

ИЗМЕРЕНИЕ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ НА ВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ.

М. И. Поликарпов.

1. История метода.

Определение ускорения силы тяжести на водной поверхности, особенно на океане, дает весьма ценные данные для решения ряда вопросов, относящихся к фигуре земли и строению земной коры. Поэтому уже давно была поставлена задача о возможно более точном измерении силы тяжести на водной поверхности. Первые весьма ценные наблюдения были сделаны Геккером, который в 1901—1908 гг. совершил путешествия по Атлантическому, Индийскому и Великому океанам и Черному морю. Им применялся метод, указанный норвежцем Мономи, основанный на определении давления атмосферы одновременно двумя различными способами: обычным ртутным барометром и из наблюдения точки кипения жидкости (гипсотермометром). Первый способ дает результат, зависящий от величины силы тяжести в данном месте, а второй — от нее не зависит; из сравнения этих данных можно было получить искомую величину силы тяжести. Все попытки Геккера увеличить точность метода успехом не увенчались; точность измерения силы тяжести на море оставалась значительно ниже соответствующих определений на суше. Правда, это обстоятельство не помешало известному геодезисту Гельмерту сделать вывод, на основании наблюдений Геккера, о незначительности отклонения силы тяжести на океане от нормальных величин, измеренных на континентах. Позднейшие попытки улучшения метода Геккера — метода статического — не дали увеличения точности, но зато значительно усложнили производство самих наблюдений. Это вполне подтверждается недавно опубликованными опытами Дэффилда¹⁾ (Duffield).

Существовало мнение, что метод качания маятников будет совершенно не применим для наблюдений на море. Но измерения на суше

¹⁾ W. G. Duffield. The Problem of Measuring Gravity at Sea. Montly Notices of the Royal Astr. Soc., Geophys. Supplement, Vol. I, № 5. 1924.

указывали на значительные превосходства этого динамического метода над прежними статическими методами. Поэтому было весьма желательно исследовать более подробно вопрос о применимости маятников для измерения силы тяжести на море.

Факт, давший повод к такого рода размышлениям, берет свое начало в тех трудностях, которое пришлось встретить В. Мейнецу (Vening Meinesz) при производстве гравитационных наблюдений в Голландии. Подвижность почвы во всей западной части страны совершенно не позволяла найти достаточно устойчивых фундаментов для маятников. Микросейсмические колебания почвы существовали не только вблизи проезжих дорог, но имели место повсюду. Эти движения зависели от ветра и, кроме того, увеличивались при приближении к берегам Северного моря, так что можно предполагать, что они обусловливались прибоем волн. Так как нельзя было избежать влияния этих вредных движений, то пришлось искать разрешения задачи в другом направлении: в исключении пертурбаций движения маятников, вызываемых колебаниями почвы. Для этой цели Венинг Мейнец предложил производить наблюдения одновременно с двумя маятниками, качающимися с различными фазами на одной и той же подставке. Разработанный им метод дал вполне удовлетворительные результаты, так что стало совершенно очевидно воспользоваться той же идеей для исключения движений корабля, хотя движения последнего, конечно, значительно превышают упомянутые выше микросейсмические колебания почвы.

Первые наблюдения были сделаны в мае 1922 г. на борту маленького парохода (в 1200 тонн) в Северном море, но наблюдения были неудачны вследствие плохой погоды и сильной качки судна. Во время этих наблюдений выяснилась необходимость применения фотографической регистрации движений маятника вследствие того, что пертурбации начинались довольно внезапно и весьма быстро изменялись. Кроме того, оказалось, что этот метод может быть применен при условии, что качка корабля будет незначительна, например, угловые отклонения не должны превышать 1° ; в противном случае целый ряд пертурбирующих причин делают наблюдения невозможными. Здесь совершенно необходимо, чтобы агатовые ножи, на которых висят маятники, не скользили по подставке во время движения маятников. Очень удачный совет дал ван Итерсон (van Itersen) на съезде в Маастрихте, — реализовать нужные условия даже во время плохой погоды, поместив приборы на подводную лодку, и производить наблюдения, когда субмарина будет погружена на несколько десятков метров под поверхность, что должно значительно ослабить возмущающее влияние волнующейся поверхности моря.

После удачных опытов на субмарине в окрестностях Гельдера, Геодезический Комитет решил предпринять более основательное испы-

тание этого метода во время большого путешествия. Скоро представился благоприятный случай: в сентябре 1923 года на о. Яву отправлялись 3 подводные лодки голландского военного флота. Морской министр разрешил Мейнецу произвести наблюдения на подводной лодке К. II, и таким образом появилась возможность произвести довольно много наблюдений при самых разнообразных условиях.

Для наблюдений во время путешествия воспользовались аппаратом Штюкрата (Stückrath) с четырьмя маятниками из латуни. Каких-либо особых изменений в приборе не делалось, прибор только был снабжен приспособлением для фотографической регистрации и соответствующим источником света.

Эскадра отбыла из Гельдера 18 сентября и прибыла в Батавию 24 декабря.

Во время первых шести дней перехода из Гельдера в Гибралтар море было очень бурное. Даже при погружении субмарины на 30 метров колебания судна превосходили допустимые пределы: боковая качка достигала нескольких градусов. В последние дни этого первого перехода море было спокойно, и можно было сделать несколько наблюдений, предварительная обработка которых в Гибралтаре дала вполне удовлетворительные результаты.

В Гибралтаре, при содействии английских властей, в верфи адмиралтейства для маятников был сконструирован особый подвес, который значительно ослабил влияние качки судна, так что во время остального путешествия качка погруженной субмарины, в большинстве случаев, не препятствовала наблюдениям.

