

ОБ ИЗОСТАЗИИ И СИЛЕ ТЯЖЕСТИ.

М. Поликарпов.

Настоящая статья, являясь дополнением к обзору Прей: „Теория изостазии, ее развитие и результаты“, помещенному в „Успехах Физических Наук“ (т. VI, вып. I), предполагает знакомство читателя с основными положениями теории изостазии.

Материалом для статьи, предлагаемой вниманию читателя, послужило обширное „Исследование о силе тяжести и изостазии“, выполненное Гейсканеном¹⁾ (W. Heiskanen). Гейсканен в результате своих вычислений пришел к целому ряду интересных выводов как о состоянии равновесия наиболее замечательных в гравитационном отношении мест земной коры (Кавказ, Гарц, Альпы и др.), так и о форме земли в целом. Более подробное изложение работы Гейсканена (чем, это сделано в упомянутой статье Прей) находит себе оправдание в том, что автор, главным образом, останавливается на картине распределения силы тяжести в Европе, представляющей чрезвычайно большой интерес в геофизическом отношении.

Исследования силы тяжести в Соединенных Штатах с несомненностью доказали необходимость введения, для каждой станции, поправок как за влияние рельефа всего земного шара, так и за изостатическую компенсацию этого рельефа. Для американских станций эта работа, выполненная Гайфордом и Бауи (Hayford и Bowie), позволила сделать целый ряд чрезвычайно интересных и важных выводов.

Для Европы и Кавказа та же работа была недавно проделана Гейсканеном, но в отличие от американских исследователей, которые пользовались для своих вычислений общеизвестной гипотезой Пратта, Гейсканен ввел изостатическую редукцию для европейских и кавказских станций не только по Пратту, но и воспользовался гипотезой английского астронома Эри (Airy).

1. Введение. Об изостатической компенсации земной коры, как известно, имеются две гипотезы. Согласно первой гипотезе, плотность пород, находящихся под горами, меньше плотности пород под океанами, так что избыток поверхностных масс в первом случае и недостаток масс во втором соответственно компенсируются надземными массами, распространяющимися до некоторой определенной глубины, где находится так называемый „изостатический слой“. Ниже изостатического слоя имеет место уже гидростатическое равновесие, так что каждая единица поверхности этого слоя испытывает одинаковое давление. Вторая гипотеза говорит, что под земной корой находится слой плотной лавы, в котором плавают горы и континенты, подобно айсбергам в море. По последнему предположению, изостатическая компенсация должна наступать под океанами скорее, чем под горами. Таким образом, первая гипотеза характеризуется глубиной залегания „изостатического слоя“, вторая — толщиной плавающей земной коры и разностью плотностей между земной корой и слоем лавы.

¹⁾ W. Heiskanen. Untersuchungen über Schwerkraft und Isostasie. Veröffentlichungen des Finnischen Geodätischen Institutes. № 4. 1924.

Первая гипотеза была высказана Праттом, который, вычислив отклонение отвеса, вызываемое Гималайским хребтом, нашел, что полученное значение больше наблюдаемого на самом деле. Для объяснения этого факта он предположил, что под Гималаями имеется недостаток масс, который и вызывает уменьшение отклонения отвеса. Первый, кто высказал вторую гипотезу, был английский астроном Эри.

Все геодезические исследования по изостазии показывают, что предположения об изостатической компенсации надземных масс уменьшают как величину отклонений отвеса, так и величину аномалий силы тяжести.

В настоящее время учение об изостазии не является более гипотезой, но может быть рассматриваемо как достоверная теория. Не решенным является только вопрос: какая из гипотез (Пратта или Эри) лучше отвечает действительности. Поэтому представляют большой интерес все попытки вычисления глубины изостатического слоя по Пратту и толщины земной коры и плотности лавы по Эри.

Геодезисты исключительно пользуются гипотезой Пратта, так как она, приводя в геодезическом отношении к таким же результатам, как и гипотеза Эри, значительно проще для математической обработки. Кроме того, Гайфорд и Бауи принимают, что на земной поверхности имеется полная компенсация, т.е. каждой возвышенности и каждой впадине, как бы малы они ни были, соответствует под землей недостаток или избыток масс.

При этих предположениях Гайфорд в 1909 г. получил из отклонений отвеса в Соединенных Штатах для глубины изостатической поверхности 113 км и вторично, в 1910 г., также из отклонений отвеса 122 км. Бауи на основании отклонений отвеса и измерений силы тяжести в Соединенных Штатах дает величину 96 км. Гельмерт (Helmert) свою величину 118 км получил несколько иным способом. Он исследовал изменения силы тяжести у крутых берегов и вычислил глубину изостатической поверхности, которая лучше всего могла бы объяснить имеющиеся здесь аномалии тяжести. Все вычисленные глубины изостатической поверхности согласуются между собою довольно хорошо.

