна быть меньше нормальной плотности земной коры. Итак на всей поверхности земли мы имеем

$$\frac{\delta_1}{h} = \text{const} = \frac{\delta}{T}$$

Для точек, расположенных на поверхности океанов, это равенство принимает несколько иной вид. Так как во всей впадине, занимаемой океаном, находится масса, плотность которой равна не $\delta = 2.67$, а $\delta_0 = 1.03$, то океан (извне) представляет собою большой дефект масс, глубиною в h и дефектом плотности в

$$\delta - \delta_0 = 2.67 - 1.03 = 1.64.$$

Таким образом здесь мы имеем

$$(\delta - \delta_0) h = \delta_1 T; \text{ или } \frac{\delta(\delta - \delta_0)}{\delta} h = \delta_1 T \quad (5).$$

Итак, вместо всей глубины океана принимаем в расчет только 0.615 этой глубины. Плотность δ_1 при этом будет положительна по-

тому, что дефекту океана под ним должен соответствовать избыток масс. Плотность всегда находится в очень простом соотношении с h , следовательно влияние компенсирующих масс можно легко найти, умножив результаты, найденные для отдельных четырехугольников по формулам (2) или (3), на множитель F , имеющий следующий вид:

$$F = 1 - \frac{\log \frac{r + \sqrt{r^2 + T^2}}{r' + \sqrt{r'^2 + T^2}}}{\log 1.426}$$

Итак, сделав определенное допущение относительно величин T , можно для каждого кольца найти значение F . Эти значения быстро убывают, когда r возрастает, так что внешние кольца оказывают уже очень небольшое влияние. Относительно глубины, на которой залегает изостатический слой, делают следующие предположения. Предположение *A*: глубина, на которой залегает изостатический слой, равна 0, т.-е. компенсирующие массы, точно также, как и внешние массы, находятся на одной высоте со станцией. В этом случае как те, так и другие массы лежат над уровнем океана. Это предположение сводится к тому, что вообще не обращают никакого внимания на расположение масс. Предположение *B*: Глубина, на которой залегает изостатический слой, бесконечно велика; в этом случае $\delta_T = 0$, т.-е. уравнивающие массы не обладают никакой плотностью, и, несмотря на их бесконечное протяжение, совершенно не влияют на отвес. Это предположение сводится к тому, что внешние массы считают совершенно некомпенсированными. Предположение *E*: глубина T , на которой залегает изостатический слой, равна 162.2 км. Предположение *H*: $T = 120.9$ км. Предположение *G*: $T = 113.7$ км. Эти значения T были выбраны на основании опытов, сделанных во время вычислений. Исходя из каждого из этих предположений, были вычислены поправки на возмущения отвеса, и потом вся эта система была подвергнута кропотливому сглаживанию. При этом поправки к географической широте и долготе исходной станции Мидэс Рэнч, поправки к ее азимуту, а также большая ось и сжатие земли были приняты за неизвестные. Мерой пригодности того или другого решения служили суммы квадратов остающихся возмущений отвеса, которые уже не могут быть объяснены протяжением внешних масс и внутренней компенсацией. Для этих сумм были получены следующие значения:

При предположении *B*: 107 385

” *E*: 10 297

” *H*: 10 063

” *D*: 10 077

” *A*: 18 889

Предположение В, при котором массы считают некомпенсированными, оказывается совершенно непригодным. Итак, предположение, что внешние массы нагромождены на поверхности земли, внутри которой нет никаких аномалий, во всяком случае не выдерживает критики. Предположение А, при котором совершенно не обращают внимание на массы, оказывается уже несравненно лучше, так как сумма квадратов разностей в этом случае уже в 6 раз меньше. Наилучший результат, повидимому, получается при предположении, что имеет место некоторое изостатическое положение, и вышеприведенная табличка показывает, что решение В лучше всех остальных; исследования 1909 г. привели к замене этого решения решением G. Ясно, что между этими двумя решениями нет большой разницы и поэтому совершенно безразлично какое из них принять за окончательное. Все остальные критерии, как-то средние разности, независимо от их знака, процент отклонений больших 2" или 5", максимум отклонений на всей области или в отдельных частях ее, — все они приводят к тому же выводу. Итак получается следующий результат: внешняя неровность в распределении масс компенсируется в Соединенных Штатах дефектом, который равномерно распределен между слоями различной глубины до 122 км. Исследования 1909 г. дали для глубины, на которую распространяется дефект — 113.7 км, а новейшие наблюдения дали 102 км.

Так как разности еще продолжают оставаться, то ясно, что полная компенсация не имеет места. Эти разности в среднем составляют 0.1 возмущения, таким образом можно сказать, что массы компенсируются на $\frac{9}{10}$ своей величины.

Очень хорошее совпадение значений, полученных из предположения о компенсации, с теми значениями, которые были получены Гельмертом (Helmert)¹⁾ при его исследованиях силы тяжести, и то обстоятельство, что изучение землетрясений в свою очередь указывает на существование изостатического слоя²⁾, привели к убеждению о реальном существовании этого слоя. Не придерживаясь никакой определенной гипотезы, можно, однако, утверждать, что на глубине 120 км расслоение земли характерным для ее строения образом изменяется, и явления, наблюдаемые на ее поверхности, здесь прекращаются.

Во время американских исследований были сделаны еще и другие предположения об изостазии. Предполагая, что дефективная плотность на поверхности достигает своего максимума, и, опускаясь вглубь, линейно убывает, мы найдем, что изостатический слой залегает на глубине 189 км. Если все компенсирующие массы концентрировать в слое толщиной 16 км, то изостатический слой оказывается на глубине 65 км.

¹⁾ Helmert, R.: Die Tiefe der Ausgleichsfläche bei der Pratt'schen Hypothese für Gleichgewicht der Erdkruste und der Verlauf der Schwerestörung von Inneren der Kontinente und Ozeane nach den Küsten. Sitzungsber. d. preuss. Akad. d. Wiss. 48. 1909

²⁾ Mohorovičić, St.: Das Erdinnere. Zeitschr. f. angewandte Geophysik Bd. 1. Heft 2.

Если же принять гипотезу Чемберлена (Chamberlin), согласно которой дефективная плотность сначала возрастает, и затем, убывая, исчезает в более глубоких слоях, то для искомой глубины получается 310 км.

Успех исследований Гайфорда (Hayford) побудил предпринять обработку тем же методом, и, исходя из той же глубины залегания изостатического слоя, также и индийских измерений. Однако эта работа не дала ожидавшегося успеха¹⁾. Разности оставались большими (в гористых местностях в среднем 16"), и поэтому приходится заключить, что в Индии на глубине 113.7 км поверхности уровня не существует. Правда, Гайфорд при своих вычислениях исходил только из этой глубины, но Бауи (Bowie)²⁾ не удалось получить лучших результатов и при других предположениях относительно глубины залегания изостатического слоя. Повидимому, в Индии условия очень сложны, тем более что Индия по сравнению с Соединенными Штатами очень мала, а между тем здесь очень близко подходят друг к другу необыкновенно высокие горы и глубокий океан; кроме того, еще совсем молодые Гималайские горы могут иметь особую аномалию; наконец, возможно, что подземная цепь, которую можно рассматривать, как скопление некомпенсированных масс, действительно существует³⁾, и эта цепь, вследствие небольшой величины всей области, играет в ней большую роль.

Небольшие скопления некомпенсированных масс и дефекты находятся также в Америке, но там нет нигде такого сложного образования, которое можно было бы принять за подземную горную цепь.

II. ИЗМЕРЕНИЕ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ.

Мы подошли теперь ко второй группе измерений. Первые наблюдения над изменением силы тяжести при передвижении по земной поверхности принадлежат Рише (Richet). В 1671 г. Рише отправился в Кайену для определения солнечного параллакса по наблюдениям над Марсом. В Кайене он обнаружил, что для того, чтобы часы шли верно, их маятник необходимо укоротить на $\frac{5}{4}$ линии. Сначала этому явлению дали несколько неправильных объяснений, но вскоре было указано, что оно вызывается сжатием земли. Определить сжатие земли на основании наблюдений над силой тяжести стало возможным лишь после того, как Клеро (Clairaut) доказал замечательную теорему, согласно которой между силой тяжести на земле, ее сжатием и скоростью ее вращения существует соотношение, которое не зависит

¹⁾ Chrostwait, H. L.: Investigation on the theory of Isostasy in India. Survey of India, professional paper 13.

²⁾ Bowie, W. Spec. publ. 40.

³⁾ Lenox-Conyngham, G. P. The recent pendulum observations in India, Monthly Not. 69.

от внутреннего расслоения земли, предполагая, что эти слои являются поверхностями вращения. Эта теорема является следствием гораздо более общей теоремы Грина.

Для определения формы земли на основании измерения силы тяжести необходимо было иметь очень большое количество станций. Буге (Bouger) при Перуанских градусных измерениях делал уже наблюдения над маятником; за ним вскоре последовали и другие наблюдатели, и Лаплас¹⁾ на рубеже XVIII и XIX веков мог уже сделать попытку определить сжатие земли. В его распоряжении было 15 станций. Но полученный им результат 1 : 336 не оправдал ожиданий; наблюдения оказались неудовлетворительными вследствие их чрезвычайной трудности, при чем особенно трудным представилось измерение длины маятника. Значительный шаг вперед был сделан в 1822 г. Катером (Kater), который ввел знакомый всем оборотный маятник. Измерения силы тяжести были этим существенно облегчены, однако, они продолжали оставаться одной из наиболее утомительных и тяжелых работ из-за многочисленных поправок, которые необходимо вводить в непосредственные наблюдения: поправки на температуру, давление воздуха, трение воздуха, на воздушную массу, увлекаемую маятником, скольжения и вращения маятниковой призмы на подставке и, наконец, — вынужденные колебания штатива и подставки. Наблюдения происходят в темных погребах, продолжаются несколько часов подряд и требуют напряженного внимания. Поэтому легко себе представить, что невозможно было получить то большое количество материала, которое необходимо для поставленной задачи.