Далее, были сделаны измерения силы тяжести в следующих пунктах: два перед Гибралтаром, к югу от испанского берега; два между Гибралтаром и Тунисом, три между Тунисом и Александрией, одно между Александрией и Порт-Саидом, четыре между Суэцом и Аденом, семь между Сокотра и Коломбо, четыре между Коломбо и Сабанг и три между Сабанг и Малакским проливом.

Кроме этих, делались еще особые наблюдения: 1) четыре раза производились измерения, имевшие целью проверку „эффекта Этвёша“¹⁾ при движении судна в прямо противоположных направлениях (с востока на запад и обратно). Эффект Этвёша вполне подтвердился в пре-

¹⁾ При движении по поверхности земли, находящейся во вращении, всякое тело должно испытывать изменение силы тяжести, так как измеряемая сила тяжести складывается из истинной ее величины, из которой вычитается нормальная составляющая центробежной силы.

Так как при движении тела по поверхности земли к востоку и западу скорость движения тела в одном случае прибавится к скорости движения земли, а в другом вычитается, то ясно, что центробежная сила будет в обоих случаях различна и различной будет и измеряемая тяжесть тела.

Экспериментально это обстоятельство было обнаружено Этвёшем и по предположениям Дэффилда получило название „эффекта Этвёша“.

1) из-за ошибок опытов; 2) четыре раза были проделаны наблюдения для исследования влияния на маятники электрического поля на борту субмарины: одно наблюдение делалось с металлическим кожухом, закрывавшим аппарат, другое без кожуха. При последних опытах не было обнаружено сколько-нибудь заметной разницы, так что обычная металлическая покрывка аппарата вполне достаточна для уничтожения влияния сильного электрического поля, имеющегося в субмарине.

Для получения контрольных наблюдений производились измерения на берегу в следующих портах: Тунисе, Александрии, Суэце, Адене, Коломбо и Сабанг. Кроме того, были сделаны обычные наблюдения силы тяжести с маятниками в 3-х местах Голландской Индии: в Сабанг — на севере о. Суматры, в Батавии и в Бандоенг (Bandoeng). При этих наблюдениях пользовались 4-мя инварными маятниками.

Обработка наблюдений, произведенных в подводной лодке, показывает, что попытка измерения силы тяжести на водной поверхности при помощи маятников увенчалась полным успехом и превзошла все ожидания: точность измерений получилась не ниже, чем на суше. Некоторое расхождение отдельных наблюдений обусловлено ошибкой при других редукциях, но не вызвано колебаниями судна, так как влияние качки последнего исключалось почти совершенно. Период колебания маятников, при тихой погоде, определялся со средней ошибкой в 2 или $3 \cdot 10^{-7}$ сек, при неспокойном море средняя ошибка доходила до $10 \cdot 10^{-7}$ сек. Указанная здесь средняя ошибка относится к поправке на движение судна, но здесь не приняты во внимание другие поправки, например, за температуру, ход хронометра и др.

При этих наблюдениях выяснилось, что целый ряд пертурбаций, которые, с первого взгляда, должны бы были приниматься во внимание, на практике оказались очень малы, что значительно облегчило вычислительную работу и уменьшило ошибку. Наиболее сильные пертурбации движения маятников обуславливались горизонтальными ускорениями точек подвеса. Но эти пертурбации могут быть полностью элиминированы методом Мейнеца. Пертурбации, вызванные вертикальным ускорением и изменением наклона плоскости качаний маятников, так же могут быть исключены с достаточной точностью. Все остальные пертурбации являются весьма незначительными. Для многих из них теория показывает, что они должны влиять на амплитуду колебаний маятников, но в действительности амплитуда „гипотетического маятника“ совершенно постоянна, что и указывает на незначительность этих пертурбаций. Для исключения всех упомянутых выше пертурбаций достаточно было бы двух маятников, колеблющихся одновременно на одной подставке и в одной плоскости. В аппарате Штюкрата, с которым производились наблюдения, находились две пары маятников, качающихся в двух перпендикулярных друг к другу

плоскостях, и поэтому одновременно получалось два независимых результата.

Можно сказать, что средняя ошибка результата для g за время всего путешествия колебалась от 0,003 до 0,006 см/сек^{-2} .

Эта ошибка, главным образом, вызвана следующими тремя поправками:

1) Поправка за температуру. При погружении субмарины температура внутри судна весьма быстро повышалась и в некоторых случаях доходила почти до 40°C . Маятниками из инвара пользоваться было рискованно вследствие их большой чувствительности к магнитному полю, которое очень сильно на подводной лодке. Поэтому применялись маятники из латуни, температурный коэффициент которых равнялся $47 \cdot 10^{-7} \text{ см/сек}^2$ на 1°C . Поправки на температуру достигали довольно значительной величины.

Для уменьшения температурных поправок в будущем В. Мейнец предполагает пользоваться маятниками из кварца. Но здесь следует заметить, что опыт применения кварцевых маятников в Индии (Survey of India), по сообщению Н. Mc Colly Cowie, показал, что маятники из этого материала чрезвычайно хрупки и, несмотря на все предосторожности при перевозках, легко бьются.

Кроме того, при опытах с такими же маятниками в Потсдаме обнаружилось, что кварц очень легко абсорбирует влагу, о чем необходимо помнить при работах с кварцевыми маятниками (из плавленого кварца).

2) Поправка за скорость движения судна. Эта поправка пропорциональна составляющей скорости корабля по направлению параллели; на экваторе поправка $= 0.0040 \text{ см/сек}^2$ на каждый км/час , поэтому необходимо знать скорость с точностью, по крайней мере, до 0.5 км/час .

