

СТАТИЧЕСКИЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЙ УСКОРЕНИЯ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ

M. Поликарпов, Москва

Измерения силы тяжести на земной поверхности имеют большое значение как для решения основной задачи высшей геодезии — определения формы Земли, так и для решения геофизических вопросов, относящихся к теории изостазии *, строению верхних слоев земной коры и пр. Большинство определений силы тяжести, произведенных на земной поверхности до настоящего времени, были сделаны динамическим методом — при помощи маятников. Этот метод получил широкое распространение при определении силы тяжести на суше, а также, по предложению Венинг Мейнца **, и на водной поверхности. Мейнц качал маятники на подводных лодках, находящихся в погруженном состоянии. Маятниковый метод позволяет производить измерения силы тяжести с точностью до нескольких единиц третьего десятичного знака, но отличается большой громоздкостью и требует значительного времени.

Неоднократно делались попытки применить для измерения тяжести методы статические. К числу таких попыток относятся работы Геккера и Бриггса.

Геккер *** (в 1901—1908 гг.) во время плавания по

* Прей. Теория изостазии, ее развитие и результаты, „Успехи физ. наук“, 6, вып. 1.

** М. Поликарпов, Об изостазии и силе тяжести. „Успехи физ. наук“, 6, вып. 4—5.

*** Сборник рефератов и переводных статей по геодезическим вопросам. Приложение к XIX и XX частям „Записок. Военно-топографического отдела“.

Атлантическому, Индийскому и Тихому океанам и Черному морю применял способ, указанный норвежцем Моном, основанный на определении давления атмосферы одновременно двумя методами: обычным ртутным барометром и из наблюдений точки кипения жидкости — гипсотермометрами. Первый способ дает результат, зависящий от величины силы тяжести в данном месте, второй от него не зависит; из сравнения этих данных может быть получена искомая величина силы тяжести. Все попытки Геккера увеличить точность метода однако успехом не увенчались; точность этих измерений силы тяжести на море осталась значительно ниже соответствующих определений на суше. Правда, это обстоятельство не помешало известному геодезисту Гельмерту сделать вывод на основании наблюдений Геккера о незначительности отклонений силы тяжести на океанах от нормальных величин, измеренных на континентах. Позднейшие попытки улучшения метода Геккера не дали значительного увеличения точности, но зато значительно усложнили производство самих наблюдений. Это вполне подтверждается недавно опубликованными опытами Дюффильда *.

Бриггс **, по идее Маскара ***, предложил измерять перемены силы тяжести высотой столба ртути, уравновешивающего давление одной и той же массы газа при постоянной температуре. Для осуществления своей идеи Маскар построил прибор вроде сифонного барометра, короткое закрытое колено которого содержало углекислый газ под давлением достаточным, чтобы уравновесить столб ртути в 1 м. Главные трудности, по мнению Маскара, лежали вне возможности точного отсчета уровня ртути и в определении температуры. Приняв во внимание все трудности, которые были отмечены Маскаром, Бриггс соответственно изменил прибор, разобщив его совершенно от воздуха, и применил для поддержания постоянной темпера-

* W. G. Duffield, Monthly Notic. R. Astr. Soc. Geophys. Suppl., Vol. I № 5, 1924.

** Proc. of the Nat. Ac. of Sc.-U. S. A. Vol. 2, № 7, 1916.

*** C. R. 95, 1909.

туры тающий лед. Газ, заключенный в приборе, автоматически приводился к постоянному объему,* а так как температура при этом постоянна, то измерения делались при постоянном давлении. Самое измерение сводилось к отсчету положения верхнего конца столба ртути. Наблюдения с этим прибором велись на корабле на пути из Сиднея в Австралии до Сан-Франциско через Веллингтон в Новой Зеландии и второй раз по пути из Нью-Йорка до Сан-Франциско через Панаму. Сопоставляя полученные Бриггсом результаты с измерениями Геккера (исправленными за эффект движения корабля так называемый „эффект Этвёша“) приходится отдать предпочтение первому методу.

В самое последнее время немецкий геофизик Хаальк^{*} видоизменил и значительно улучшил метод Бриггса и разработал вполне рациональный способ измерения силы тяжести. Уже предварительные опыты с прибором Хаалька дали настолько многообещающие результаты, что можно надеяться, что в самое ближайшее время сложная задача статического определения силы тяжести, получит свое полное и точное разрешение.

Идея Хаалька состоит в следующем.