Измерение силы тяжести в восьмидесятих годах прошлого столетия сильно продвинулось вперед благодаря введению относительных измерений с помощью неизменного маятника Штернека (Sterneck)²⁾. Основное положение, известное во всех науках, в которых приходится иметь дело с измерениями, состоит в том, что разности легче измерить с большой точностью, чем абсолютные величины. Исходя из этого положения, решили измерять только разности между силой тяжести в исходной станции и местом, где ведутся наблюдения. Если устроить маятник таким образом, чтобы он мог оставаться неизменным, — это лучше всего достигается упрощением его конструкции, — то при измерении разностей отпадают как раз те поправки, определение которых составляет наибольшую трудность, как, например, поправки, зависящие от формы ребра. Вообще же остаются только поправки на температуру и на давление воздуха; их можно сделать очень легко. Трудности представляют еще только вынужденные колебания подставки. — Благодаря введению

¹⁾ Günter, S.: Hand. d. mathematischen Geographie. S. 336. Laplace: Traité de mécanique céleste 2, livre III, chap. V.

²⁾ Sterneck, R.: Der neue Pendelapparat der k. k. militärgeographischen Institutes. Mitt. d. k. k. militärgeogr. Inst. in Wien 8.

этих аппаратов, количество наблюдательных пунктов в течение нескольких лет очень сильно возросло, теперь таких пунктов имеется 3000, между тем как в 1882 г. в распоряжении Гельмерта их было всего лишь 122 ¹⁾).

Вскоре выяснилось, на основании измерения силы тяжести, что для определения сжатия земли необходимо взять те значения этой силы, которые она имеет на возможно гладкой неискаженной поверхности земли. стали искать такие наблюдательные пункты, которые заведомо находятся вне действия возмущающих сил. Однако и в этих пунктах пришлось вводить поправки.

Первая из этих поправок касается влияния высоты над уровнем моря. Все точки земной поверхности расположены выше уровня океана; их расстояния от центра земли больше, чем расстояния точек морской поверхности, а потому поправка с достаточной точностью может быть вычислена из формулы $\frac{2h}{R}$, в которой h — высота места над уровнем океана, а R — средний радиус земли. Вскоре, однако, ввели также и другую поправку, а именно: на притяжении слоя, толщина которого равна высоте места над уровнем океана; при этом исходили из совершенно правильной мысли, что такая масса существует, а потому несомненно должна оказывать некоторое действие на силу тяжести. Притяжение этого слоя можно считать бесконечным, так как находящиеся по сторонам на большом расстоянии массы не производят никакого влияния. Таким образом получили очень простую формулу для возмущения силы тяжести Δg . Она имеет следующий вид:

$$\Delta g = -\frac{3}{2} \frac{\delta}{\Delta} \cdot \frac{h}{R} g$$

где δ и Δ представляют собою поверхностную и среднюю плотность земли. Эта поправка обычно носит название поправки Юнга-Буге (Joung-Bouguer). Но вскоре заметили, что притяжение этого слоя превышает ту величину, которую можно было ожидать на основании наблюдений над вариацией силы тяжести. Поэтому Фай (Faie) предложил совершенно опустить это приведение и вносить поправку только на высоту. Только в тех случаях, когда местность очень крута или обрывиста, необходимо ввести топографическую поправку. Однако эта последняя в большинстве случаев равна нулю, а потому метод Фая практически тождествен с приведением к открытому воздуху.

Вторично обратили внимание на эти факты, когда Гельмерт в цитированной книге („Теории и т. д.“) предпринимал вычисления для вывода нормальной формулы силы тяжести, для чего в его распоряже-

¹⁾ Helmert, R.: Die mathematischen und physikalischen Theorien der höheren Geodesie. II Teil, Leipzig 1884.

нии в то время было 122 наблюдательных пункта для измерения силы тяжести, которые находились в разнообразных широтах; однако пришлось при этом не принимать в расчет наблюдательных пунктов, которые расположены на островах. Для того, чтобы получить нормальную формулу, необходимо представить себе, что все наблюдательные пункты лежат на уровне океана; таким образом их приходится представить себе перенесенными внутрь земной коры. Если, как это сделал Гельмерт, исходить из разложения в ряды по отрицательным степеням расстояния отдельных точек от некоторого центра, то получаются затруднения, связанные с сходимостью этих рядов для таких лежащих внутри земной коры точек. Гельмерт пытался устранить эти затруднения тем, что он действительное распределение масс заменил некоторым идеальным, предполагая, что внешние массы конденсированы на поверхности, лежащей на 21 км ниже физической поверхности земли. Так как эта поверхность лежит глубоко внутри земли, то все точки на поверхности океана являются по отношению к массам внешними точками, и таким образом сходимость ряда оказывается обеспеченной. Оказалось, что приведенные таким образом значения очень хорошо согласуются с отклонениями от нормальной формулы силы тяжести. При закладывании масс внутрь земли, как бы происходит нечто находящееся в самой тесной связи с самой природой вещей; кажется, будто эти массы вошли туда, где они, собственно говоря, должны были быть или откуда быть может они произошли.

Наконец, яснее всего выступает факт существования подземных дефектов масс в измерениях Штернека¹⁾, произведенных в Альпах,—главным образом, потому, что количество наблюдений было очень велико, и они представляли собою связанный ряд, в котором нетрудно было заметить при пересечении гор то усиливающееся, то ослабляющееся их влияние. Для всех 508 станций, бывших в Австро-Венгрии того времени,—станций, высота которых доходила до 1500 м, было установлено, что связь с высотой гор весьма слаба. Результаты произведенных на этих станциях наблюдений можно выразить с помощью формулы:

$$g = \gamma_0 + 0.017 - 0.0003141 h,$$

где g означает наблюденные значения силы тяжести, γ_0 —нормальное ее значение и h —высоту в метрах. После приведения к свободному воздуху получается:

$$g = \gamma_0 - 0.0003086 h.$$

Это равенство оправдывается только в среднем; в отдельных же пунктах имеют место отклонения, которые, очевидно, находятся в связи со строением гор. Так, в Тирольских Альпах сила тяжести всюду слишком

¹⁾ Sterneck, R.: Über die Reduction die auf der physischen Erdoberfläche beobachteten Schwerebeschleunigung auf ein gemeinsames Niveau. Sitzungsber. preuss. Akad. d. Wiss, 1903. № 31.

мала, и таким образом нужно предположить, что видимым, находящимся на поверхности земли массам соответствует подземный дефект.

Этот последний был сначала вычислен в форме так называемого идеального слоя на морском уровне. Притяжение этого слоя равно притяжению бесконечно тонкой обладающей массой поверхности, которая находится над уровнем океана и эквивалентна слою некоторой конечной толщины с дефективной плотностью: -2.7 (абсолютная плотность 0). Мощность этого дефекта доходит до 1200 м. Хотя таким образом и было установлено существование дефекта, но введение понятия об идеальном слое, находящемся на уровне моря и вызывающем возмущение, представляло собою мало утешительного. Во-первых, с этим нельзя было связать никаких физических представлений, так как слой не может одновременно и лежать на уровне океана и в то же время достигать мощности 1200 км; а во-вторых, это предположение о плотности, равной 0, приводило к представлению о существовании полостей. Правда, такие полости вблизи поверхности земли вполне возможны, но существование их на большой глубине, под огромным давлением, которое там имеет место, мало вероятно. Таким образом задача состоит в том, чтобы найти для этого дефекта возможно лучшее физическое представление, и кроме того каким-нибудь образом его локализовать. Согласно теории потенциала, эта задача остается неопределенной, так как можно найти бесчисленное число конфигураций масс, которые извне будут оказывать совершенно одинаковое возмущающее влияние на силу тяжести. Однако, сделавши некоторые правдоподобные допущения, можно получить целый ряд выводов. Что касается величины дефекта, то, повидимому, предположение о полной компенсации ближе к действительности, чем предположение о ее полном отсутствии. Поэтому оказалось удобным принять, что всегда существует полная компенсация, и считать ее нормальным явлением, а отклонения от нее рассматривать, как возмущение.

Определения силы тяжести на океане, которые произвел Геккер (O. Hecker)¹⁾ с помощью „кипячения термометров“²⁾ при своих много-

¹⁾ Hecker O.: Bestimmung der Schwerkraft auf dem Atlantischen Ozean sowie in Rio de Janeiro, Lissabon und Madrid; Veröffentl. d. preuss. geod. Institutes N. F. № 11. Berlin 1903.—Его же: Bestimmung der Schwerkraft auf dem Indischen und Grossen Ozean und deren Küsten, sowie erdmagnetische Messungen; Veröffentl. d. Zentralbureaus der intern. Erdmessung N. F. № 16. Berlin 1908.—Его же: Bestimmung der Schwerkraft auf dem Schwarzen Meere und an dessen Küsten, sowie neue Ausgleichung der Schwerkraftmessungen auf dem Atlantischen, Indischen und Grossen Ozean; Veröffentl. d. Zentralbureaus der intern. Erdmessung N. F. № 20. Berlin 1910.—Wolf, H.: Die Schwerkraft auf dem Meere und die Hypothese von Pratt; Zeitschrift v. Vermess. 45.—Helmert, R.: Die Erfahrungsgrundlagen der Lehre von allgemeinen Gleichgewichtszustande der Massen der Erdkruste. Berliner Sitzungsbericht. 1912. 20.