Гайфордом были вычислены таблицы, при помощи которых можно было ввести топографо-изостатическую редукцию для отклонения отвеса, если известна только одна топографическая редукция. Что касается топографо-изостатической редукции для силы тяжести, то в сочинениях Гайфорда и Бауи находятся таблицы, при помощи которых можно получить топографическую и изостатическую редукции для глубины изостазии в 113.7 км, если известны средние высоты отдельных зон, окружающих станцию. Бауи, кроме того, вычислил формулы и дал таблицы, позволяющие определить компенсации для любой глубины, если таковые даны для 113.7 км. Так, Бауи приводит таблицы для глубины: 42.6, 56.9, 85.3, 127.9, 156.25 и 184.8 км.

Гипотеза Пратта встречает возражения, главным образом, со стороны геологов, так как глубина изостатического слоя, вычисляемая по этой гипотезе, значительно больше той, которая может быть допущена с точки зрения геологии и геофизики. Но для геодезистов это предположение Пратта, как уже было сказано выше, весьма полезно, так как дает довольно простой способ для вычисления изостатической компенсации.

Геологи стоят на другой точке зрения. Они начинают свои рассуждения с геологических фактов и теорий и исследуют, в какой степени их выводы подтверждаются геодезическими данными. Геологи считают более правильной гипотезу Эри. Это следует из трудов Кёбера, Коссмата и Борна. Геофизики также находят гипотезу Эри более вероятной, и известный немецкий геофизик Вегенер обосновал свою теорию плавающих континентов на гипотезе Эри.

До настоящего времени не делалось попыток вычисления аномалий силы тяжести и отклонений отвеса на основании гипотезы Эри и не производилось сравнения ее с гипотезой Пратта.

Гипотеза Пратта, уточненная Гайфордом и Бауи, очень хорошо объясняет аномалии силы тяжести и отклонения отвеса в Соединенных Штатах. Но если рассматривать карту аномалий тяжести, оставшихся после введения орографической редукции, то можно заметить, что в некоторых местах Европы и особенно на Кавказе оставшиеся аномалии не могут быть объяснены с помощью изостазии. Так, оказывается, что почти все Средиземное море имеет положительную аномалию, достигающую до $0,1 \text{ см/сек}^2$, а Каспийское море — такой же величины отрицательную аномалию силы тяжести.

Во всяком случае, несомненно, что Европа и Кавказ принадлежат к областям весьма интересным в геофизическом отношении, заслуживающим подробных изостатических исследований.

Гейсканен задается целью: 1) изучить аномалию силы тяжести на Кавказе и в некоторых интересных областях Европы при предположении изостазии, 2) выяснить вопрос: какая из гипотез, Пратта или Эри, лучше объясняет эти аномалии и, наконец, 3) вычислить при помощи всех станций, для которых имеются изостатические редукции, формулу для нормального распределения силы тяжести на земле и сжатие земного сфероида.

2. Метод редукции.

Числовые значения ускорений силы тяжести для станций, подвергавшихся изостатической редукции, были взяты Гейсканеном из известной работы Борраса (Borras). В этой работе Боррас привел все известные ему наблюдения силы тяжести к так называемой „Потсдамской системе“, так что данные им числа вполне сравнимы между собой.

Чтобы наблюдаемые значения силы тяжести g можно было сравнивать с теоретическими значениями g_0 , нужно редуцировать величины g . Смотря по тому, с какой точностью желают учитывать причины, влияющие на измеренную силу тяжести, пользуются четырьмя редукциями: 1) редукцией „в свободном воздухе“ (Freiluftreduktion), 2) редукцией Буге (Bouguer), 3) чисто топографической редукцией или 4) топографо-изостатической редукцией.

Редукция „в свободном воздухе“, называемая часто „редукцией за высоту“, переводит наблюдаемое значение g от плоскости наблюдения к поверхности моря, при чем принимается во внимание только высота станции. Эта поправка будет:

$\frac{2H}{R} g = 0,0003086 \times H$, где H — высота места наблюдения в метрах, а R — радиус земли в тех же единицах. Величины, редуцированные по этой формуле, обыкновенно обозначаются g_0 .

Чтобы получить силу тяжести на поверхности моря, нужно принять во внимание притяжение горными породами, лежащими между исследуемым пунктом и уровнем моря.

Кроме того, должны быть приняты во внимание неровности местности вокруг станций, т. е. еще должна быть введена поправка „за местность“ (орографическая). Эта поправка происходит потому, что на вершине отдельной горы сила тяжести меньше, чем на равнине одинаковой высоты, так как в первом случае отсутствуют горные породы, которые во втором случае окружают станцию наблюдений, поднимаясь до высоты этой станции. Эта поправка, таким образом, должна быть положительная, но и для равнинных станций она должна иметь тот же знак, ибо массы, лежащие выше станции, уменьшают величину тяжести. Положительной поправкой ($g' - g$) можно пренебречь в местностях с слабо выраженным рельефом, но в горных областях она должна быть принята во внимание, так как иногда превосходит $0,030 \text{ см/сек}^2$.

Если мы соединим все три поправки, то получим редукцию Буге:

$$g''_0 = g + \frac{2H}{R} g \left(1 - \frac{3}{4} \frac{D}{D_m}\right) + (g' - g),$$

где D обозначает плотность промежуточного слоя горных пород и D_m — среднюю плотность земли.