Очень нетрудно определить скорость движения судна относительно воды, но необходимо принять во внимание также течения. Для этого требуется довольно продолжительное время, так как средняя величина скорости течения может быть получена только на основании двух мореходных определений, отделенных друг от друга значительными промежутками времени. Эти ошибки неразрывно связаны с тем обстоятельством, что наблюдения ведутся на движущемся судне.

Кроме того, нет уверенности, что течение на глубине нескольких десятков метров не будет отличаться от поверхностных течений.

Мейнец предполагает воспользоваться особым гироскопическим аппаратом для точного определения скорости судна, но реализации этого способа, повидимому, встретит значительные практические трудности.

При путешествии на о. Яву самой выгодной скоростью движения лодки, при производстве наблюдений, оказалась скорость в $4\frac{1}{2}$ мили в час. При этих условиях сотрясения были незначительны.

3) Поправка за ход хронометра. При наблюдениях с маятниками на суше ход хронометров обычно определяется приемами сигналов времени по радио. Теоретически желательно было бы распределить наблюдения с маятниками равномерно между двумя приемами сигналов времени. На сублимарине очень трудно выполнить это условие по целому ряду причин. Очень часто во время путешествия сигналы принимались только 1 раз в сутки. Производить же наблюдения на сублимарине продолжительное время нельзя, так как она не может очень долго оставаться в погруженном состоянии.

Во время описываемого путешествия наблюдения продолжались обычно 15—20 мин., и ошибка зависела исключительно от нерегулярности хода хронометра. Тем более, что в распоряжении экспедиции находился всего только один, правда, очень хороший, хронометр Nordin, колебания суточного хода которого не превышали 0.1 сек.

Такая продолжительность наблюдения была вызвана тем, что не считали возможным увеличить время наблюдения, не увеличив амплитуды (при увеличении последней зайчик уходил из поля зрения). На основании опыта, полученного во время путешествия, оказалось возможным и весьма желательным довести время наблюдения до 30 или 40 минут.

Точный прием радиосигналов с дальних станций на сублимарине производить оказалось довольно затруднительно вследствие малой величины антенны, которая, кроме того, обычно бывает смочена.

Необходимо было увеличить число хронометров для уменьшения ошибки, происходящей от их хода.

Много вредило наблюдениям отсутствие на Востоке станций, дающих ритмические сигналы времени.

Обработка наблюдений, произведенных во время путешествия, и позднейшие опыты показывают, что, вероятно, будет возможно производить наблюдения на борту обыкновенного парохода при спокойном море. Необходимо только, чтобы вибрации корпуса судна, происходящие от работы машин, были незначительны. На борту погруженной подводной лодки это условие выполняется, так как в этом случае лодка приводится в движение электромотором.

Следующие цифры дают понятие о допустимой качке судна. Средняя ошибка наблюдения, продолжающегося около 20 минут, не превышает $10 \cdot 10^{-7}$ сек, если вертикальная скорость судна остается меньше 15 см/сек, а амплитуда килевой качки не превышает $0^\circ.5$ или 1° .

Нез смотря на то, что возможность наблюдения с маятниками на борту обычного корабля является доказанной, все-таки предпо-

читательнее производить измерения на подводной лодке, так как здесь возможны наблюдения и не при совершенно спокойном море и точность наблюдения будет более значительна.

2. ТЕОРИЯ МЕТОДА.

Главнейшие пертурбации, вызываемые движением корабля, могут быть разделены на следующие:

- а) Эффект, обусловленный горизонтальной компонентой ускорения точки подвеса маятников.
- б) Эффект, обусловленный вертикальной компонентой.
- с) Эффект, обусловленный наклоном плоскости колебаний маятников.

Ниже дается краткое изложение теории метода, позволяющего из наблюдений одновременного качания двух маятников на одной и той же подставке и в одной плоскости, при равенстве ускорений точек подвеса обоих маятников, исключить первые два эффекта.

Напоминаем, что наибольшее влияние оказывает горизонтальное ускорение точек подвеса.

Уравнение движения маятника, точка подвеса которого имеет горизонтальное ускорение $\ddot{y}$, будет:

$$\frac{g}{l} \theta + \ddot{\theta} + \frac{\ddot{y}}{l} = 0, \quad (1)$$

где θ — угол отклонения маятника, а l — длина математического маятника.

Для понижения порядка этого уравнения вводим новое комплексное переменное q :

$$q = \theta - \frac{i}{n} \dot{\theta}, \quad (2)$$

где $i = \sqrt{-1}$, а $n = \sqrt{\frac{g}{l}}$.

Величина q , как комплексное число, может быть изображено вектором, отнесенным к прямоугольной системе координат, если по осям отложить θ и $-\frac{\dot{\theta}}{n}$.

Будем впредь q называть „вектором маятника“, его длину a — амплитудой и его аргумент φ — угловой фазой маятника.

Величины a и φ связаны с q уравнением:

$$q = a \cdot e^{i\varphi}.$$

Введение q в уравнение движения (1) дает:

$$\dot{q} - inq - i \frac{n\ddot{y}}{g} = 0. \quad (3)$$

Если $\ddot{y} = 0$, т.-е. маятник не подвержен пертурбациям, то решение уравнения (3) будет:

$$q = q_0 e^{int},$$

т.-е. q есть вектор постоянной длины, вращающийся с постоянной скоростью n вокруг точки 0.