²⁾ Идея этого метода чрезвычайно проста. Давление атмосферы определяется, с одной стороны, непосредственно ртутным барометром, а с другой стороны — из таб-

численных путешествиях по всем большим морям, послужили заключительным звеном в этом построении: эти измерения показали, что силу тяжести на океане можно считать нормальной. Так как плотность водяной массы океана равна 1.03, т.-е. представляет собой по сравнению с земной корой, плотностью в 2.7, большой дефект массы, то тяжесть на поверхности океана может быть нормальна только в том случае, если под дном океана находится соответствующий избыток плотности. Таким образом, моря, повидимому, совершенно компенсированы.

Производить наблюдения с помощью „кипячения термометров“ очень трудно, а потому увеличить количество этих наблюдений не легко. Удачные наблюдения, которые, по поручению голландской комиссии по градусным измерениям, произвел Венинг-Мейне (Vening-Meinesz) ¹⁾ над маятником на подводной лодке, позволяют надеяться на то, что положение дела здесь примет вскоре благоприятный оборот.

Итак, на основании возмущений отвеса можно вычислить глубину залегания изостатического слоя. Первую попытку такого вычисления сделал Гельмерт ²⁾. Он исходил из тех положительных возмущений в силе тяжести, которые усиливались при приближении к крутым берегам континентов, и на связь которых с подземными компенсациями обратил внимание еще Скиотц (Schioetz) ³⁾. Гельмерт нашел, что изостатический слой, если принять гипотезу Пратта, залегает на глубине 118 км, в поразительном согласии с тем значением, которое было получено при американских исследованиях над возмущением отвеса.

Дальнейшие доказательства верности этого значения получили уже сами американцы ⁴⁾, которые все станции для измерения силы тяжести (124) привели к изостатическому слою, полагая, что он залегает на той глубине, которая найдена при измерениях отклонения отвеса, при чем получается система значений для силы тяжести, уже совершенно не обнаруживающая влияния внешних масс.

лиц — по температуре кипения чистой воды. В последнем случае, однако, давление измеряется весом ртутного столба, отнесенного к широте 45°. Отсюда, сравнивая получающиеся два значения для давления, можно найти $\frac{g}{g_{45}^0}$. Ред.

¹⁾ Meinesz, Vening: Observation de pendule sur la mer pendant un voyage en sous-marin de Holland à Java. Publication de la Commission Géodesique Neerlandaise.

²⁾ Helmert, R.: Die Tiefe der Ausgleichsfläche bei der Prattischen Hypothese für das Gleichgewicht der Erdkruste und der Verlauf der Schweresstörung von Inneren der Kontinente und Ozeane nach den Küsten. Sitzungsber. preuss. Akad. d. Wiss. 1909 № 48.

³⁾ Schioetz, O. E.: Die Schwerkraft auf dem Meere längs dem Abfall der Kontinente gegen die Tiefe. Christiania 1907. — Helmert, R.: Unvollkommenheiten im Gleichgewichtszustande der Erde. Sitzungsber. d. preuss. Akad. d. Wiss. 1908. № 44.

⁴⁾ Hayford, I. E. and Bowie, W.: The effect of topography and isostatic compensation upon the intensity of gravity. Coast and geodetic survey, spec. publ. — Bowie, W.: The effect of topographie etc. 2-nd paper, spec. publ. 12

Бауи¹⁾ также попытался определить глубину залегания изостатического слоя из наблюдений над силой тяжести; он это сделал с помощью наблюдательных пунктов на американских высоких горах. Бауи руководствовался той же основной идеей, что и Гельмерт, а именно, он полагал, что только в тех местностях, которые сильно отклоняются от нормальной слоистости, можно выводить следствия относительно вертикального распределения масс. Действительно, для горизонтальных слоев большого протяжения возмущение силы тяжести не зависит от высоты притягиваемого пункта над слоем. Глубина, на которой находятся вызывающие возмущение слои, совершенно не влияет на силу самого возмущения. Поэтому глубина залегания изостатического слоя не может быть определена, если наблюдательные пункты находятся в местности, в которой влияние возмущающих сил проявляется слабо. Бауи нашел, что изостатический слой залегает на глубине 95 км; при более позднем приведении для этой глубины было получено прежнее значение, т.е. 113 км.

При таком определении глубины изостатического слоя следует всегда иметь в виду известную осторожность, — как об этом свидетельствуют исследования Кольшюттера²⁾ в Германской Восточной Африке. Станции, расположенные на краю плато и в грабенах, сходны по своей ситуации со станциями на крутых берегах континентов. Определение глубины изостатического слоя, в хорошем согласии с другими исследованиями, дало 120 ± 20 км. Однако дальнейшие, более детальные исследования показали, что компенсация выполняется лишь в среднем; на самом же деле плато, поскольку оно возвышается над средней плоскостью на 1290 м, представляет собою избыток, а грабен — дефект массы. Но в таком случае определение глубины изостатического слоя является иллюзорным.

Для прибрежных станций для глубины залегания изостатического слоя и здесь были найдены значения, колеблющиеся от 100 до 140 км.

Итак, все наблюдения приводили к изостатическому слою и в дальнейшем необходимо было признать существование изостатического наслоения масс. Поэтому оказалось необходимым все наблюдения подвергнуть соответствующему приведению. Американские исследования показали, что при обработке наблюдений над силой тяжести³⁾ необходимо принять в расчет массы всей земли, вплоть до массы антиподов, так как, пренебрегая далеко отстоящими массами, мы делаем очень большую ошибку. Так, например, если взять станцию 49 (Salt Lake City), то общее притяжение 9 внутренних зон оказывается равным 0.1230

¹⁾ Bowie, W.: Investigations of gravity and isostasy U. S. Coast geodetic survey, special publ. 40.

²⁾ Kohlschütter E.: Über den Bau der Erdkruste in Deutsch-Ostafrika. Göttingen, Nachrichten. 1911.

³⁾ Bowie, W., l. c.

см/сек², но при этом притяжение зон убывает по мере удаления от центра; а потому можно было бы подумать, что отдаленные зоны вообще не оказывают никакого влияния. В действительности же эти значения меняют знак, а потом снова возрастают по абсолютной величине. Если дойти до 17-й зоны, то величина притяжения оказывается равной — 0.062 см/сек²; окончательное значение этой величины, получающееся, если принять во внимание все массы, равно — 0.0414 см/сек². В качестве вспомогательных средств для такого полного приведения можно упомянуть таблицы вышеупомянутых американских бюллетеней и таблицы Мейсснера¹⁾ и Нитгаммера²⁾. Автор³⁾ надеется свой вывод разложений в ряд по шаровым функциям до 16-го порядка соотношений между высотами и глубинами на земле привести к такой форме, чтобы для каждой точки земли можно было получить соответствующую поправку. К сожалению, все эти многочисленные вычисления до сих пор еще не опубликованы. Было бы очень желательно подобные изостатические приведения произвести для всех наблюдательных пунктов, измеряющих силы тяжести. Так как притяжение очень отдаленных масс для больших областей земной поверхности можно считать постоянным, то приведение, выполненное простыми методами, дает также хорошие результаты. Эти результаты особенно пригодны, когда необходимо сравнивать между собою небольшие области. В последнем случае возмущение действия отдаленных масс входит, как составная часть, в нормальную силу тяжести или в возмущающее влияние континентов.

III.

Итак, на основании наблюдений, мы определенно установили, что изостазия имеет место, т. е. существует выравнивание между видимыми и невидимыми неравномерностями в распределении масс. Теперь нашей ближайшей задачей является связать этот факт с физическими представлениями и указать, каким образом изостазия связана с фактами, известными из геологии. Обычно с понятием об изостазии связывают два различных представления. Одно из них принадлежит Пратту, и им до сих пор пользовались при выполнении большинства вычислений, другое же дано было Эри.

а) Гипотеза Пратт.

Основная мысль Пратта состоит в следующем: равновесие над изостатическим слоем обусловлено тем, что поднятие масс над уровнем

¹⁾ Meis'sner, O.: Tabellen zur isostatischen Reduction der Schwerkraft. Astronom. Nachr. 206. 1918.

²⁾ Niethammer, Th.: Zur Theorie der isostatischen Reduction der Schwerebeschleunigung. Verhandl. d. naturforsch. Ges. in Basel, 28, 2 Teil.

³⁾ Prey, A.: Darstellung der Höhen- und Tiefenverhältnisse der Erde durch eine Entwicklung nach Kugelfunktionen bis zur 16. Ordnung. Abhandl. d. Ges. d. Wiss. zu Göttingen, Math. physikal. Kl. N. G. 11.

океана сопровождалось разрыхлением подстилающих пород и связанным с этим уменьшением их плотности. Это объяснение согласуется с представлениями современных геологов о некоторых видах горообразования. Геологические исследования показали, что очень сильно сжатая внутри земли магма при уменьшении давления становится не только более подвижной и текучей, но при этом происходит также чрезвычайное увеличение объема и развитие больших количеств тепла. С этим увеличением объема, естественно, связано уменьшение плотности. Поэтому, когда под действием каких-либо сил глыбы поднимаются наверх, то возникающие при этом пустоты заполняются освободившейся от нагрузки и расширившейся магмой. Таким образом может подняться горная цепь, и это не будет сопровождаться увеличением массы; сила тяжести изменится незначительно, и горы с самого начала будут представляться компенсированными. Такой случай, повидимому, имеет место в плато Колорадо, которое, без сомнения, когда-то поднялось и которое теперь обнаруживает полную компенсацию.

Для того, чтобы облегчить математическую обработку материала, предполагают, что компенсирующие массы залегают непосредственно под возмущающими массами и равномерно распределяются вплоть до некоторой глубины, где расположен уже слой, названный нами изостатическим. Этой ¹⁾ гипотезой пользовался Гайфорд и другие ученые, при чем изложенные выше исследования показали, что повсюду получается одна и та же глубина изостатического слоя. Речь здесь, конечно, идет о некоторой средней величине, и возможно, что в некоторых горных странах полное выравнивание масс имеет место на более высоком уровне, а в других местах оно происходит несколько глубже.