Редукцию по Буге следует предпочитать простой редукции „в свободном воздухе“, так как в первом случае учитывается влияние промежуточных слоев, находящихся между станцией наблюдения и уровнем моря. Эта редукция может быть вычислена так же легко, как и редукция „в свободном воздухе“ (если, конечно, не принимать во внимание „местной“ поправки, которая, в большинстве случаев, весьма незначительна), — для этого достаточно умножить редукцию „в свободном воздухе“ на множитель $\left(1 - \frac{3}{4} \frac{D}{D_m}\right)$.

Бугерова редукция будет тем правильнее, чем для большего района, окружающего станцию, будет учитываться орографическая поправка. Но так как обычно поправка на местность вычисляется для района в 100—200 км и так как Бугерова редукция не принимает во внимание кривизну земли, то она не всегда достаточно верна. Чтобы получить редукцию, которая учитывала бы неровности (как континентов, так и океанов) всего земного шара, необходимо, определив средние высоты всех зон, окружающих станцию, вычислить их влияние. Это будет чисто топографическая (орографическая) редукция. Формула для нее напишется так:

$$g_t = g + \frac{2H}{R} g + \delta g_t,$$

где δg_t обозначает влияние топографии всего земного шара.

Если бы мы, кроме притяжения всеми наружными массами, еще приняли во внимание действие подземных масс, компенсирующих дефекты или избытки поверхностных масс, то получили бы „топографо-изостатическую“ редукцию:

$$g_i = g + \frac{2H}{R} g + \delta g_t + \delta g_i,$$

где δg_i соответствует притяжению подземными компенсирующими массами. Смотря по тому, из какой гипотезы об изостазии мы будем исходить, мы получим или редукцию Пратта — Гайфорда, или редукцию Эри.

Для получения нормальных значений γ_0 Гейсканен пользовался формулой Гельмерта (1901 г.):

$$\gamma_0 = 978.030 (1 + 0.005302 \sin^2 \varphi - 0.000007 \sin^2 2\varphi),$$

где φ — географическая широта станции наблюдения.

Смотря по тому, сравниваем ли мы γ_0 с g_0 , g_0'' , g_t и g_i , мы получаем аномальные значения силы тяжести, соответствующие редукции „в свободном воздухе“ (Буге), чисто топографической или топографо-изостатической.

В этой работе, для вычисления топографо-изостатической редукции, Гейсканен применял метод Гайфорда, который состоял в том, что вся земля делилась концентрическими кругами (станция принималась за центр) и радиусами, исходящими из центра, на отдельные области, для которых определялась средняя высота или средняя глубина. Действие этих отдельных областей вычислялось при помощи таблиц Гайфорда. Здесь следует упомянуть, что глубина изостатического слоя в 113.7 км считается в таблицах Гайфорда не от поверхности моря, но от физической поверхности земли. Первые зоны, ближайшие к станции, носят буквенные обозначения $A - O$, а последние — нумерные $18 - 1$.

Высоты и глубины устанавливались обычным порядком: прозрачная бумага с нанесенными на ней зонами, в масштабе карты, накладывалась на карту, и отсчитывалась средняя высота каждой зоны.

Обычно влияния зон $A - O$ (внешний радиус зоны $O = 166\,700$ метров), а часто и зон $18 - 9$, устанавливались для каждой станции отдельно. Только при редукции близко лежащих друг к другу станций прибегали к интерполяции. Так как влияние

зон 8—1 вообще мало изменяется от пункта к пункту, то было вычислено влияние этих зон только для одной станции, остальные станции определены интерполяцией. Если вблизи станций, редуцированных Гейсканеном, находились станции, вычисленные ранее Бауи, как для Гарца, Исполинских гор и др., то влияние дальних зон, иногда с 13-й зоны, определялось интерполированием по данным Бауи.

Гайффорд и Бауи производили свои расчеты при двух предположениях о характере компенсации. Первая гипотеза, носящая название „местной компенсации“ (lokale Kompensation), предполагает, что компенсирующие подземные массы равномерно распределены до некоторой глубины и лежат строго под компенсируемыми неровностями поверхности земли. По второй гипотезе — гипотезе „областной компенсации“ (regionale Kompensation), — компенсирующие массы распространяются не только в вертикальном, но и в горизонтальном направлении, и компенсируются сразу большие участки земной поверхности, а не отдельные незначительные части. Бауи пользуется тремя предположениями, согласно которым „областная“ компенсация распространяется на 18.8, 58.8 и 166.7 км от станции, а вне этих границ имеет место обычная „местная“ компенсация. Он приходит в результате своих вычислений к тому выводу, что два первых предположения приводят почти к таким же результатам, как и „местная“ компенсация, и что третье предположение дает худшие результаты, чем предположение о простой „местной“ компенсации.

Переходим к гипотезе Эри.

По гипотезе Эри, более легкая земная кора плавает в более тяжелом лаваобразном слое. Первая носит название слоя „Sal“, второй слой — слой „Sima“, по имени химических элементов, входящих в них. Земная кора погружена в слой „Sima“ под океанами на меньшую глубину, чем под горными хребтами. Если мы предположим, что на уровне моря компенсация отсутствует, то легко понять, что под горами имеет место отрицательная компенсация, а под глубокими океанами — положительная компенсация.