Если столб ртути высотою h уравновешивается давлением некоторой замкнутой массы газа, занимающего объем v , то тогда

$$p = h\sigma g,$$

где g — ускорение силы тяжести, σ — плотность ртути. Дифференциальные изменения запишутся следующим образом:

$$\frac{dp}{p} = -\frac{dv}{v} + \alpha dt = \frac{dh}{h} + \frac{d\sigma}{\sigma} + \frac{dg}{g}, \quad (1)$$

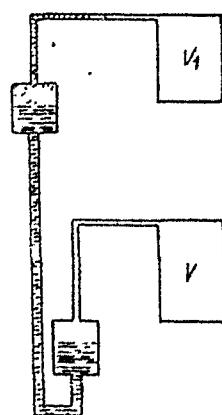
где α — коэффициент расширения газа, dt — изменение температуры.

Из этого уравнения следует, что для того, чтобы определить изменение силы тяжести с точностью до 1 миллигала

* H. Haalek, Ein statischer Schwerkraftmesser. Z. Geophys. VII, Heft 1/2, 1931.

$(0,001 \frac{\text{см}}{\text{сек}^2})$, необходимо измерить величину $\frac{dh}{h}$ с точностью до 10^{-6} .

Для того чтобы достигнуть этого, можно расширить содержащий ртуть сосуд с одного или с обоих концов и тем создать возможно большую поверхность ртути F (рис. 1). На ртуть с обоих концов наливается легкая жидкость, заключенная в капилляре с сечением q , так что изменение высоты dh уровней ртути вызовет смещение мениска жидкости на $\frac{F}{q} dh$.



Этот способ получения необходимых увеличений был применен в 1876 г. Сименсом при его опытах с так называемым ботометром. Решение вопроса о чувствительности прибора не представляет больших трудностей, так как чувствительность его зависит только от размеров прибора и может достигнуть любой величины.

Рис. 1. Рассматривая влияние изменений температуры, мы на основании уравнения (1) приходим к заключению, что изменение температуры на

$$dt = \left(0,000293 + 293 \frac{dv}{v} \right) {}^\circ \text{C}$$

(приблизительно порядка $0,001 {}^\circ \text{C}$) вызывает такое же перемещение мениска, как и изменение силы тяжести на 1 миллигаль. Это обстоятельство является главной причиной трудности задачи; может показаться с первого взгляда, что оно технически неустранимо, так как достижение такого постоянства температуры невозможно (вследствие трудности измерения температуры с требуемой точностью и сложности построения соответствующих температурных компенсаторов). Затруднения увеличиваются еще тем, что большое влияние имеют не только изменения температуры, но и температурные неравенства внутри объема ртути, от которых избавиться очень трудно, и они вызывают

чрезвычайно неравномерные смещения мениска жидкости; особенно важен факт невозможности измерить с нужной точностью действительную температуру газа v . Таким образом вопрос о применении барометрического принципа для статического измерения силы тяжести является главным образом задачей тепловой.

Теоретические соображения приводят к заключению, что эта задача может быть разрешена способом компенсации следующим образом: объем v должен быть сделан возможно большим и должен быть разделен на возможно большее число отдельных частей; то же самое относится и к объему v_1 , причем части объемов v и v_1 должны чередоваться между собой. Это достигается тем, что сосуды v и v_1 имеют вид змеевиков, отдельные обороты которых чередуются друг с другом, при этом материалы и размеры сосудов должны быть выбраны так, чтобы температурные влияния компенсировались. Эта температурная компенсация будет происходить между чередующимися друг с другом отдельными частями пространства v и v_1 . Отсюда вытекают следующие выгоды: во-первых, возмущения, вызванные неравенствами температур, будут не так заметны, так как температуры отдельных частей пространств будут быстро выравниваться и температурное равновесие будет лучше сохраняться; во-вторых, имеющие все-таки место ошибки должны быть отнесены к общему объему. Затем в измерения входит только средняя величина всех действий отдельных частей, и получается тем большая надежность температурной компенсации, чем выше большее число отдельных элементов. Таким образом надежность компенсации температур увеличивается с увеличением объема инструмента.

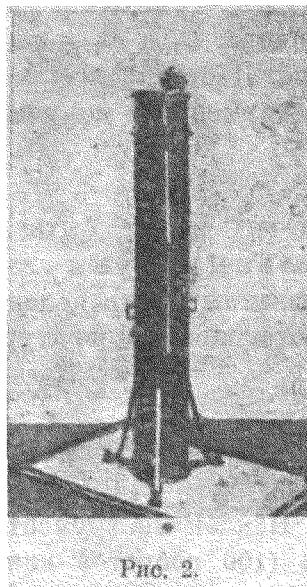


Рис. 2.