Соотношение между высотой внешних масс и плотностью соответствующего им дефекта получается из равенства (4) или (5) на стр. 42.

$$\delta h = \delta_1 T \quad \text{и} \quad \delta h \cdot 0.615 = \delta_1 T$$

Так как возвышающиеся массы, очевидно, сами теряют в плотности, то было бы правильнее отсчитывать дефицит масс на земле не от уровня океана, а от физической поверхности земли, в океанах же начинать отсчет со дна. Тогда, вместо формулы (4) и (5), мы получили бы формулу

$$\delta h = \delta_1 (T + h) \quad \text{и} \quad \delta h \cdot 0.615 = \delta_1 (T + h);$$

во второй формуле h представляет собою глубину моря, а потому его надо брать с отрицательным знаком. Так как, по сравнению с T , h

¹⁾ В своей третьей статье: On the constitution of the solid crust of the earth (Phil. Trans. of London, 161, 1871) Пратт вводит изостазию в несколько иной форме, а именно, он предполагает, что компенсирующие массы всюду простираются до одной и той же глубины, эта глубина пропорциональна возвышению или глубине океана. Гипотеза Пратта в этой форме почти тождественна — по крайней мере для суши — с гипотезой Эри.

представляет собою очень маленькую величину (в среднем оно составляет от $1/30 T$ до $1/40 T$), то эту разность можно большей частью считать величиной второго порядка.

В согласии с этим Уошингтон (Washington)¹⁾ нашел, что средняя плотность убывает с увеличением высоты горы.

Гибнер (Hübner)²⁾ определяет плотность дефекта из равенства между видимыми массами и массами, нехватящими под землей, принимая во внимание, что радиусы кнаружи расходятся. Ясно, что это не соответствует более понятию об изостазии, так как эта последняя требует определения дефективной плотности непосредственно из равенства (4). На основании известных основных уравнений гидродинамики, следует, что

$$dW = \frac{1}{\delta} \cdot dp$$

где δ обозначает плотность, p — давление, а W — потенциал. Если мы положим $-\frac{\partial W}{\partial h} = g$, то получим $dp = -\delta g dh$. Таким образом, давле-

ние пропорционально только высоте и совершенно не зависит от того, что благодаря расхождению радиусов в верхних слоях находится

большая масса, чем в нижних. Построение Гибнера вполне согласуется с идеей изостатического распределения масс, но оно не удовлетворяет условию постоянства давления на изостатическом слое. Противоречие здесь заключается попросту в том, что предположение Пратта с гидростатической точки зрения совершенно не осуществимо.

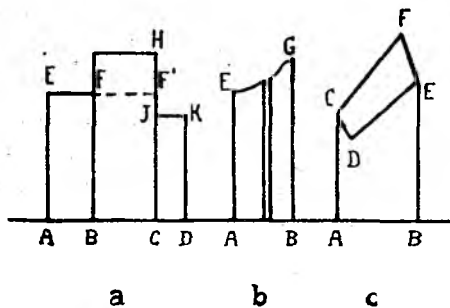


Рис. 2.

Согласно гипотезе Пратта в каждую сколь угодно малую площадку изостатического слоя должны упираться массы равного веса. Это предположение несомненно имеет свои слабые стороны. Действительно, рассмотрим рис. 2а. Пусть $ABEF$, $BCGH$ и т. д. представляют собою столбы масс одинакового веса. Таким образом, на площадки изостатического слоя AB , BC и т. д. наложены одинаковые тяжести. Для того, чтобы предположение Пратта могло выполняться, необходимо, чтобы столбы $ABCF$, $BCGH$ и т. д. были совершенно неподатливы и вполне независимы

¹⁾ Washington, H. S.: Isostasy and rock density. Bull. geol. soc. Am. 27 (1916).

²⁾ Hübner: Beitrag zur Theorie der isostatischen Reduction der Schwerebeschleunigung. Beiträge zur Geophysik 12.

друг от друга, как, например, стоящие одна около другой твердые призмы.

Согласно Бауи¹⁾ картина должна иметь следующий вид: представим себе призмы одинакового поперечного сечения и одинаковой тяжести, но сделанные из различного материала; длина таких призм должна быть различна: если представить себе, что эти призмы погружены рядом в какую-то жидкость, например, в ртуть, то все они погрузятся в эту жидкость одинаково глубоко, а потому будут иметь общее основание, которое соответствует изостатическому слою. Равенство поперечных сечений и веса, очевидно, даже излишне; достаточно, чтобы длина призмы была обратно пропорциональна ее удельному весу.

Земную кору, однако, нельзя представить себе в виде отдельных твердых и независимых друг от друга призм, простирающихся вплоть до изостатического слоя. Если бы, например, вследствие эрозии часть массы $GHFF'$ оказалась перенесенной на поверхность EF , то призма $ABEF$ стала бы тяжелее и погрузилась бы глубже: благодаря этому плоскость $ABCD$ потеряла бы характер изостатического слоя и эту последнюю нужно было бы с самого начала выбрать поглубже. Вообще в земной коре всегда возможны столь сильные изменения, что они затрагивают также и изостатический слой. В этом смысле положение этого слоя зависит от времени.

Соответственно с основными идеями теории Пратта, нужно для изостатического слоя избрать такую глубину залегания, чтобы все явления на земной коре, вообще говоря, его не затрагивали; однако, при том предположении, которому соответствует рис. 2а, это невозможно.

Сделаем теперь противоположное предположение: допустим, что массы подвижны, как если бы они находились в жидкости или в пластичном теле. Если мы теперь будем рассматривать уровень FEF' , то давление на FF' окажется больше, чем давление на EF , хотя плотность правого столба меньше, чем плотность левого. Но над FF' находится столб массы, а над EF такого столба нет. Таким образом мы в правом столбе имеем вообще большее давление, чем в левом, и только на изостатическом слое эта разность исчезает; то же самое будет, когда мы перейдем к чисто разностным соотношениям (рис. 2б) и при этом ступеньку GFE заменим непрерывным скатом. Справа у нас постоянно будет избыток давления, и движущиеся массы будут следовать за этим избытком; при этом будет происходить выравнивание, гора будет погружаться глубже, и во всей массе само собой установится гидростатическое равновесие. Но это, очевидно, опять-

¹⁾ Bowie, W.: Isostatic investigations and data for gravity stations in the United States established since 1915. U. S. Coast and geodetic survey, spec. publ. 99.

таки неосуществимо, так как видимые горные цепи необыкновенно тверды и под влиянием давления, которое господствует на поверхности, не проявляют никаких свойств пластичности.

Таким образом должна существовать некоторая промежуточная стадия, которая характеризуется тем, что поверхность состоит из твердых кусков, но книзу она становится под влиянием увеличивающегося давления и температуры все более и более пластичной. Пусть на рис. 2с *CDEF* представляет собою очень твердую поверхностную глыбу; тогда часть тяжести передается на левую сторону, и глыба будет выдерживать соответствующие разности давлений. На большой глубине массы будут смещаться до тех пор, пока не установится равновесие. Отсюда, однако, следует, что выравнивание между поверхностными образованиями и глубинными, не может происходить на сколь угодно малых областях; это выравнивание возможно только на больших поверхностях, и таким образом возникает вопрос, какой величины должна быть та минимальная поверхность, на которой такое выравнивание имеет место.

Итак, нам необходимо установить, на какой глубине и при какого рода нагрузке разность напряжений становится настолько большой, что она преодолевает сопротивление материалов и заставляет массы двигаться.

Дарвин (Darwin)¹⁾ исходил из допущения, что земля представляет собою однородный упругий шар, и вычислил, что горная область, возвышенности и ущелья которой отклоняются от среднего уровня на ± 2000 м и простираются на расстояние 315 англ. миль между параллельными хребтами, при средней плотности 2,8, должна уже погрузиться внутрь земли, если находящееся на глубине 50 миль вещество обладает не большей твердостью, чем олово или свинец. Это соответствует разности натяжений $0.4\ t$ на $см^2$.

Джеффрейс (Jeffreys)²⁾ вычислил, что для толщины твердой земной коры, которая составляет более половины расстояния между горными хребтами, при разности высот в ± 1500 м и плотности горных пород в 2,7, разность напряжений будет иметь максимальное значение $0.6\ t$ на $см^2$, между тем, как базальт при обычных условиях может не ломаясь выдержать напряжение в $2\ t$. Джеффрейс производил вычисления для гор меньших размеров и меньшей плотности, чем Дарвин, и все же напряжения у него получились больше, чем у Дарвина. Это произошло потому, что Джеффрейс принимал в расчет только земную кору, обладающую соответственно меньшей плотностью,

¹⁾ Darwin, G. H.: On the stresses caused in the interior of the earth by the weight of continents and mountains. Phil. Trans. of the R. S. 1882, p. 173; Scientific Paper 2, 9.

²⁾ Jeffreys, H.: The earth, its origin, history and physical constitution. Cambridge 1924.

между тем как Дарвин исходил из плотности всего земного шара. Поэтому деформации у Джеффрийса оказываются гораздо большими и также большими оказываются и натяжения аналогично тому, как при одинаковой нагрузке более крепкая балка выгибается меньше, чем более слабая, в которой предельное напряжение достигается гораздо раньше.

Если хребет относительно широк и тяжел, то кора изогнется и заставит при этом податься нижележащее пластичное вещество, благодаря чему установится изостатическое равновесие масс.

По вычислениям Джеффрийса, Альпы еще слишком малы, чтобы быть компенсированными. Они не могли бы изогнуть земную кору толщиной в 50 км; эта последняя выдержит их вес без всякой деформации. Для такого изгибания необходимо, чтобы расстояние от одного горного хребта до другого было равно 1200 км. Кавказ также должен был бы быть еще некомпенсирован, а Гималаи должны были бы лежать на границе компенсации; континенты же должны быть вполне компенсированными.