Чтобы облегчить вычисления, Гейсканен допускает, что плотности слоев „Sal“ и „Sima“ постоянны и один слой переходит в другой скачком. Для средней плотности земной коры взято значение 2.67, а для разности плотностей между вышеупомянутыми слоями приняты значения 0.2, 0.3 и 0.6. Можно возразить, что эта гипотеза об однородной плотности слоев не соответствует действительности, и плотность слоев должна быть линейной функцией глубины, но последнее предположение очень мало изменяет общий результат.

Гейсканен ведет свои вычисления при следующих четырех предположениях, собранных в таблицу, приводимую ниже. В первых двух столбцах даны: предполагаемые толщины земной коры, соответствующие уровню моря и разности плотностей между слоями „Sal“ и „Sima“. Если принять для средней глубины океана величину 3 680 м, а для средней высоты континентальных масс 800 м и считать, что $\frac{2}{3}$ земной поверхности покрыто водой, то для средней толщины земной коры получим значения, приведенные в столбце 3-м, при чем толщина земной коры на океанах и континентах будут различны; их значения собраны в двух последних столбцах:

Предположения	км	Средняя толщина км	Океан км	Континент км
I.	77.2	60.6	47	87.9
II.	63.8	52.7	43.6	70.9
III.	63.8	58.2	53.7	67.3
IV.	40.0	34.5	29.9	43.6

Мы видим, что средняя толщина земной коры колеблется, при этих предположениях, между 35 и 60 км, что весьма вероятно.

Для получения редукции Эри Гейсканеном были вычислены вспомогательные таблицы влияния зон А — О в зависимости от средней высоты этих зон. В зонах 12—1 редукция по гипотезе Гайфорда с глубиной изостатического слоя 2Т имеет почти такую же величину, как и редукция по гипотезе Эри с средней глубиной компенсации Т; так что в этих случаях можно пользоваться таблицами Гайфорда и Бауи. Гейсканен так и поступал.

Результаты вычисления различных редукций и соответствующих им аномалий собраны в целом ряде таблиц. При чем обычно даются следующие аномалии: 1) „в свободном воздухе“, 2) Буге + топограф., 3) Гайфорда (113.7 и 156.3 км), 4) „областная“ (regionale) и 5) Эри — для 1-го и 2-го предположений (иногда и 4-го).

3. Аномалии силы тяжести.

а) Сперва рассмотрим кавказскую группу V, содержащую 8 станций на Каспийском море, где силы тяжести значительно меньше теоретического значения.

Здесь мы находим, на Жилом Острове и в Баку, наибольшую отрицательную аномалию, доходящую до 0.120 см/сек^2 (эти аномалии соответствуют 1-й гипотезе Гайфорда — 113.7 км). От этих станций область отрицательной аномалии распространяется во все стороны. На юге отрицательная аномалия внезапно кончается только между станцией Алат (-0.077) и станцией Ленкорань, лежащей всего на 130 км к югу от Алата, и где уже имеется положительная аномалия $+0.085$. К востоку (область отрицательной аномалии не распространяется) на восточном берегу Каспийского моря, против Жилого Острова, находим аномалию $+0.055$. На север отрицательная аномалия простирается к Петровску (-0.031), но уже для Астрахани имеем положительную аномалию $+0.048$. Небольшая отрицательная аномалия имеется также и к западу от Жилого Острова и Баку, внутри страны, как в Шемахе -0.007 и в Грозном, на Сев. Кавказе, -0.017 см/сек^2 .

Следовательно, отрицательная аномалия силы тяжести и дефект масс у Каспийского моря есть явление чисто местное, занимающее весьма ограниченную область.

В остальные группы входят следующие станции (для Кавказа): в группу I — 13 станций Кавказского горного хребта, II — 17 станций Армении, III — 12 станций между главным хребтом и Арменией, IV — 12 станций Сев. Кавказа и VI — 9 станций на Черном море.

Так как горные станции почти всюду, при всяком способе редукции, дают средние значения аномалий, отличные от таких же значений для станций, расположенных в более низких местах, то интересно выразить в виде линейной функции зависимость этих аномалий от высоты. Такие формулы, соответствующие 9 различным способам редукций, выведены Гейсканеном для кавказских станций.

Для редукции „в свободном воздухе“, редукции Буге и чисто-топографической редукции средние отклонения отдельных аномалий от их среднего значения (группового) значительно больше, чем для других способов редукции, при которых принимается во внимание подземная компенсация. Линейная зависимость этих аномалий от высоты так же гораздо более значительна, чем для редукций изостатических.

Резюмировать вышесказанное мы можем следующим образом: редукции без предположения об изостатической компенсации не соответствуют ходу изменения силы тяжести на Кавказе.

Обе редукции по Эри (согласно 1-му и 2-му предположениям) дают несколько лучшие согласия с наблюдениями, чем какая-либо другая редукция; так, средние отклонения отдельных аномалий от их среднего значения будут значительно меньше, чем при других способах редукции, а член, зависящий от высоты наблюдения, при 1-м предположении исчезает совершенно и очень мал при 2-м предположении.