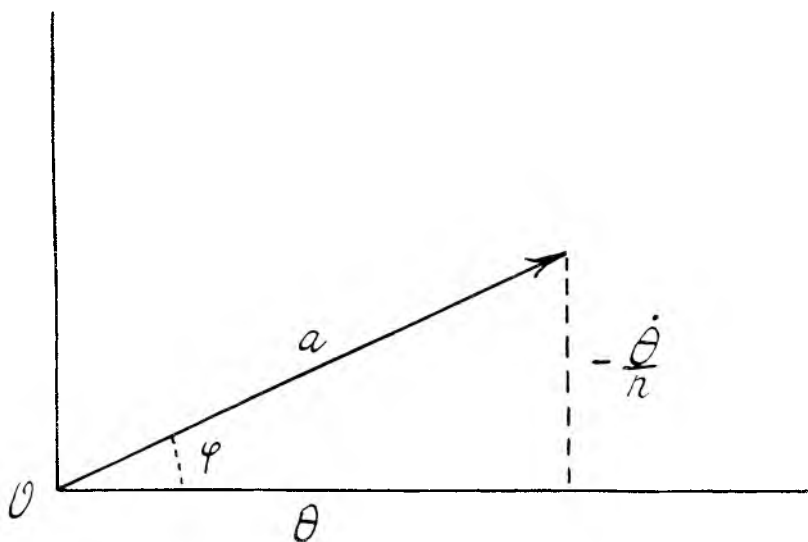


Рис. 1.

Проекция q на горизонтальную ось дает θ . В этом случае мы получаем хорошо известное графическое изображение движения маятника при помощи кругового движения.

Период колебания маятника будет равен: $\tau = \frac{\pi}{n} = \pi \sqrt{\frac{l}{g}}$.

Если точки подвеса обоих маятников подвержены равным ускорениям $\ddot{y}$, то уравнения движения этих маятников напишутся так:

$$\dot{q}_1 - in_1 q_1 - i \frac{n_1 \ddot{y}}{g} = 0.$$

$$\dot{q}_2 - in_2 q_2 - i \frac{n_2 \ddot{y}}{g} = 0.$$

Исключая $\ddot{y}$ и вводя новое обозначение $n = \frac{1}{2} (n_1 + n_2)$, имеем:

$$\left(\frac{n}{n_1} \dot{q}_1 - \frac{n}{n_2} \dot{q}_2 \right) - in (q_1 - q_2) = 0.$$

Введя $r = \frac{n}{n_1} q_1 - \frac{n}{n_2} q_2$ и $\Delta = \frac{n_1 - n_2}{2}$, получаем:

$$\dot{r} - inr - i\Delta \left(\frac{n}{n_1} q_1 + \frac{n}{n_2} q_2 \right) = 0. \quad (4)$$

Отбрасывая последний член, о котором речь будет ниже, получаем уравнение движения не пертурбированного маятника, которое не зависит от $\ddot{y}$. Мы назовем этот маятник, которому соответствует вектор r , „гипотетическим маятником“, заменяющим два действительных маятника n_01 и n_02 .

Если действительные маятники имеют почти одинаковые периоды колебания, то вектор r будет = разности векторов, соответствующих действительным маятникам, и тогда последний член будет весьма мал. Этот член равен 0 для изохронных маятников.

Чтобы выяснить влияние последнего члена, разделим уравнение (4) на r и отделим действительную часть от мнимой; после некоторых преобразований найдем:

$$r = \frac{n}{n_1} q_1 - \frac{n}{n_2} q_2, \quad (5a)$$

$$\dot{\varphi} = n + \Delta \left(\frac{n^2}{n_1^2} \cdot \frac{a_1^2}{a^2} - \frac{n^2}{n_2^2} \cdot \frac{a_2^2}{a^2} \right), \quad (5b)$$

$$\frac{\dot{a}}{a} = 2\Delta \frac{n^2}{n_1 n_2} a_1 a_2 \sin(\varphi_2 - \varphi_1), \quad (5c)$$

где φ и a относятся к гипотетическому маятнику. Если маятники почти изохронны, множители $\frac{n}{n_1}$ и $\frac{n}{n_2}$ будут равны 1, и тогда получим:

$$r = q_1 - q_2, \quad (6a)$$

$$\dot{\varphi} = n + \Delta \frac{a_1^2 - a_2^2}{a^2}, \quad (6b)$$

$$\frac{\dot{a}}{a} = 2\Delta a_1 a_2 \sin(\varphi_2 - \varphi_1). \quad (6c)$$

Так как период колебания T есть время, в течение которого угол φ увеличивается до π , то формулу (6b) можно заменить следующей:

$$T = \tau + \delta \frac{a_1^2 - a_2^2}{a^2}, \quad (6d)$$

где T — период гипотетического маятника, τ — среднее значение периодов τ_1 и τ_2 действительных маятников, равное периоду колебаний не пертурбированного маятника, и $\delta = \frac{1}{2} (\tau_1 - \tau_2)$.

Для маятников абсолютно синхронных формулы (6) упростятся:

$$r = q_1 - q_2, \quad (7a)$$

$$\dot{\varphi} = n, \quad (7b)$$

$$\frac{\dot{a}}{a} = 0, \quad (7c)$$

$$T = \tau. \quad (7d)$$

При помощи формул (5a), (6a) и (7a) можно вывести величину вектора гипотетического маятника из векторов действительных маятников, а формулы (5b), (6d) и (7d) дадут период гипотетического маятника.

Точность измерения будет тем больше, чем больше длина вектора r . Формулы (5a), (6a) и (7a) показывают, что наибольшее значение для r получается, когда разность фаз $= \pi$. Поэтому выгодно пользоваться маятниками, совершающими колебание с одинаковой амплитудой и противоположными фазами.