Борн (Born)¹⁾ занимается вопросом о том, сколь мощным должен быть слой земли для того, чтобы он своей тяжестью проломил нижележащую земную кору; при этом он пользуется данными для прочности, приведенными в руководстве Гиршвальда (Hirschwald) и полученными на основании экспериментальных измерений строительных камней; естественно, что этими данными можно пользоваться лишь с большой осторожностью. Здесь также оказывается, — речь идет только об осадочных породах, — что для проламывания куска, имеющего небольшой диаметр, необходима очень большая нагрузка; например, чтобы проломить круг диаметром в 10 км необходима нагрузка в 21 км осадков, при толщине коры 120 км. Однако по всей вероятности кора сначала сильно изгибается и лишь потом проламывается.

Пролом так же, как и изгибание, вытесняет пластичные подземные массы, благодаря чему устанавливается изостатическое равновесие.

Все теоретические исследования, повидимому, сходятся на том, что компенсация может существовать только для очень больших образований, наблюдения же указывают на существование противоположного явления²⁾. Компенсированными оказываются не только кон-

¹⁾ Born, A.: Isostasie und Schwermessung, ihre Bedeutung für geologische Vorgänge. Berlin, 1923.

²⁾ Лов (Love: Some problems of Geodynamics, Cambridge, 1911), исходя из предположения о существовании полной изостазии и делая те же допущения, что и Дарвин, получил меньшие значения для разностей напряжений (0.26 t на 1 см² против 0.41 t Дарвина). У континентов эти разности напряжений совершенно ничтожны, что и вполне понятно: после того, как наступило выравнивание масс, разности напряжений должны совершенно исчезнуть. Небольшие разности остаются еще бла-

тиненты, но также и все большие горы, как-то, Альпы, Кавказ, Гималаи, скалистые горы и т. д. Согласно Нитгаммеру¹⁾ компенсацию можно уже ожидать внутри области площадью в 64 км^2 , а американцы брали для своих расчетов окружности радиуса в $18,8 \text{ км}$, т.-е. площадью в 1000 км^2 (приближенно). Эта несогласованность наблюдений с теоретическими исследованиями произошла потому, что при теоретических исследованиях, повидимому, считали, что вещество внутри земли ведет себя точно так, как и на ее поверхности. Однако, если принять во внимание высокую температуру, которая господствует внутри земли, то это оказывается мало вероятным; делая расчет с помощью обычного геотермического градиента (3° на 100 м), мы получим на глубине 50 км температуру в 1500° , а на глубине в 80 км (50 миль) — 2400° , т.-е. температуру, при которой податливость камней должна значительно возрасти.

Правда, геотермический градиент при приближении к центру земли убывает, в противном случае вблизи центра была бы невозможная температура. Однако это изменение градиента внутри верхних слоев не особенно велико.

Вследствие отсутствия надежных представлений об этих вещах, лучше всего изменить самый ход исследований: заключения о состоянии земной коры и изостатические выводы делать не на зыбкой почве теоретических построений, но, наоборот, исходя из наблюдений, которые показывают, что изостатическое выравнивание существует уже в небольших областях,—заключать о состоянии земной коры и отсюда выводить свойства находящегося внутри земли вещества или судить о температуре, имеющей там место. Тогда окажется, что земная кора на глубине 50 км отнюдь не может быть твердой, а тем более она не тверда на глубине 120 км . Может быть, пластические свойства материи выявятся уже на глубине $20\text{—}30 \text{ км}$, тем более, что для проявления этих свойств имеется в распоряжении очень большое время.

С предположением о равномерном распределении дефектов внутри земли можно связать физическое представление. Положим, что плотность внешних масс равна δ_0 , а их высота перед деформацией равна h ; в таком случае давление на единицу поверхности пропорционально $\delta_0 h$. Благодаря этому давлению земная кора изогнется и вытеснит пластичную массу, находящуюся внутри земли; если плотность этой пла-

годаря тому, что изостатическое равновесие не тождественно гидростатическому. Полученные им результаты показывают, что после того, как изостатическое равновесие уже установилось, достаточно приложить очень незначительную силу, чтобы изогнуть массы, охватывающие большую площадь. Но вопрос в том, какие силы нужно преодолеть, чтобы установить изостатическое равновесие, остается в работе Лова нерешенным.

1) Niethammer, Th.: Die Schwerbestimmungen der schweizerischen geoder Kommission und ihre Ergebnisse. Verhandl. der schweiz. naturf. Ges. Schaffhausen, 1921.

стичной массы равна δ_I , то мощность вытесненного слоя, согласно основным законам изостазии, должна быть равна $\frac{\delta_o}{\delta_I} k$, и если мы не примем во внимание сжимаемость, то это будет иметь место на всем изогнувшемся слое. Таким образом масса, которая без деформации должна была бы находиться на глубине $x - \frac{\delta_o}{\delta_I} k$, оказывается теперь на глубине x . Эта опустившаяся масса уносит с собой плотность $\delta - \frac{d\delta}{dx} \cdot \frac{\delta_o}{\delta} \cdot k$. Вследствие этого, плотность каждого слоя оказывается на $\frac{d\delta}{dx} \cdot \frac{\delta_o}{\delta} \cdot k$ меньше нормальной плотности. Если мы предположим, что плотность при приближении к центру земли линейно убывает, то окажется, что $\frac{d\delta}{dx} = \text{const.}$, а потому $\frac{d\delta}{dx} \cdot \frac{\delta_o}{\delta} \cdot k$ на всем дефективном слое одинаково. Таким образом разность между плотностью дефективного и нормального слоя везде одинакова.

Величина $\frac{d\delta}{dx} \cdot \frac{\delta_o}{\delta} \cdot k$ представляет собою дефективную плотность. Если дефект масс, согласно гипотезе Пратта, простирается до глубины T , то дефективная плотность по формуле (4) равна $\frac{\delta_o h}{T}$, где h представляет собою высоту горы после прогиба земной коры. Таким образом получается $h = k - \frac{\delta_o}{\delta_I} \cdot k = k \cdot \frac{\delta_I - \delta_o}{\delta_I}$ и мы приходим к равенству

$$\frac{d\delta}{dx} \cdot \frac{\delta_o}{\delta} \cdot k = \frac{\delta_o}{T} \cdot k \cdot \frac{\delta_I - \delta_o}{\delta_I}$$

или

$$\frac{d\delta}{dx} = \frac{\delta_I - \delta_o}{\delta_I}.$$

То же значение $\frac{d\delta}{dx}$ получается и при предположении, что T представляет собою толщину земной коры, а δ_I ее плотность у нижней границы. Так как δ_I раньше представляла плотность вытесненной изнутри земной массы, то отсюда следует, что плотность не испытывает разрыва при переходе от земной коры к внутриземным массам, что вполне соответствует нашему представлению о строении земли. Затруднения возникают лишь постольку, поскольку едва ли можно предположить, что кора толщиной в 120 км изгибается. Джеффрейс нашел, что уже при толщине коры в 50 км величайшие горы могут быть выдержаны земной корой без деформации. Поэтому следовало бы глубину залегания изостатического слоя выбрать гораздо меньшей.

Если представить себе те разнообразные явления, которые привели к образованию земной коры, гор и океанов, то невозможно поверить, чтобы с самого начала непрерывно господствовало изостатическое состояние. Гораздо вероятнее, что после всяких нарушений оно восстанавливается вновь, и мы убеждены, что это происходит и теперь, хотя после отвердения земной коры эти явления должны все более и более замедляться. Нарушение изостатического равновесия может быть вызвано только горизонтальным передвижением на поверхности или внутри земли и может быть устранено только тем же путем. Эти движения могут произойти вследствие скопления или перенесения масс. Не надо, конечно, думать, что восстановление изостатического равновесия следует тотчас же вслед за его нарушением.

Земная кора поддается не сразу и может выдержать некоторую нагрузку, не превышающую определенного предела. После того, как этот предел достигнут, процесс восстановления изостатического равновесия происходит некоторое время усиленным темпом и сопровождается иногда сильными землетрясениями; этот процесс продолжается до тех пор, пока вследствие внутреннего сопротивления, т.-е. вследствие трения и твердости действующих масс и вещества, находящегося внутри земли, он снова приостанавливается. Такие процессы могут повторяться много раз.

Скопление масс может произойти различным образом. Рассмотрим сначала процесс „разбухания“ магмы, о котором уже говорилось на стр. 53¹⁾. Покуда это явление затрагивает только ту магму, которая лежит непосредственно под образовавшимся пустым пространством, установившееся с самого начала изостатическое состояние не изменяется. Но при этом можно говорить только о вертикальном поднятии глыб. Когда же, вследствие боковых сдвигов, образуются трещины, то изостатическое состояние изменяется, так как вещество, которое лежало раньше на том месте, где образовалась трещина, уходит и вместо него никакого нового вещества не притекает. В этом случае образуется дефект. Однако может случиться и так, что пространство в образовавшейся трещине гораздо больше того, которое может заполнить нижележащая магма вследствие увеличения ее объема. Тогда сбоку притекает к трещине новая магма. В результате вокруг трещины происходит опускание почвы, каковое и наблюдается в действительности. При этом, однако, возникающее выпячивание может обнаружить избыток масс. Этим, например, объясняется, почему молодые вулканические образования обнаруживают избыточную силу тяжести. Однако излишек должен со временем исчезнуть, и действи-

¹⁾ Penk, W. Anteil der Schmelzflüsse an den Bewegungen der Erdkruste. Die Naturwissenschaften, 12 Jahrg. Heft 41.

тельно, на вулканических островах мы наблюдаем медленное опускание поверхности, которое можно заметить благодаря росту коралловых риффов.