На рис. 2 дан общий вид первого из построенных инструментов, с которым производились практические измерения; высота его около 160 см, общий вес 40—45 кг.

Основное уравнение для расчета напишется так:

$$dg = C_1 (dx' - dx) + C_2 dt, \quad (2)$$

где dx' — смещение нижнего, а dx — смещение верхнего мениска, C_1 и C_2 — постоянные, задаваемые размерами прибора. Постоянная C_1 может быть вычислена из размеров инструмента и получилась равной

$$C_1 = 0,0175 \text{ до } 0,0187.$$

Но она может быть просто получена и экспериментальным путем из наблюдений смещения менисков, вызванных определенным наклоном инструмента; при постоянной температуре:

$$dg = g (\cos \delta - 1) = C_1 (dx' - dx), \quad (3)$$

где δ — угол, на который отклонен инструмент от вертикали.

Наклон инструмента производится установочными винтами (100 оборотов винта соответствуют $82'$ угла наклона).

№ винта	δ	x'	x	dx'	dx	$dx' - dx$
I	0	8,4	1,5			
	+ 82'	1,5	8,25	- 7,0	+ 6,8	- 13,8
	0	8,5	1,35			
	- 82'	0,2	9,5	- 8,4	+ 8,2	- 16,6
II	0	8,7	1,2			
	+ 82'	1,9	8,05	- 7,0	+ 6,95	- 13,95
	0	8,9	1,1			
	- 82'	0,5	9,5	- 8,4	+ 8,35	- 16,75
III	0	8,9	1,2			
	+ 82'	1,7	8,2	- 7,55	+ 7,45	- 15,0
	0	9,4	0,6			
	- 82'	1,35	8,6	- 8,1	+ 8,0	- 16,1
	0	9,5	0,6			

Из вышеписанных уравнений для достаточно малых наклонов следует:

$$C_1 = \frac{g\delta^2}{2(dx' - dx)}. \quad (3a)$$

Вычисление C_1 должно производиться следующим образом. Будем обозначать δ_1 — наклон в одну сторону, δ_2 — в другую, соответствующие разности пусть будут $(dx' - dx)_1$ и $(dx' - dx)_2$, тогда из уравнения (3а):

$$\delta_1 = \delta_2 \sqrt{\frac{(dx' - dx)_1}{(dx' - dx)_2}},$$

кроме того $\delta_1 + \delta_2 = 164$.

В одном из опытов при заданных значениях δ_1 и δ_2

	δ_1	δ_2
I	78',2	85',8
II	78',2	85',8
III	80',8	83',2

получились следующие значения C_1 из уравнения (3а):

I	0,0184	0,0185
II	0,0182	0,0183
III	0,0181	0,0186

Среднее $C_1 = 0,01835 \pm 0,00008$.

Таким образом экспериментальное определение цены деления шкалы прибора хорошо совпадает со значением, вычисленным из размеров аппарата. Перемещение мениска на 1 мм соответствует изменению силы тяжести на 1,83 миллигала.

Наибольшую неизменность в измерении вносит температурный член C_2dx . Если совершенно не вводить температурной компенсации, то C_2 приблизительно равно 3—4, т. е. изменение температуры на 1° Ц соответствует изменению силы тяжести на 3000—4000 миллигад; полная компенсация должна сделать $C_2 = 0$. Очень трудно ввести полную температурную компенсацию или вполне избежать температурных неравенств в приборе. Однако следующий ряд опытов дает многообещающие результаты.

Инструмент был установлен в большом зале Геодезического института (в Потсдаме) без особой температурной защиты и оставался там целую неделю, во время которой производились непрерывные отсчеты. Полученные кривые (рис. 3) дают ход отсчетов прибора (в миллигалах) в зависимости от температуры окружающего воздуха (пунктир); конечно эти температуры не совпадают с истинной температурой в приборе.

Разность ночных и дневных температур была довольно значительной; в утренние часы происходила резкая перемена температур, как это видно из кривой. Первые измерения 25 августа выпали, так как инструмент был только что установлен;

измерения 26 августа около 18 час. также выпали, так как инструмент был сверху открыт. Последующие измерения показали, что отсчеты в очень незначительной степени зависят от температуры; отклонения от средних значений малы, особенно если принять во внимание, что без температурной компенсации изменению температуры на 1° соответствует изменение тяжести на 3 000—4 000 миллигала. В исследуемом инструменте величина колебаний все-таки довольно велика и равняется 30—40 миллигалам, но следует заметить, что при увеличении температуры отсчет уменьшается, тогда как при отсутствии температурной компенсации должно было бы наблюдаться обратное явление, следовательно в настоящее время прибор уже перекомпенсирован.