Из обоих предположений Эри первое дает менее хорошее согласие с наблюдениями, чем второе. Хотя высоты Кавказа и Армении колеблются между 0 и 2000 м, толщина земной коры, по 1-му предположению Эри, составляет 77—104 км.

Из всего вышесказанного мы можем заключить: для объяснения изменений силы тяжести на Кавказе необходимо принять во внимание существование изостатической компенсации. Топографо-изостатическая редукция по Эри, с толщиной земной коры в 77—104 км, лучше всего отвечает наблюдениям. Если бы мы хотели получить столь хорошее совпадение, пользуясь редукцией по Гайфорду, то нужно было бы оперировать с глубинами изостазии около 250 км или предположить существование на Кавказе „областной“ (regionale) компенсации. Апшеронский полуостров и его окрестности суть области с местными дефектами масс.

б) Первая группа европейских станций, изученная Гейсканеном, заключает в себе 11 станций Гарца. Гейсканен задался целью проверить общепринятое мнение о том, что эти горы изостатически не компенсированы. Все 11 станций были выбраны так, что равномерной сетью покрыли всю область Гарца. Чтобы решить этот вопрос, необходимо было, воспользовавшись редукцией Гайфорда или Эри, считать не компенсированной только область Гарца и полученные при таком условии аномалии сравнить с упомянутыми аномалиями Гайфорда или Эри.

Средние значения аномалии в Гарце и его окрестностях показывают между собой одинаково хорошее совпадение как при предположении, что Гарц компенсирован, так и при предположении, что он не компенсирован. Среднее отклонение аномалий от среднего значения и зависимость аномалии от высоты наблюдения, при предположении о некомпенсированности Гарца, немного меньше, чем при обычной редукции по Гайфорду, но разница здесь так мала, что на основании этого материала нельзя ничего решить окончательно, тем более, что редукция по Эри так же хорошо согласуется с наблюдениями, как и редукция при предположении о некомпенсированности Гарца.

На основании всех своих вычислений Гейсканен приходит к следующему выводу: сила тяжести в Гарце, после введения изостатической редукции, нормальна и Гарц не представляет какого-либо особого исключения из общего учения об изостазии.

Хотя геологические данные указывают на то, что Гарц не компенсирован, но исследования силы тяжести этого не подтверждают.

Обработка 8 станций в Исполинских горах, вошедших во вторую группу европейских станций, показывает, совершенно несомненно, что эти горы вполне компенсированы, так что утверждение Гельмерта о неполной компенсации Исполинских гор не подтвердилось. Возможно даже считать, что в Исполинских горах имеет место скорее избыточная компенсация, чем недостаток ее.

Переходим к станциям в области краевого опускания Альп. Геологи утверждают, что не только цепи гор, но и области их краевых опусканий компенсированы (Коссмат). Таким образом, в области краевых опусканий аномалия отрицательна, а в области гор — положительна (относительно окрестностей). Для рассмотрения этого вопроса было изучено распределение силы тяжести, кроме краевого опускания Альп, еще в тех же областях Карпат и Кавказа.

Десять редуцированных станций были выбраны вдоль краевого опускания Альп от Вены ($16^{\circ}21'5$) до Фрейбурга ($7^{\circ}50'9$). Средние значения аномалий для этих станций, при редукции по Гайфорду, будут: $+0.025$ и $+0.026$, а при редукции по Эри: $+0.030$, -0.031 и $+0.032$ *с.и/сек²*.

Исследования силы тяжести в области краевого опускания Альп и в самих Альпах заставляют заключить, что аномалии, вычисленные по Гайфорду и Эри для краевого опускания, будут положительны по отношению к самому хребту, так что упомянутое выше утверждение геологов не подтверждается измерениями силы тяжести в окрестностях Альп и здесь скорее имеется недостаток компенсации, чем ее избыток.

Изучение силы тяжести в Карпатах и на Кавказе, а также и их окрестностях, показало, что вообще в области краевых опусканий горных цепей избытка компенсации не наблюдается, напротив, изменение силы тяжести здесь нормально и вполне следует изостатической компенсации.

Из других станций, редуцированных Гейсканеном, первую группу составляют станции Италии. Эти станции показывают, что сила тяжести здесь увеличена. Все станции имеют положительную аномалию большую $+0.060$ см/сек², а на станции Бриндизи аномалия доходит даже до $+0.110$ см/сек².

Все эти станции сосредоточены в очень незначительной области. Другие станции на Средиземном море и его островах — в Алжире, на Сардинии, Корсике и в Далмации — показывают, что вся область от Испании до Далмации есть область избытка силы тяжести. Таким образом, под Средиземным морем имеет место положительная перекompенсация. Возможно, что недостаток силы тяжести во Франции, Испании и внутри Алжира стоит в связи с избытком масс под Средиземным морем.

Редуцированная Бауи станция Sörgvaagen в Норвегии с ее аномалией $+0.134$ дает не совсем правильное представление о ходе тяжести в Скандинавии, так как уже в 50 км от этой станции находится аномалия -0.050 . Во всей Скандинавии аномалия вообще отрицательна, что стоит в связи с фактом повышения континента ⁴⁾.