Второй причиной, вызывающей скопления масс, являются сдвиги и взаимные перемещения складок: также и здесь изостатические передвижения начинаются лишь после того, как эта нагрузка достигает некоторой определенной величины и пластичные массы перемещаются туда, где вследствие сдвига на поверхности образовался излишек веса. И здесь в молодых образованиях заметна еще полная изостазия.

Рассмотрим, наконец, в качестве последнего случая скопления масс седиментацию. Массы, которые при этом уносятся, происходят из гор и оседают в предгорьях или, наконец, в больших речных дельтах. Ляусон (Lawson¹⁾ указал на существенную разницу, которая связана с тем, что в одном случае массы проделывают короткий путь, а в другом — они переносятся на большие расстояния. В первом случае, например, при эрозии в горах, при которой большая часть масс оседает уже в предгорье, области, в которых происходят, как положительные, так и отрицательные возмущения, лежат близко друг от друга. В этом случае такие области могут друг друга компенсировать. Во втором случае, например, при образовании дельт, массы переносятся далеко от своего источника. Дельта образует область нарушения, окруженную со всех сторон областями, в которых не произошло возмущения. Дельта должна с ними выравняться, а потому возмущения будут распространяться с убывающей интенсивностью.

Высота поверхности возрастает не в такой же мере, как толщина седиментов. Когда вес наслаивающихся масс увеличивается, то он давит на нижележащие слои, и часть пластичных масс должна при этом поддаться. Однако, так как плотность этих масс больше, чем плотность осадков (плотность первых равна 2.9, а плотность вторых — 2.2), то мощность вытесненного слоя после того, как снова установится равновесие, должна составить всего только 22/29 толщины осадков. Таким образом под давлением 1 км осадков — лежащий под ними слой сдавится до 0.75 км, между тем, как верхний уровень поднимется только на 0.25 км. Итак, выясняется, что предположение изостатического равновесия делает наслоение мощных осадков гораздо более понятным, чем предположение, что нижние слои не поддаются.

Явлениям нагрузки соответствуют явления разгрузки, которые также в состоянии вызвать изостатическое движение.

Здесь в первую очередь следует указать на явления эрозии. Под влиянием воды огромные массы гор переносятся на значительные

¹⁾ Lawson: The geological implications of the doctrine of isostasy. Bulletin of the National research council, 8, part 4, 1924.

расстояния и оседают где-нибудь в другом месте. Горный хребет разгружается, а находящиеся в равновесии или перегруженные области, которые окружают горы, вдавливают под гору пластичное вещество, и заставляют горы таким образом подняться. Такое поднятие гор частью компенсирует вызванное эрозией понижение среднего их уровня. Так как плотность вдавленной массы приблизительно равна 2.9 в то время, как плотность горы составляет 2.7, то для того, чтобы установилось равновесие, достаточно слоя, толщина которого равна $27/29$ эродированного слоя. Километру унесенной при эрозии массы соответствует подпочвенный слой толщиной в 0.93 км, — настолько подымается гора, средняя высота которой опускается, таким образом, только на 70 м. Таким образом эрозия имеет очень слабое влияние на высоту гор.

Второй случай, при котором изостатические процессы вызываются разгрузкой, наблюдается в областях, подвергавшихся оледенению в ледниковый период. Вес ледяных глыб вытеснил залегавшие под ними пластичные массы в близлежащие области. Ледяные массы теперь исчезли, и эти области обнаруживают дефект силы тяжести. Вытесненные массы снова медленно возвращаются в свое прежнее положение, что можно заметить на основании поднятия областей, которые прежде покрывали ледники. Яснее всего это можно заметить в финно-скандинавском массиве и в Шотландии; наименьшим этот дефицит масс после оттаивания ледников оказался в Лабрадоре¹⁾.

Если бы, действительно, во всех частях земного шара имела место изостазия, то ни в возмущении отвеса, ни в возмущении силы тяжести после правильного приведения не должно бы оставаться никаких неприводимых остатков. Однако такие остатки всегда получаются, и их можно объяснить двояким образом: либо в действительности имеет место нарушение изостатического равновесия, либо при приведении была сделана ошибка.

Ясно, однако, что происходят нарушения изостатического равновесия. Это следует уже из того обстоятельства, что изостатические сдвиги не могут происходить тем же темпом, что и вызывающие их возмущения. Избыток давления с той или другой стороны должен сначала перейти за свое предельное значение, и лишь потом он может оказать на нижележащие слои какое-либо действие. Это последнее, по всей вероятности, происходит скачками и с некоторыми постоянным запозданием. Находящиеся внутри земли массы также не легко привести в движение. Материалы, из которых они построены на поверхности земли, считаются весьма твердыми. Только под влиянием огромного давления и высокой температуры эти массы становятся пластичными. Поэтому необходимо считаться с тем, что молодые образования

¹⁾ Vogt, A. I. c.

должны быть компенсированы только отчасти или совсем не компенсированы; между тем как старые формации достигли уже полной компенсации.

Что массы, вызывающие возмущения, не всегда расположены над компенсирующими их массами — это факт, которого нельзя отрицать, хотя американские геофизики и утверждают, что из их наблюдений этого нельзя заключить. Однако американские наблюдательные пункты лежат недостаточно густо; даже те 314 пунктов, которые были устроены во время исследования 1916 г.¹⁾, для пространства Соединенных Штатов составляют очень слабую сеть по сравнению, например, с 231 станциями, которыми располагает в 200 раз меньшей Швейцарии.

Необходимость такого относительного смещения вызывающих возмущения масс и компенсирующих масс непосредственно следует из того, что изостатическое равновесие устанавливается очень медленно. Можно прямо сказать, что компенсация дефекта масс Скандинавии в настоящее время лежит еще в окрестности области, некогда покрытой льдами. Карта возмущений силы тяжести Швейцарии²⁾ указывает на существования дефекта масс в долине Рейна, в районе Хура, т.-е. отнюдь не там, где находятся большие видимые массы, как, например, в Бернском Оберланде. Поэтому также и карта изостатических разностей указывает на сильное возмущение в изостазии в этой области.

В Тироле дефект масс также лежит не под горной цепью, а несколько сдвинут на север³⁾.

При большом расстоянии между массами, вызывающими возмущения, и компенсирующими их массами связь между ними, естественно, трудно заметить.

Нужно, однако, заметить, что тот факт, что остаются еще разности в возмущениях силы тяжести, не является еще доказательством нарушения изостатического равновесия. Эти разности могут произойти благодаря тому, что компенсирующие массы распределены во внутренних слоях земли не так, как мы это приняли для простоты вычисления. В таком случае разности происходят вследствие несовершенства приведения. Американские исследования показали, что большинство наблюдательных пунктов, лежащих на прекамбрийских формациях, имеют положительные остатки, а станции, лежащие на кенозойских формациях — отрицательны. Первые формации имеют значительно большую

¹⁾ Bowie, W. l. c. Spec. publ. 99.

²⁾ Astronomisch-geodätische Arbeiten in der Schweiz, 15, 16 — Niethammer, Th. Die Schwerbestimmungen der Schweiz, geodät. Kommission und ihre Ergebnisse. Verhandl. der Schweiz. naturf. gesellschaft. Schaffhausen 1921.

³⁾ Prey, A.: Untersuchungen über die Isostasie in den Alpen auf Grund der Schwermessungen in Tirol. Sitzungsber. d. Akad. d. Wiss. in Wien I. Mitteilung 121; II. Mitteilung 123.

плотность, чем последние. В первом случае, несмотря на полную компенсацию, нарушение равновесия могло бы произойти вследствие того, что более плотные массы лежат сверху в непосредственной близости к наблюдательным пунктам, между тем, как снизу находятся массы, обладающие меньшей плотностью. В кенозойских станциях это явление могло протекать как раз в обратном порядке. Однако на основании теоретических положений найдено, что неравномерности в вертикальном распределении слоев различной плотности могут иметь влияние на отвес только в том случае, если эти слои в горизонтальном направлении простираются не особенно далеко. Таким образом, подобное кажущееся нарушение изостатического равновесия возможно только там, где нет формаций, занимающих большие пространства.

б) Гипотеза Эри.

Мы подошли теперь ко второй, основанной на изостазии, гипотезе о строении земли. Согласно этой гипотезе, земная кора состоит из глыб более легкого вещества, которые плавают на более глубоко залегающей, более тяжелой и пластичной массе. Глубина изостатической поверхности определяется при этом нижней поверхностью самых мощных глыб. Рассматривая соотношения высот на континентах и глубины морского дна, можно ясно заметить существование двух из-

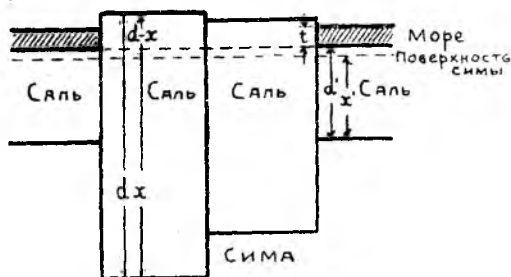


Рис. 3.

бранных уровней. Именно, если начертить себе профили, в которых вертикальные размеры значительно преувеличены, например, профили проф. Айде-риха (Heiderich), то это выступит очень ясно. Действительно, края континента вообще не особенно круты, — откос их в среднем равен 5° — хотя существуют области с очень

большой крутизной. Надо, однако, помнить, что с течением времени все покатости сглаживаются; так возможно, что все края континентов были когда-то более крутыми и континенты тогда, действительно, имели вид глыб.