Из предыдущего следует, что нет надобности обязательно пользоваться для измерения двумя изохронными маятниками, но чем больше будет δ , тем с большей точностью нужно будет определять множитель $\frac{a_1^2 - a_2^2}{a^2}$ во втором члене формулы (6d). Так как величины a_1 и a_2

непрерывно изменяют свои значения во время наблюдения, то нахождение среднего значения этого множителя за все время измерения требует очень длинных вычислений, чтобы достигнуть нужной точности. Разность периодов действительных маятников в $200 \cdot 10^{-7}$ сек не вызывает особых осложнений. В этом случае не требуется применения форм. (5), которые должны применяться только к разностям более значительным.

Нужно заметить, что метод становится совершенно непригодным, если ножи, на которых висят маятники, скользят по упору, и когда ускорения в точках подвеса не будут равны между собой. К счастью, таких скольжений во время путешествия не наблюдалось.

Теоретическое изучение других пертурбаций показывает, что они значительно меньше рассмотренных нами выше. Это происходит потому, что в их выражение входит множителем амплитуда, которая не достигает величины 0,01.

Если период корабля отличается от периода маятника, что обычно и имеет место, то большей частью эти второстепенные пертурбации имеют характер нерегулярный, случайный, что и сказывается как на амплитуде, так и на периоде колебания маятников. Между последними величинами существует следующее соотношение:

$$\left[\delta \tau \right] = \frac{T}{na} \left[\delta \dot{a} \right], \quad (8)$$

где $[\delta\tau]$ означает среднее значение пертурбации в периоде колебания, а $[\delta\dot{a}]$ — такое же изменение амплитуды в единицу времени.

Наблюдения во время плавания показали, что изменения амплитуды были весьма незначительны, а следовательно, можно утверждать, что и пертурбации в периоде колебаний относятся к категории пертурбаций весьма незначительных. Сравнение результатов обеих пар маятников приводит нас к такому же заключению.

Следующие пертурбации имеют характер более систематический:

1°. Пертурбации, обусловленные вертикальным ускорением $\ddot{x}$ точки подвеса. Эта же самая причина вызывает еще другие, весьма незначительные пертурбации нерегулярного характера, которыми можно пренебречь и которые рассматриваться нами не будут.

Упомянутая же здесь пертурбация скажется на величине n , связанной с g формулой:

$$n = \sqrt{\frac{g}{l}}.$$

вследствие изменения g на $g + \ddot{x}$.

Следовательно, мы будем наблюдать не величину g , но g увеличенное на среднее изменение $\ddot{x}$ за время наблюдения. К счастью, $\ddot{x}$ есть количество, быстро изменяющееся как по величине, так и по знаку, так что средняя величина довольно долгое время остается малой; она может быть изображена следующей формулой:

$$\frac{1}{t}(\dot{x}_t - \dot{x}_0), \quad (9)$$

где $\dot{x}_t$ и $\dot{x}_0$ — вертикальные скорости в конце и в начале времени t . Эти вертикальные скорости возможно определить, а следовательно, возможно вычислить и эти пертурбации.

При спокойном море средняя величина изменения $\dot{x}$ достигает 1 см в сек., и средняя ошибка в определении периода колебания маятника = 2 или $3 \cdot 10^{-7}$ сек. При неспокойном море средняя величина изменения $\dot{x}$ достигает до 10 см в сек., что дает среднюю ошибку в определении периода колебания в $7-11 \cdot 10^{-7}$ сек. Эти цифры относятся к продолжительности наблюдения в течение 15—20 минут; при увеличении времени наблюдения средняя ошибка в периоде колебания будет значительно меньше, так как она обратно пропорциональна времени.

2°. Эффект, зависящий от изменения угла между направлением силы тяжести и плоскостью качания маятников.

Отбрасывая незначительные иррегулярные влияния, которыми можно пренебречь, этот эффект наклона плоскости колебаний может

быть сведен к тому, что мы будем измерять не величину g , а $g \cdot \cos \alpha$, где α есть угол отклонения плоскости качания маятников от вертикальной плоскости.

Величина поправки для g будет: $-\frac{\alpha^2}{2}g$, а для периода коле-

баний T :

$$\delta T = + \frac{\alpha^2}{4} T. \quad (10)$$

Эта поправка имеет один и тот же знак во время всего наблюдения и достигает для T величины $30 \cdot 10^{-7}$ сек.

Следовательно, необходимо регистрировать угол наклона α , чтобы можно было вычислить среднюю величину α^2 за все время наблюдения.

Нужно еще принять во внимание, что часто плоскости, в которых совершают колебания маятника одной и той же пары, не абсолютно параллельны, так что если $\alpha=0$ для одного маятника, то α для другого маятника может и не равняться 0. Это отклонение очень незначительно при обычных относительных определениях тяжести на суше, так как ошибка постоянна для всех наблюдаемых станций, но для случая здесь рассматриваемого, когда угол α — величина переменная, это обстоятельство должно быть учтено.

3°. Пертурбации, вызываемые ускорением, происходящим от вращения вокруг горизонтальной оси.

Можно показать, что хотя эти пертурбации имеют всегда одинаковый знак, но они невелики. Эффект, обусловленный вращением вокруг горизонтальной оси, не превышает нескольких процентов предыдущих пертурбаций.

Этот эффект будет незначителен даже тогда, когда корабль движется не по прямой линии.

Все остальные пертурбации принадлежат к категории иррегулярных и незначительных по величине.