Обработка 11 станций на Шпицбергене показала, что наблюдаемая там сила тяжести нормальна и отвечает учению об изостазии. Эти станции представляют большой интерес в связи с их значительной широтой.

4. Сравнение гипотезы Гайфорда с гипотезой Эри.

Выше мы уже имели случай убедиться, что для Кавказа наблюдаемые значения силы тяжести несколько лучше отвечают гипотезе Эри, чем гипотезе Гайфорда, предполагающей, что глубина поверхности изостазии $= 185$ км. Гейсканен задался целью проверить, на более обширном материале, какая из этих гипотез лучше отвечает действительности.

Гипотеза Пратта — Гайфорда довольно хорошо объясняет изменения силы тяжести в Соединенных Штатах. Гейсканен вычислил те же станции и по гипотезе Эри. Редуцированные Бауи 56 горных станций в Соединенных Штатах были обработаны Гейсканеном согласно 1, 2 и 4 предположениям Эри.

Средние значения аномалий этих станций показывают, что редукция по Гайфорду (113.7 км) и первая редукция по Эри дают одинаково хорошие результаты, а две другие редукции по Эри дают результаты несколько худшие.

Линейная зависимость аномалий от высоты точки наблюдения будет наименьшей для двух первых редукций по Эри, так что в этом смысле упомянутые редукции будут лучше. Но линейный член при всех этих способах редукции так мал, что этот критерий не может иметь очень большого значения.

Средние значения аномалий горных станций, станций на берегу океана и станций равнинных заставляют Гейсканена заключить, что гипотеза Эри, с приближенной толщиной земной коры в 50 км (соответствующей уровню моря) объясняет несколько лучше ход изменения силы тяжести в Соединенных Штатах, чем любое предположение Гайфорда — Пратта.

Далее, Гейсканен производил проверку гипотезы Эри на следующих станциях: 16 станциях в Альпах и 10 — в области краевых опусканий этих гор. Так как

⁴⁾ Во время печатания настоящей статьи была получена новая работа Гейсканена, посвященная более подробному изучению силы тяжести в Норвегии (W. Heiskanen. *Schwerkraft und isostatisch Kompensation in Norwegen*. Veröff. des Finn. Geodet. Inst. № 5, 1926). Автором были подвергнуты топографо-изостатической обработке 29 станций на юге и 17 станций на севере Норвегии по тому же плану, как и в реферируемой работе, при чем вполне подтвердились приводимые здесь результаты.

6 станций в Австрийских Альпах имели несколько иной характер, чем остальные 10, то они были выделены в особую группу.

Глубина изостатической поверхности в 107 км, по гипотезе Гайфорда, и толщина земной коры в 41 км, по Эри, вполне достаточны для объяснения аномалий силы тяжести в Альпах и в области их краевых опусканий.

Если бы мы хотели объяснить отрицательную аномалию других 6 станций в Австрийских Альпах при помощи изостатической компенсации, то должны бы были оперировать с меньшими глубинами изостазии и меньшими толщинами земной коры; так, глубине изостазии в 85.3 км соответствуют аномалии: $+0.003$, $+0.007$, -0.002 , $+0.013$, $+0.37$, а 4-му предположению Эри: $+0.017$, -0.013 , $+0.07$, -0.002 , $+0.022$ и $+0.041$ см/сек².

Но возможно, что под Австрийскими Альпами имеется небольшая область недостатка масс (между 10° и 13° долготы и шириною в 2° по широте). Станции Spittal и Nohenmantel (долготы: 13°5 и 15°2), с их большой положительной аномалией, показывают, что эти дефекты масс постепенно переходят в Венгрию — в область избыточной компенсации.

Средние уклонения аномалий (от их средней величины) в Исполинских горах и Гарце, вычисленные по гипотезе Эри, оказываются несколько меньше соответствующих величин, вычисленных по гипотезе Гайфорда. Но эти области слишком малы и не могут дать исчерпывающего решения вопроса о преимуществах той или иной гипотезы.

Свои вычисления Гейсканен резюмирует так: во всех исследованных местах: на Кавказе, в Америке и в Альпах, гипотеза Эри так же хорошо, или даже несколько лучше объясняет ход изменения силы тяжести, чем уточненная Гайфордом гипотеза Пратта, и, кроме того, глубина компенсации — по гипотезе Пратта, — а также толщина земной коры — по гипотезе Эри — не на всем земном шаре имеют одинаковую величину.

Эти выводы противоречат мнению, высказанному Гельмертом, который утверждал, что гипотеза Эри не может объяснить ход изменения силы тяжести, имеющий место на высоких горах.

На океанических островах, как известно, получаются большие положительные аномалии силы тяжести, если принять гипотезу Гайфорда с глубиной изостазии в 113.7 км. Так, Баун нашел на станции St. Georges (на Бермудских о-вах) аномалию $+0.080$, на Jamestown (о. Св. Елены) $+0.120$ и на Гонолулу (о. Гавайи) $+0.075$. Если же отказаться от глубины 113.7 км и оперировать с глубиной 156.3 км, то для этих станций получим аномалии: -0.008 , $+0.060$ и $+0.022$ см/сек². Приблизительно такие же результаты мы можем получить, пользуясь гипотезой Эри, если только подберем подходящие толщины земной коры и разности плотностей между слоями Sal и Sima.