С этой второй гипотезой об изостазии связаны два представления. Согласно одному из них, которое было введено Гейсканеном (Heiskanen), морское дно также представляет собою поверхность подобной глыбы, между тем, согласно другому представлению, дно моря лежит уже на границе пластичного слоя. Как при одном, так и при другом предположении верхний и нижний слои отличаются друг от друга по своему составу, и эта их разница выражается в различии плотно-

стей: саль и сима геологов¹⁾). Если мы обозначим (рис. 3) толщину континентальных глыб через d , их плотность через δ , то эти глыбы погрузятся в нижележащие слои, плотность которых равна δ_1 , до определенной глубины x и будут выступать из этого слоя на $d - x$. Если мы представим себе, что континентальные глыбы окружены водой до глубины t , то, на основании закона Архимеда, мы придем к следующему соотношению:

$$d \cdot \delta = x \delta_1 + t \cdot 1.03 \quad (6)$$

Для слоя толщиной в d' , находящегося под океаном, тяжесть воды, заполняющей океан, представляет собою нагрузку. Принимая это во внимание мы приходим к соотношению

$$d' \cdot \delta + t \cdot 1.03 = x' \delta_1 \quad (7)$$

Нужно еще принять в расчет, что средняя высота континентов составляет около 800 м над уровнем океана, а средняя глубина океана равна (приблизительно) 3700 м, и, таким образом, континенты возвышаются над дном океана на 4.500 м. Это приводит нас к равенству:

$$(d - x) - (d' - x') = 4.5 \quad (8)$$

Положим $\delta = 2.7$, $\delta_1 = 2.8$, т.е. $\delta_1 - \delta = 0.1$ и для d возьмем ряд значений 100, 80, 60, 40, 20 км. Из равенства (6) мы найдем для x следующий ряд значений:

$$95.1, 75.8, 56.5, 37.3, 17.9 \text{ км}$$

эти глыбы возвышаются таким образом над уровнем того слоя, в котором они плавают, на:

$$4.9, 4.2, 3.5, 2.7, 2.1 \text{ км};$$

но, так как дно океана лежит более, чем на 4.5 км ниже поверхности континентов, то только первый результат имеет смысл. При этом первом предположении из равенства (8) следует, что $d' - x = 0.4$, а из равенства (7) мы получаем $d' = 49$ км.

Для $\delta = 2.7$ и $\delta_1 = 2.9$, т.е. $\delta_1 - \delta = 0.2$, мы получаем следующие зависящие друг от друга значения:

$d = 100$	80	60	40	20 км
$x = 91.8$	73.2	54.5	35.9	17.3 „
$d - x = 8.2$	6.8	5.5	4.1	2.7 „
$d' - x' = 3.7$	2.3	1.0	—	—
$d' = 72.5$	52.5	33.5	—	—

¹⁾ „Саль“ — название большой группы пород, составляющих основу верхнего слоя наших материков. Название это предложено Зюссом и составлено из начальных слогов элементов, играющих в них главную роль Si Al — кремний — алюминий. Аналогично, „Сима“ — кремний — магний (Silicium-Magnesium) — название более тяжелых глубинных пород (базальт). *Ред.*

при втором представлении (рис. 4) мы должны в вышеприведенных равенствах положить d' и x' равными нулю и опустить равенство (7), таким образом, эти равенства сводятся к следующим двум уравнениям:

$$d \cdot \delta = x\delta' + t \cdot 103$$

$$d - x = 4.5.$$

Так как теперь остались только две неизвестные величины, то толщина слоя определяется однозначно, при данных δ и δ' .

Для $\delta = 2.7$ и $\delta_I - \delta = 0.1$, получается $d = 88$ км.

Для $\delta = 2.7$ и $\delta_I - \delta = 0.2$, получается $d = 46.5$ км.

Из этих двух представлений второе, несомненно, более правдоподобно. При первом представлении мы должны были бы допустить, что при охлаждении земли образовались глыбы двойкой толщины (а может быть и двойкой плотности), например, при $\delta - \delta_I = 0.1$ эти глыбы должны были быть толщиной в 100 и 49 км. Но ничто не вынуждает

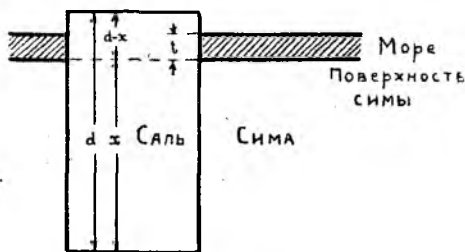


Рис. 4.

нас предположить, что существовало такое разделение. Следует также заметить, что согласно этой гипотезе глыбы должны были сталкиваться между собою, таким образом, чтобы при этом нигде не оставались трещины; надо полагать, что кроме того должна была бы существовать еще и третья поверхность уровня, а именно, поверхность того пластичного слоя, на котором плавали глыбы первого и второго рода. Или, быть может, к этому приводили величайшие морские глубины, которые находятся вблизи острова Тонга (Tonga) или вблизи Курильских островов. Согласно второму представлению само дно океана представляет поверхность, в которой плавают каменные глыбы, или, в крайнем случае, это дно было покрыто тонким слоем осадков. Для Тихого океана это представление, повидимому, подтверждается также и наблюдениями над скоростью распространения землетрясений. Правда, в Атлантическом океане и в Арктических морях имеют место другие соотношения.

Все изостатические явления, по гипотезе Эри, разыгрываются точно так же, как и у Пратта. А именно, континентальные глыбы обладают огромным протяжением для своей плотности. При местной нагрузке континентальная глыба опускается не как одно целое, а изгибается и вытесняет симу, т.-е. эти явления происходят так же, как и по гипотезе Пратта. Если, однако, груз оказывается слишком велик, то глыба разламывается и затем опускается так глубоко, как

это соответствует закону Архимеда. Края излома затем опять смыкаются, однако, они представляют собою место наименьшего сопротивления, а потому последующие новые сдвиги будут происходить здесь легче.

Местное уменьшение нагрузки имеет своим последствием образование выпячивания, так как в этом месте кора оказывает меньшее сопротивление подземному давлению; под этим выпячиванием будут собираться более тяжелые массы, которые будут заменять массы верхних слоев, унесенные при разгрузке.

Если давление подземных слоев на кору достаточно велико или кора делается достаточно тонкой, то произойдет пролом, и этот пролом будет идти снизу вверх, пока глыба не установится согласно закону Архимеда. Таким образом будет фактически достигнуто состояние, вполне отвечающее гипотезе Эри, и земная кора в том месте, где она поднимется над поверхностью океанов, будет погружена глубже в более плотные слои (рис. 3 и 4).

В тесной связи с теорией глыб стоит известная теория континентальных сдвигов Вегенера (Wegener). Предполагая, что континенты плавают по внутриземным слоям, согласно основным законам гидростатики, мы тем самым приписываем этим слоям определенные свойства жидкости. При этом возникает вопрос: насколько эти внутренние слои текучи? Могут ли континенты в этих слоях еще передвигаться, или они к ним в известной степени прикреплены? И какова та сила, которая в состоянии сдвинуть континенты?

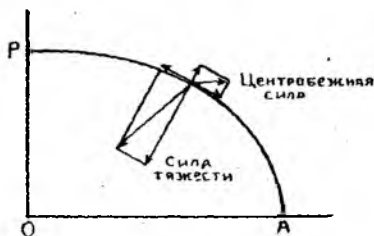


Рис. 5.

Здесь прежде всего приходит в голову так называемое отступление полюса. Представим себе, что земля представляет собою фигуру равновесия вращающейся жидкости, и заменим часть поверхностной массы плавающим континентом. Центр тяжести этого последнего находится выше, чем центр тяжести вытесненной им жидкой массы. Более высокому положению центра тяжести соответствует уменьшение силы тяжести и увеличение центробежной силы. В фигуре равновесия вращающейся жидкости результирующая силы тяжести и центробежной силы перпендикулярна поверхности жидкости. При этом сила тяжести дает составляющую, направленную на север, а центробежная сила — южную составляющую, и эти две составляющие друг друга уравнивают (рис. 5). Если сила тяжести уменьшается, то уменьшается также и северная составляющая и центробежная сила перевешивает; этот перевес особенно значителен в том случае, когда сама центробежная сила увеличивается. В итоге обе эти причины вызывают направленную к югу силу. Итак, вполне возможно, что под этим влиянием

континенты стремятся на юг. Правда, нельзя с уверенностью сказать, что дело обстоит так просто. Возможно, что под влиянием изменений силы тяжести и центробежной силы на глыбу огромного протяжения, последняя несколько колеблется, вследствие чего южная составляющая исчезает.

Нынешняя конфигурация земных частей не дает возможности сделать заключение о существовании подобных отступаний полюса. Можно даже сказать с некоторым правом, что континенты, за исключением Африки, удаляются от экватора; между Азией и Австралией связь уже порвана, а в Америке связь эта сводится к очень узкому мосту в тропиках. Правда, если допустить, что полюс смещается, так что в различное время юг находится в различных направлениях, то нынешний экватор не будет играть никакой роли. Но, исходя из геофизической точки зрения, совершенно невозможно допустить, чтобы полюс мог так сильно смещаться, тем более, что, как нам известно, континенты компенсированы. Таким образом трудно себе представить, чтобы можно было вывести землю из состояния равновесия.