3. Приборы.

Из предыдущего § видно, что для исключения пертурбаций достаточно иметь аппарат хотя бы с двумя маятниками, снабженный установкой для регистрации движений этих маятников. Если располагать большим числом маятников, могущими совершать колебания в одной и той же плоскости, то тогда возможно получить число независимых определений на единицу меньшее числа маятников. В аппарате Штюкрата, служившем для измерения Мейнецу, имеется четыре маятника, совершающих попарно колебания в двух взаимно перпендикулярных плоскостях. Таким образом, с описываемым прибором можно получить всего только 2 независимых результата, но зато

этот прибор имеет то преимущество, что не требует вспомогательного приспособления для измерения угла наклона плоскости колебаний маятников, так как он регистрирует и этот угол.

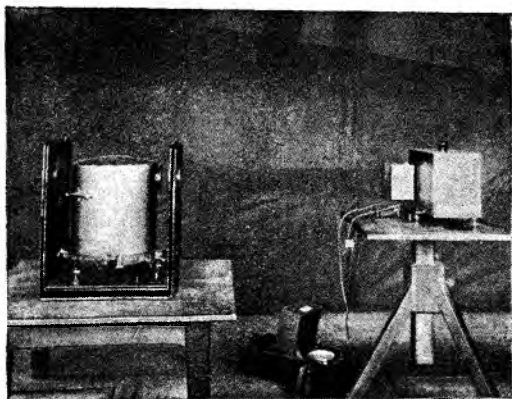


Рис. 2.

Остановимся на рассмотрении вращения прибора вокруг оси, перпендикулярной к плоскости качания маятников. Этот эффект движения корабля не был рассмотрен в предыдущем §, так как он не влияет на измеряемую величину силы тяжести, но регистрируется же он довольно точно. Что касается этого эффекта, то мы можем себе представить, что эти движения происходят таким образом, как будто маятники вместе с регистрационным приспособлением остаются непо-

движными, но вертикальная линия, проходящая через точку подвеса, совершает колебания в противоположные стороны.

Хотя угол, который составляется осью маятника с вертикалью, и не регистрируется, но зато определяется угол с некоторой постоянной линией по отношению к прибору. Таким образом, мы измеряем не угол элонгации θ , а $\theta + \alpha$, где α — угол отклонения вертикали в плоскости колебаний. Этот угол представляет собой в то же время угол наклона плоскости колебаний другой пары маятников. Так находят $\theta + \alpha$, и нужно, следовательно, отделить друг от друга углы θ и α . Сделать это довольно просто, по крайней мере приблизительно, так как α меняется достаточно медленно сравнительно с движениями маятников, так что в то время, пока $\theta + \alpha$ изменяется между $\alpha + a$ и $\alpha - a$, можно α считать постоянным. Угол α определится, если взять среднее из этих двух величин, даваемых соседними точками максимума и минимума регистрационной кривой.

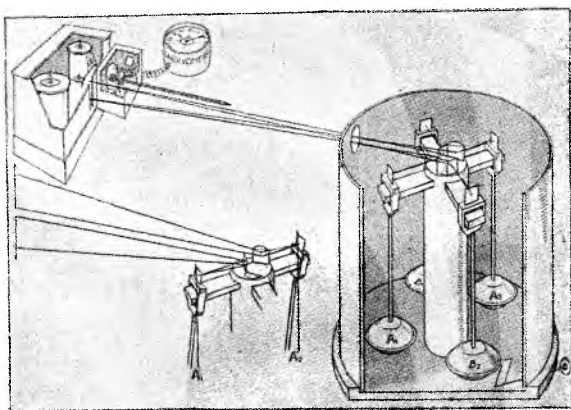


Рис. 3.

Следовательно, при обработке наблюдений приходится вычитать угол наклона плоскости колебаний одной пары маятников из регистрационной кривой второй пары.

Описание аппарата Штюкрата имеется в целом ряде работ, и здесь мы останавливаться на этом не будем, тем более, что никаких существенных изменений в конструкцию прибора Мейнец не внес. Источником света служил маленький приборчик, находящийся на расстоянии 1,05 метра от маятников. Он содержал в себе лампу (с электрической дугой между вольфрамовыми полюсами), изготовленную фабрикой Филиппса по проф. Эйндговену. Эта лампа давала интенсивный и хорошо концентрированный пучок световых лучей и была

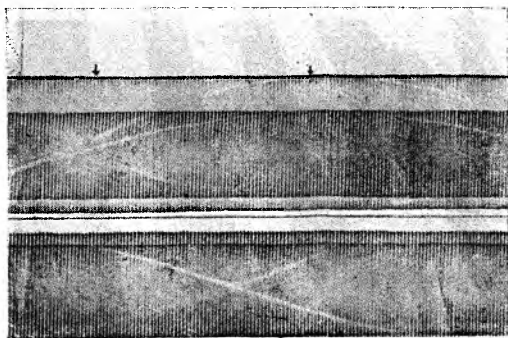


Рис. 4.

очень удобна для целей регистрации. Перед лампой находилась диафрагма в 0,2 мм, отверстие которой закрывалось каждую секунду на очень короткий промежуток времени при помощи маленького рычага, действующего электрическим током, замыкаемым и размыкаемым хронометром. На регистрационной кривой, таким образом, имелись отметки через каждую секунду.