Гейсканен отсюда заключает, что океанические острова не являются абсолютно перекомпенсированными, но аномалии на них объясняются выбором той или другой гипотезы.

Из приводимой Гейсканеном таблицы видно, что 2-я и 3-я гипотезы Эри, которые отличаются друг от друга только тем, что по 2-й гипотезе разность плотностей между земной корой и слоем лавы $=0.3$, а по третьей $=0.6$, приводят почти к одинаковым результатам, так что толщина земной коры, соответствующая уровню моря, имеет гораздо большее значение, чем разность плотностей.

5. Вывод формулы для нормального распределения силы тяжести и сжатие земли.

При помощи изостатически-редуцированных станций Гейсканеном была выведена новая формула для распределения силы тяжести на земном шаре, и из этой формулы определено сжатие земли.

Так как изостатически-редуцированные станции, особенно в Европе, расположены в большинстве случаев на горных плато и в горах, то некоторое количество береговых и равнинных станций было редуцировано автором сокращенным образом и эти станции были прибавлены к вышеупомянутым станциям, подвергшимся точной редукции.

Станции на равнинах, как, например, в Сев. Германии, России, Финляндии и пр., где местность довольно ровная, можно легко редуцировать. Местная редукция здесь обычно бывает настолько мала, что ею можно вполне пренебречь, а чисто топографическая редукция, которая прибавляется к редукции Буге для получения топографо-изостатической редукции, в равнинных странах легко определяется; она изменяется так мало от точки к точке, что нуждается в определении только некоторых станций, тогда как большинство станций может быть определено интерполяцией.

Если, напротив, станции лежат вблизи гор или глубокого моря, как станции Норвегии, Франции, Англии, Пиринейского полуострова, на морях Средиземном и Красном, то изостатическая редукция должна точно определяться для каждой станции.

Все редукции были вычислены Гейсканеном по гипотезе Гайфорда при предположении глубины изостазии в 113.7 км.

Так как ошибки измерения и ошибки редукции на различных станциях часто не одинаковы, то и полученные аномалии могли содержать различные погрешности; поэтому не все станции принимались во внимание при выводе формулы для силы тяжести и не все наблюдения брались с одинаковым весом. Так, например, Германия, Дания и Венгрия, с их многочисленными, хорошо определенными станциями, могли совершенно заглушать влияние других, хуже изученных областей.

Чтобы малые области с большим числом станций перенести в вычисление с не очень большим весом, все станции, лежащие в области, ограниченной 1° — по широте и 1° — по долготе, соединялись в одну станцию, с весом = 1, а за координаты участка брались координаты середины его.

Всего Гейсканеном было выведено 6 формул для распределения силы тяжести: 1) формула 1-я — для европейских и кавказских станций и одной алжирской (всего из 283 отдельных областей), 2) 2-я — из всех перечисленных станций, а также станций на берегах Африки и берегах Красного моря (всего из 335 областей), 3) 3-я — из американских станций (234 области), 4) 4-я — из азиатских станций (87 областей) и 5-я и 6-я — из всех станций Европы, Африки, Америки и Азии (всего из 656 областей). При выводе 6-й формулы земля принималась за трехосный эллипсоид, 5-й — за двухосный эллипсоид.

Из этих вычислений видно, что коэффициенты формулы (1) и (2), полученные из европейских и африканских станций, значительно отличаются от коэффициентов формул (3) и (4) — для Америки и Азии. Это значит, что в Европе и Африке на тех же широтах господствует другая тяжесть, чем в Америке и Азии, так что распределение силы тяжести зависит не только от географической широты, но и от долготы.

Чтобы определить зависимость силы тяжести от географической долготы, последняя формула была выведена из всех станций, при чем земля считалась за трехосный эллипсоид. Эта формула имеет следующий вид:

$$\gamma_0 = 978.052 \left[1 + 0.005285 \sin^2 \varphi - 0.000007 \cdot \sin^2 2\varphi + 0.000027 \cos^2 \varphi \cdot \cos(\lambda - 18^\circ) \right],$$

$\pm 3 \qquad \qquad \qquad \pm 6 \qquad \qquad \qquad \pm 5$

где φ обозначает географическую широту, а λ — географическую долготу.

Таким образом, если считать землю трехосным эллипсоидом, то большая ось экватора должна проходить на 18° к востоку от Гринвича, а меньшая ось экватора — на 72° к западу. Разность этих осей будет: 690 ± 75 м.

Формула (5) выведена из всех станций при предположении, что сила тяжести от долготы не зависит, поэтому сумма квадратов всех 656 аномалий по этой формуле

$= 635\,300$, а по формуле (6) $= 554\,300$, так что последняя формула дает меньшие аномалии.