Фактор C_2 определяется экспериментально и член $C_2 dt$ является поправочным членом. Введение этой поправки наталкивается на затруднения, так как при каждом изменении температуры возникают иерархии, остающиеся вне

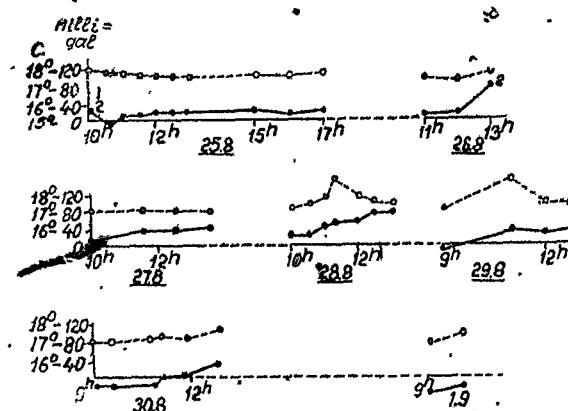


Рис. 3.

контроля, и мы точно не знаем, какую температуру вводить в вычисления и какова истинная температура отдельных частей объемов v_1 и v_2 . Уменьшить температурный член $C_2 dt$ было бы возможно, поместив прибор в пространство в котором поддерживалась бы постоянная температура при помощи терморегулятора, допускающего колебания в пределах $0,25 - 0,1^\circ$.

Дальше производился ряд опытов с целью выяснить влияние переноски инструмента с места на место. Прибор переставлялся и переносился вверх и вниз по лестницам института. При этом в капиллярах вследствие сотрясения образовывались пузырьки, которые уничтожались с помощью особого приспособления. При этих опытах с переноской разность отсчетов редко изменялась больше чем на 10 миллигаль. Пример такого ряда измерений с переноской, после которой прибор опять устанавливался на ту же точку, приведен в следующей таблице (опыт 29 сентября 1930 г.).

x'	x''	dx'	dx	$18,8(dx' - dx)$ в. миллигалах
4,25	5,75	0	0	0
4,35	5,65	- 0,1	+ 0,1	- 4
4,4	5,6	- 0,15	+ 0,15	- 5
4,1	5,9	+ 0,15	- 0,15	+ 5
4,1	5,9	+ 0,15	- 0,15	+ 5
4,1	5,9	+ 0,15	- 0,15	+ 5
4,0	6,0	+ 0,25	- 0,25	+ 9
4,0	6,0	+ 0,25	- 0,25	+ 9
4,0	6,0	+ 0,25	- 0,25	+ 9
4,1	6,0	+ 0,15	- 0,25	+ 7

Среднее + 4

Максимальное отклонение достигало 9 миллигаль, средняя ошибка отдельного наблюдения в этом ряду ± 5 миллигаль. Только если на концах капилляра во время отсчета имелся пузырек, то получалось слишком малое значение. Эта неточность отсчета может быть отчасти объяснена влиянием температуры, так как отсутствовало какое-либо защитное приспособление от влияния температуры, частью

смачиванием стеклянных стенок, так как при стекании жидкости часть ее оставалась на стенках. С отрясения не ухудшали отсчета, даже наоборот, помогали точности отсчета мениска. Каждое измерение отнимало самое большое 2—5 мин., и отсчитанные величины должны были множиться на 0,0183, так что результат получался сразу и с инструментом мог бы работать даже не специалист.

Влияние наклонов очень мало, так как угол наклона прибора входит в вычисления в виде \cos . Наклон аппарата на 5° от вертикали дает ошибку в 1 миллигал. Следует избегать наклонов больших 20—25°, так как тогда жидкость может через капилляр перетечь в пространство v_1 ; еще более сильные наклоны могут вызвать разрушения самого прибора.

Общие результаты этих опытов указывают на возможность определения силы тяжести с точностью до 10 миллигала. Хотя инструмент еще совершенно неприспособлен для практических измерений в поле, однако значительные изменения силы тяжести могут быть измерены уже сейчас. Производились измерения разности силы тяжести между верхней и нижней остановками лифта в башне радиотелеграфа.