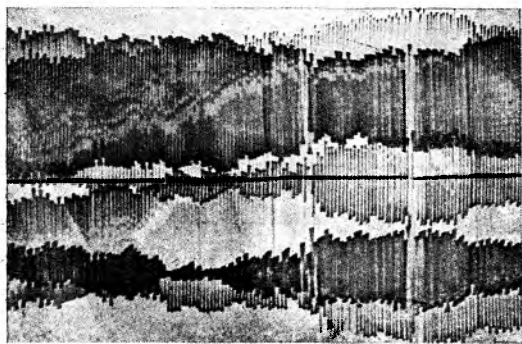


Рис. 5.

Отражаясь от 4-х зеркал, прикрепленных к маятникам, лучи света, проходя через вертикальную щель регистрационного приспособления, попадали на барабан с светочувствительной бумагой. Барабан вращался со скоростью 1,2 мм/сек. Этот аппарат находился на расстоянии 1,15 м от маятников, при этих условиях все четыре изображения диафрагмы получались особенно резкими.

Общее расположение приборов — маятника, регистрационного аппарата, осветителя и хронометра — хорошо видны на рис. 2 и 3.

На фотографической бумаге получались четыре пертурбированных синусоиды. Зеркала маятников располагались таким образом, что изображения от одной пары маятников приходились на верхнюю часть бумаги, а другой пары — на нижнюю (см. рис. 4 и 5).

Опыт показал, что следовало бы несколько изменить упомянутые выше скорости вращения барабана. Более удобно пользоваться двумя различными скоростями: около $1,8—2$ мм/сек и $0,2—0,4$ мм/сек; первую лучше применять в начале и в конце наблюдения, когда определяются „вектора маятников“, вторую — при определении амплитуды и углов отклонения α .

Фотографическая бумага была шириною в 12 см и длиной 75 м и специально изготовлялась фабрикой „Schaeuffelen“ в Гейльброне на Неккаре.

Как было упомянуто в § 1, аппарат с маятниками был заключен (во время пребывания в Гибралтаре) в особый подвес, который позволял производить регистрацию даже при довольно значительной качке. Этот подвес мог совершать качания только вдоль оси лодки, с этой же осью совпадало и направление регистрирующих световых лучей, так что колебания маятникового аппарата по отношению к аппарату с фотографической регистрацией не прерывали процесса регистрации.

Маятники располагались так, чтобы плоскости их качания составляли углы в 45° с большей осью подводной лодки. Все приборы были монтированы вблизи метацентра лодки. Командир субмарины К II требовал от команды сохранения полной неподвижности во время производства наблюдений. Ходьба по полу могла вызвать скольжение маятников.

Ниже приводятся воспроизведения некоторых фотографических записей, полученных Мейнецом во время путешествия на о. Яву.

Рис. 4 воспроизводит часть записи, сделанной в порту Тунис. Субмарина на поверхности; море очень спокойно. Амплитуды почти не изменяются, имеет место незначительное горизонтальное ускорение. Наклон плоскости колебания маятников очень мал.

Рис. 5 дает запись в порту Суэц. Субмарина на поверхности. Амплитуда сильно меняется, вероятно, от ударов К II о соседние лодки. Наклон плоскости колебаний невелик. Несмотря на присутствие горизонтальных ускорений, средняя ошибка в периоде гипотетического маятника не превышает $4,10^{-7}$ сек при продолжительности наблюдения 15 минут.

4. Результаты измерений в Индийском океане.

Измерения В. Мейнеца вызвали большой интерес у целого ряда геодезистов. Известный американский геодезист В. Бауи (William Bowie) обратился с просьбой к Мейнецу сообщить ему возможно более подробные сведения о результатах измерения силы тяжести в Индийском океане. Эти сведения были получены для 13 станций Индийского океана. По предложению В. Бауи, сотрудник U. S. Coast

and Geodetic Surwy С. Н. Суйк ввел изостатическую редукцию для некоторых станций Мейнеца (2, 3, 4, 5 и 11). Результаты этого вычисления приведены в следующей таблице:

№№ станций	Глубина (в саженьях)	Изостатические аномалии			
		g_c	g	$(g - g_c)$	$(g - g_c - 0.008)$
2	2 300	978.176	978.184	+ 0.008	0.000
3	2 400	.121	.136	+ 0.015	+ 0.007
4	2 400	.122	.111	— 0.011	— 0.019
5	2 400	.116	.102	— 0.014	— 0.022
11	2 200	.078	.065	— 0.013	— 0.021
Среднее значение аном. со знаками . . .				— 0.003	— 0.011
" " " без знаков . . .				0.012	0.014

Все пять станций выбраны в открытом океане над глубинами 4 025 — 4 390 метров.

Вычисление теоретического значения силы тяжести g_c велось по формуле Гельмерта 1901 года, при чем в эту величину вводились поправки на погружение субмарины, поправки топографические и изостатические за всю поверхность земного шара. В четвертом столбце (g) даны наблюдаемые значения. В столбце $(g - g_c)$ приведены топографо-изостатические аномалии, вычисленные по формуле Гельмерта 1901 г., в которой первый член = 978.030. Наибольшая аномалия = 0.015. Среднее значение аномалии для пяти станций, принимая во внимание знаки, будет = — 0.003, без знаков = 0.012.

В последнем столбце даны значения аномалий, вычисленных по формуле В. Бауи, которая отличается от формулы Гельмерта только значением первого члена, равного, по Бауи, 978.038. Средние значения аномалий, по Бауи, будут соответственно равны: — 0.011 и 0.014.

На основании этих результатов Бауи приходит к выводу, что незначительные величины аномалий как со знаками, так и без них указывают на то обстоятельство, что в открытых глубоких местах Индийского океана земная кора находится в состоянии весьма совершенного изостатического равновесия.