Величины $\left(\frac{1}{f}\right)$, обратные сжатию земли, соответствующие 5 первым формулам, выражаются так:

$$\frac{1}{f} = \begin{matrix} 293.8, & 294.5, & 299.8, & 299.2, & 297.4 \\ \pm 1.1 & \pm 0.7 & \pm 1.1 & \pm 1.4 & \pm 0.5 \end{matrix}$$

а по формуле (6) среднее значение $\frac{1}{f} = 296.7$, при чем наименьшее и наибольшее значения будут: 294.3 и 299.0 (соответственно обоим осям экватора).
 $\pm 0.6 \quad \pm 0.6$

Для сравнения ниже приведены ранее выведенные формулы нормального расчленения силы тяжести на земной поверхности.

$$1. \gamma_0 = 978.030 (1 + 0.005\,302 \sin^2 \varphi - 0.000\,007 \sin^2 2\varphi)$$

$$2. \gamma_0 = 978.052 \left[\begin{matrix} 1 + 0.005\,285 \sin^2 \varphi - 0.000\,007 \sin^2 2\varphi + 0.000\,018 \cos^2 \varphi \cdot \cos^2 (\lambda + 17) \\ \pm 3 \qquad \qquad \qquad \pm 5 \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \pm 4 \end{matrix} \right]$$

$$3. \gamma_0 = 978.039 \left(\begin{matrix} 1 + 0.005\,294 \sin^2 \varphi - 0.000\,007 \sin^2 2\varphi \\ \pm 4 \qquad \qquad \qquad \pm 12 \end{matrix} \right).$$

Первая из этих формул есть известная формула Гельмерта, выведенная им в 1901 г. (этой формулой пользовался в своей работе Боррас).

Вторая формула также выведена Гельмертом — в 1915 г. Он получил эту формулу при предположении, что земля является трехосным эллипсоидом; при чем земная поверхность была разделена на 410 частей, но Гельмертом не принимались во внимание станции, лежащие вблизи гор, и станции береговые, расположенные около больших глубин. Станции были редуцированы только за высоту.

Третья формула — Бауи — выведена из 252 топографо-изостатически редуцированных станций (или групп станций), лежащих большей частью в Америке, поверхность которой была разделена на 11 зон, каждая в 3° по широте.

Хотя Гельмерт вывел свою вторую формулу из равнинных станций, редуцированных только за высоту, эта формула почти совершенно совпадает с 6-й формулой Гейсканена, полученной как из равнинных, так и из горных и береговых станций, подвергшихся топографо-изостатической редукции. Два первых члена в обеих формулах совершенно одинаковы и только третий член различен. Числовой коэффициент этого члена, по Гельмерту, $= 15 \cdot 10^{-6}$, а по формуле Гейсканена $= 27 \cdot 10^{-6}$. Кроме того, большая ось экватора, по Гельмерту, лежит на 17° к западу, а по Гейсканену — на 18° к востоку от Гринвича. Что эти члены так сильно отличаются друг от друга, объясняется, главным образом, тем, что Гельмерт не принял во внимание станции на Кавказе, Средиземном море и Красном море, введенные в вычисления Гейсканеном.

Формула Бауи менее точна, так как он использовал только станции, лежащие внутри 33 -градусной зоны (по широте), так что определение члена $\sin^2 \varphi$ не надежно. Эта формула не соответствует изменению силы тяжести в Европе.

Обратные величины сжатия земли $\frac{1}{f}$, согласно первой и второй формулам Гельмерта, будут равны: 293.2 ± 9.5 и 296.7 ± 0.4 , а по формуле Бауи: 297.4 ± 1.0 .

Насколько хорошо последняя формула Гельмерта выражает ход изменения силы тяжести на всей земной поверхности, судить трудно, так как изученные области

покрывают только незначительную часть всего земного шара. Если бы иметь достаточное количество стаций, редуцированных изостатически, в Южной Америке, Африке, Азии, Австралии и на океанах, то можно было бы вывести вполне надежную формулу, но это дело будущего.

Для Европы и ее ближайших окрестностей была вычерчена Гейсканеном карта аномалий, соответствующих редукции Гайфорда (113.7 км). Аномалии выражены в единицах 0.001 см/сек^2 .

На этой карте поражает факт удивительно правильного распределения аномалий. Если мы сравним эту карту с картой Коссмата, где даны аномалии Буге, то заметим, что, во-первых, абсолютные величины аномалий будут значительно меньше и, во-вторых, распределены они будут более правильно при предположении изостазии, чем без этой гипотезы. Например, почти совершенно исчезла сильная отрицательная аномалия в Альпах и Карпатах, а положительная аномалия на Средиземном море сделалась значительно меньше.

Наблюдаются большие дефекты масс: в Скандинавии, Франции, Испании, Алжире, Галиции и в области Каспийского моря, а значительные избытки масс имеются: в Германии, Богемии, Венгрии и на Средиземном море.

Весьма замечательна сильная положительная аномалия (+125 и +70) на острове Лафотен, вблизи области отрицательной аномалии, имеющейся на Скандинавском полуострове.

Отрицательная аномалия — в Альпах — и положительная аномалия — на Кавказе — будут значительно меньше, если в Альпах будем оперировать с меньшими, а на Кавказе — с большими глубинами компенсации, как уже и указывалось выше.