Разность высот была 120 м, так что сила тяжести вверху была на 37 миллигала меньше, чем внизу. Чтобы избавиться от помех, вызванных ездой, первые опыты производились в полночь. Условия наблюдения в это время года были совершенно неблагоприятны, так как основное условие хорошей работы инструмента — постоянство температуры — было не выполнено. Опыты велись 2 октября (в них принимали участие Бергер и Юнг) при следующих температурах:

в инструментальном зале Геодезического института	13°,2 Ц
при отъезде из Потсдама (в авто)	9°,0
приезд на башню беспроволочного телеграфа	
(в авто)	3°,0
в лифте	8°,0

В лифте температура во время измерений поднялась благодаря присутствию большого числа людей до 16° Ц и потом опять упала до 14°,5 Ц. Конечно при таких условиях

целья было ожидать большой точности измерений. На рис. 4 представлены графически результаты измерений; время наблюдения T отложено по оси абсцисс, отсчеты $x' - x$ на ординатах; точками обозначены отсчеты внизу, кружками — вверху.

Измерения показали, что сила тяжести внизу башни значительно больше, чем наверху. Величина этой разности довольно сильно колебалась благодаря значительным изменениям температуры, которая имела чрезвычайно неправильный ход. В 2 ч. 10 м. произведена была новая установка прибора, так как мениск ушел из поля зрения. При последующих измерениях дверь лифта была открыта, и влияние проникающего холодного воздуха сказалось на измерениях. Колебания, испытываемые башней, на точность наблюдения не влияли. Во внимание были приняты только измерения от 1 ч. 15 м. до 3 ч. 10 м., когда температурные влияния были невелики, причем получились следующие результаты:

Место наблюдения	Среднее значение отсчетов			Разность с. т. вниз — вверх в миллигалах
	x'	x	$dx' - dx$	
низ	8,6	1,3	3,3	60
верх	6,9	2,9	1,5	28
низ	7,7	2,2	0,5	9
верх	7,5	2,5	2,6	47
низ	8,8	1,2		
	Новая установка			
низ	4,0	6,0	2,6	47
верх	2,7	7,3	2,5	46
низ	3,9	6,0	1,6	29
верх	3,1	6,8	2,7	49
низ	4,5	5,5	1,8	38
верх	3,6	6,4		

Среднее значение 39

Действительная разность должна быть 37 миллигал. Принимая во внимание неблагоприятные температурные условия, следует считать результаты вполне удачными.

Проделанные опыты указывают на желательность дальнейшего развития статических приборов. Здесь следует указать, что размеры первого прибора выбирались такими, чтобы можно было бы отсчитывать изменения силы тяжести в 1 миллигал. Имеющиеся источники ошибок, обусловленные неравномерным смачиванием стенок капилляра и температурными изменениями, могут быть значительно уменьшены, если увеличить размеры самого прибора. Поэтому теперь приступлено к постройке инструмента, технически более совершенного, в котором введены следующие улучшения.

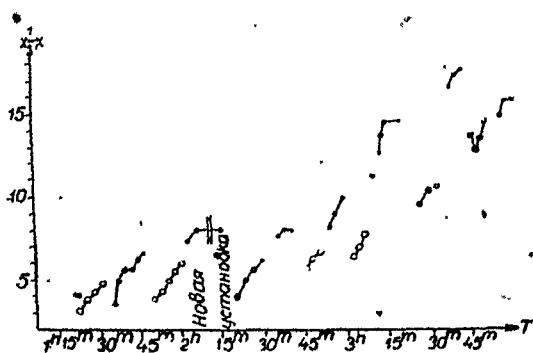


Рис. 4.

Чувствительность увеличена в 13 раз (1 миллигалу соответствует перемещение мениска в *мм*). Причем будет ослаблен источник ошибок, вызванный неравномерным прилипанием жидкости к стенкам капилляра при обратном возвращении мениска. Важно также, что при увеличении размеров прибора будет достигаться более точная компенсация температуры, так как число отдельных чередующихся между собой объемов увеличится и расположение их сделается более симметричным. Кроме того будет иметься приспособление для точной регулировки компенсации температуры эмпирическим путем, и границы, в которых возможно производить измерения, будут расширены до 1000 миллигал. Размеры строящегося инструмента следующие: высота 1,8 м, диаметр 60 см, вес 100—150 кг. Дальнейшее повышение надежности измерений будет достигаться тем, что аппарат окружается сперва поглотителем тепла, потом пространством,

снабженным автоматическим терморегулятором, поддерживающим температуру постоянной. Небольшие отклонения температуры от среднего значения будут выравниваться поглотителем тепла — водой. Для практических измерений в поле инструмент предполагается монтировать в автомобиле на кардановском подвесе; при производстве измерений на судне или воздушном корабле должно быть введено приспособление для затухания колебаний, вызванных вертикальными ускорениями.

На основании результатов измерений, проделанных до сих пор, при введении в прибор ряда технических улучшений следует надеяться, что в самом непродолжительном времени проблема статического измерения силы тяжести будет разрешена, т. е. удастся добиться точности измерений не менее чем 1 миллигаль.