Во-вторых, следует рассмотреть влияние приливов и отливов. Дарвин вычислил, что с приливами и отливами, которые вызываются луной, связана дисторзия земной поверхности. При этом, чем ближе к экватору лежит тот или иной пункт, тем сильнее он притягивается к западу; однако, эти смещения столь малы, что в настоящее время их нельзя принимать в расчет. Дарвин нашел, что смещение долгот в продолжение последних 46 миллионов лет составляет $19' \cos^2 \varphi$. Это число в действительности, быть может, еще больше; оно вычислено при условии, что земля представляет собою однородную массу; между тем как плотность земной поверхности значительно меньше ее средней плотности. Но даже после умножения на 4 или на 5 это число все же остается очень малым. Однако не исключена возможность, что в давно прошедшие времена это влияние луны было сильнее, так как смещение долгот обратно пропорционально 6-й степени расстояния земли от луны и прямо пропорционально относительной угловой скорости земли относительно луны. Если мы вычислим смещение долгот, опираясь на Дарвинову теорию эволюции системы земля-луна и принявши во внимание соответствующие расстояния земли и луны, а также времена обращения земли и луны, как они получаются из теории приливного трения, — мы получим следующую таблицу:

	Время вращения земли.	Время обраще- ния луны.	Расстоян. в зем. рад.	Изменен. мерид. за год.
Теперь	$23^h 56^m$	27.32^d	60.4	$5.10^{-10} \cos 2\epsilon \cos^2 \varphi$ градуса.
46 300 000 л. тому назад . .	15 30	18.62	46.8	4.10^{-8}
56 600 000 " " " . .	9 55	8.17	27.0	$1.6.10^{-6}$
56 800 000 " " " . .	7 50	3.59	5.6	5.10^{-5}
56 810 000 " " " . .	6 45	1.58	9.0	$1.6.10^{-3}$

Эти значения были вычислены Дарвином в предположении, что при вынешних условиях влияние приливного трения на наклон эклиптики максимально. Это соответствует относительно сильной подвижности масс. Но такая сильная подвижность в нынешнее время не имеет места. Поэтому приведенные раньше промежутки времени следует еще значительно увеличить. Выбранные Дарвином значения замедления приливов и отливов получаются, исходя из $\epsilon = 17,5^\circ$ для полудневных приливов и настоящего времени. Если мы примем $\epsilon = 0$, то мы получаем максимальное значение изменения долготы. Оно имело бы место, если бы поверхность земли была вполне текуча. Этому соответствуют, таким образом, при $\varphi = 0$ (экватор), численные коэффициенты последнего столбца. Значение ϵ зависит от избранной вязкости. По формулам Дарвина, мы находим следующие, связанные друг с другом, значения:

$\eta = 10$ CGS	$2\epsilon = 0$	$\cos 2\epsilon = 1.00$
10^{10}	0.13	1.00
10^{11}	2.10	1.00
10^{12}	20.10	0.94
10^{13}	75.1	0.26
10^{14}	88.28	0.03

Здесь ν обозначает коэффициент твердости, а t — время релаксации; таким образом η представляет собою коэффициент вязкости. Отсюда следует, что вплоть до весьма значительной степени твердости земля ведет себя так же, как и жидкость. При этом жидкость 10^{10} CGS соответствует, например, телу, обладающему твердостью стекла ($\nu = 2.44 \cdot 10^{11}$) со временем релаксации в 11 часов, или твердости стали ($\nu = 7.8 \cdot 10^{11}$) при времени релаксации 3–5 часов. На основании цифр последнего столбца предыдущей таблицы, мы находим, что в течение 10 000 лет произойдет смещение долготы уже на 16° , а в течение 100 000 лет на 160° . Однако для этого движения мы можем взять большие промежутки времени; тогда, взяв для вязкости гораздо большие значения, мы все же получим довольно большие смещения долготы. Влияние это было максимальным тогда, когда время вращения земли вокруг своей оси было равно 5 часам 50 мин., а время обращения луны вокруг земли было равно 7 час. 10 мин., — оно было тогда в 56 миллионов раз больше, чем теперь. Таким образом получается, что ежегодное смещение в то время было равно $18'$. Итак, несомненно, что в ранние периоды развития земли могли иметь место сильные сдвиги континентов, даже если допустить, что вязкость в то время была так велика, как теперь. Эти смещения окажутся еще более правдоподобными, если допустить, что земная кора раньше была гораздо мягче, чем теперь. Повидимому, сам Дарвин считается с геологическим значением этого факта, когда он указывает на форму азиатских берегов Тихого океана и на берега Атлантического океана

у Европы и Америки. Но во всяком случае действие этих смещений могло быть ощутительным, по крайней мере, 50 миллионов лет тому назад.

Не следует, однако, представлять себе, что континенты плавали на нижележащих слоях подобно кораблям; в действительности, эти слои также принимали участие в движении: континенты уносились течением этих подземных слоев подобно тому, как плавучие льдины уносятся морским течением. Это, как мне кажется, значительно облегчает представление о передвижениях континентов. Не следует удивляться тому, что континенты не оставались связанными вместе, а отрывались друг от друга, вращались и т. п. Ведь континенты при всех этих движениях должны были преодолеть различные препятствия и сопротивления. Здесь нельзя указать, насколько основные положения геологии противоречат допущениям этой теории.

На основании имеющихся наблюдений нельзя еще окончательно решить, какую из двух изостатических гипотез следует предпочесть: гипотезу Пратта или гипотезу Эри. Гейсканен нашел, что для Кавказа и для Соединенных Штатов гипотеза Эри несколько лучше, но отличие в этом случае очень незначительно. Поэтому почти безразлично, какая из этих двух гипотез правильна. Главное различие состоит в том, что у Пратта весь дефект распространяется равномерно, пока он не доходит до изостатического слоя, а дефективная плотность меняется в зависимости от высоты видимых масс. По Пратту, нормальная плотность возрастает в земной коре по мере углубления внутрь земли. У Эри дефективная плотность постоянно равна разности между слоями саль и сима, а компенсация вышележащих слоев всецело зависит от нижней границы. Плотность земной коры можно при этом считать постоянной. Если пространство, занимаемое глыбами, не особенно велико по сравнению с их толщиной, то результаты приведения на основании этих двух методов могут сильно отличаться друг от друга. Во время своих исследований американцы делали приведения по способу Пратта и не получили при этом больших разностей. Основываясь на этом, американцы отвергают гипотезу Эри. Гейсканен произвел те же произведения по методу Эри и также не получил значительных разностей. Повидимому, те случаи, когда приведения по различным методам дают отличные друг от друга результаты, встречаются весьма редко, и в этих исключительных случаях расхождение легко можно приписать местным возмущениям. Итак, решить, какая из этих гипотез правильна, можно только на основании геологических построений. Теория глыб, по крайней мере, по отношению к большим формам, оказывается более вероятной, однако в некоторых случаях оправдывается также и вторая гипотеза. Так, например, нельзя отрицать, что вторая гипотеза очень хорошо объясняет явления, связанные с разгрузкой магмы.

С изостатическими явлениями, несомненно, связаны движения, которые относятся к геологическому развитию земной коры. Однако неправильно будет думать, что это развитие происходило только благодаря изостатическим явлениям. Нельзя согласиться с Бауи, когда он совершенно исключает большие боковые сдвиги горных образований и все сводит к расширению вещества, из которого состоит земная кора, и отсюда приходит к заключению, что нарушения изостатического равновесия вообще невозможны.

Прежде всего надо по этому поводу заметить, что геологи отнюдь не отрицают теорию боковых сдвигов. Напротив того, эта теория в современной теории покровов играет очень большую роль.

В теории Бауи речь идет не о той разгрузке магмы, о которой мы уже говорили, а об осадках, которые оседают под влиянием своей собственной тяжести и приводят к горообразованию. Предположим, что образовался мощный слой осадков и что этот слой под влиянием своей собственной тяжести так сильно осел, что его верхняя граница совпала с уровнем океана. Согласно теории Бауи, нижние части при этом очень сильно увеличиваются в своем объеме, приподымают лежащие над ними слои и являются причиной образования гор. Складки и дислокации произошли в горах вследствие неравномерности этих явлений. При более внимательном изучении теории Бауи выплывает, однако, так много затруднений, что приходится усомниться в возможности подобного развития земли. Положим, например, что мощность слоя сначала равна 10 км, а новая гора поднимается на 2000 м, в таком случае толщина слоя должна увеличиться на $\frac{1}{5}$. Так как плотность массы, из которой состоит гора, равна 2.7, то перед расширением эта плотность должна была равняться 3.4. Это еще допустимо. Но, по Бауи, дефект должен ограничиться верхним слоем, толщиной в 10 км при дефективной плотности в 0.7, а это во всяком случае совершенно не соответствует предположению Гайфорта.

Если поинтересоваться, почему происходят эти расширения, то первым делом приходит в голову объяснить их действием теплоты. Но допустив, что средняя температура слоя равна 150° — на глубине 10 км вряд ли возможна более высокая температура — мы получим при расширении на 20% невероятно большой коэффициент расширения (почти в 100 раз больший, чем коэффициент расширения железа). Если же предположить, что осадки опустились гораздо глубже и что температура их, таким образом, гораздо выше, то для того, чтобы они могли достигнуть поверхности земли, их расширение должно быть также гораздо сильнее. Правда, Бауи имеет в данном случае в виду не влияние температуры, а химические и физические изменения, но существование таковых пока еще неизвестно.

При этом поднятие земли над 2000 м оказалось бы еще слишком незначительным. Действительно, если горная область не поднимается

на тысячи метров (мы здесь не принимаем во внимание действия эрозии), то куда же деваются столь мощные осадочные отложения? Допустим, наконец, что образовалась новая горная область и вследствие эрозии вблизи ее снова возник слой осадков очень большой толщины. Могут ли теперь эти массы сделать прежнюю метаморфозу с увеличением объема?

Поэтому мне кажется, что если бы подобное образование вод было бы, вообще говоря, возможно, то оно должно было бы тотчас же проявиться.

Итак, нельзя совершенно игнорировать известные силы орогенеза, возникающие вследствие бокового смещения гор. Наоборот, влияние этих сил очень велико; около земной поверхности очень скоро возникают колоссальные силы; эти силы являются главной причиной, нарушающей состояние изостатического равновесия. Действие орогенетических сил происходит быстро и внезапно и влечет за собою нарушение порядка; работа же изостазии, которая стремится восстановить порядок и равновесие, происходит медленно и непрерывно.