В своей статье (Nature, № 2878, Vol. 114. Dec. 1924) Бауи сообщает некоторые дополнительные сведения о точности наблюдений В. Мейнеца и указывает, что большое влияние на точность имели: 1) изменение температуры маятников во время наблюдения и 2) ход хронометров.

По мнению Бауи, большие трудности при измерении силы тяжести на море представляет получение точных промежутков времени, так как, например, В. Мейнец проверял ход хронометров только один раз в сутки, принимая сигналы времени по радио. Для по-

лучения более точных результатов Бауи предлагает отправлять и принимать сигналы времени во время производства наблюдений каждый час.

Обсуждая этот вопрос, он пришел к мысли применить камертон для отметки промежутков времени при работе с маятниками как на суше, так и на море. Камертон следует изготовить из подходящего материала с возможно постоянными упругими свойствами, и изменение температуры должно сказываться очень незначительно на упругих свойствах камертона. Если такой прибор удастся изготовить, то, по Бауи, сравнением небольшого числа колебаний маятника с колебаниями камертона можно будет определить с достаточной точностью период колебания маятника. Конечно, камертон должен быть предельно тщательно выверен и калиброван.

5. Последние опыты 1925 года.

По ходатайству Голландского Геодезического Комитета морской министр еще раз разрешил В. Мейнецу произвести наблюдения на борту субмарины военного флота, шедшей на о. Яву. Мейнец отплыл на субмарине К XI из Гельдера 15 октября и прибыл в Александрию 12 ноября, побывав в Севилье и Тунисе. На обратном пути, 23 ноября, он сел в Порт-Саиде на голландский почтовый пароход „Koningin der Nederlanden“ и 5 декабря прибыл в Амстердам.

Главной целью последнего путешествия было испытание нового маятникового аппарата, сконструированного В. Мейнецом и описанного в № 5, январь/март 1925 г. „Bulletin Géodésique“ (орган геодезической секции Геодезического и Геофизического Союза). Аппарат был построен в механической мастерской Королевского Метеорологического Института главным инструментальным мастером Ван-Рест (van Rest), при сотрудничестве помощника директора д-ра Скауте (C. Schoute).

Детальное описание аппарата должно появиться в изданиях Геодезического Комитета; пока известно только краткое описание этого прибора.

Весь аппарат состоял из трех главных частей: подставки с маятниками, подвеса и регистрационного приспособления.

На подставке имелось три маятника (длиной в $\frac{1}{4}$ м) из обычной модели Штюкратта, той самой, которая применялась во время первого путешествия. Маятники были сделаны из латуни.

Все три маятника могли совершать почти изохронные колебания в одной плоскости и могли быть пущены в ход одновременно с точно установленными амплитудами. Колебания записывались на движущейся фотографической ленте при помощи света, отражающегося от зеркал, укрепленных на маятниках, но не так, как в старом аппа-

рате — для каждого маятника отдельно. Луч света попадал сперва на зеркало первого маятника и, отразившись, попадал на зеркало второго маятника. При таком способе записывалась разность угловых отклонений обоих маятников. Получаемая на ленте запись давала сразу кривую „гипотетического маятника“, в которой вращающийся вектор равнялся разности векторов действительных маятников. Таким образом, исключались пертурбации, обусловленные горизонтальными ускорениями движущегося судна.

Точно также записывались совместные колебания второго и третьего маятников. Обе кривые дают два независимых результата, контролирующих друг друга и тем повышающих точность наблюдения.

Для введения поправок за изменение температуры записывалось отдельно движение второго маятника; выполняющий это луч на своем пути отражался зеркалом небольшого маятника с сильным затуханием, плоскость колебания которого была параллельна плоскости второго маятника. Другой маятник с сильным затуханием, той же конструкции, плоскость колебания которого перпендикулярна к плоскости колебания основных маятников, служила для записи изменений наклона этой плоскости в течение времени наблюдения.

Изменения температуры внутри аппарата во время наблюдения записывались посредством металлического термометра.

В промежутках между наблюдениями маятники не снимались и оставались в аппарате даже во время сильной качки. Арретировка маятников производилась следующим образом: поворотом рукоятки ножи, на которых висят маятники, поднимались с агатовых пластинок, на которые они обычно опираются, движением другой рукоятки можно было зажать нужные концы маятников между четырьмя зажимами.

Параллельно плоскости колебаний маятников располагался маленький уровень, пузырек которого во время наблюдения постоянно находился в движении, вызываемом качкой судна; маятники пускались в ход в тот момент, когда пузырек стоял на нуле, чтобы колебания начались с желаемой и одинаковой амплитудой. В приборе имелся еще ложный маятник с термометром и волосяным гигрометром.

Наблюдения продолжались, обычно, 35 минут.

Можно считать, что практическое испытание нового прибора превзошло все ожидания. Записи кривых получались очень ясно, их внешний вид значительно отличается от прежних записей (рис. 4 и 5). Амплитуды гипотетического маятника изменяются совершенно регулярно, что указывает на полное исключение влияний горизонтальных ускорений. Оставшиеся уменьшения амплитуд, вызываемые затуханием, не превышали 0,1 мм, т.-е. 2—3% величины всей амплитуды.

Скольжение маятников имело место только в особо неблагоприятных обстоятельствах. Благодаря особому способу подвеса аппарата боковая качка почти совершенно не влияла; если же килевая

качка переходила некоторые пределы, то наблюдалось скольжение маятников, и изображения могли совершенно исчезать с фотографической пленки. Килевую качку субмарины, в погруженном состоянии, можно было сильно ослабить применением горизонтального руля.

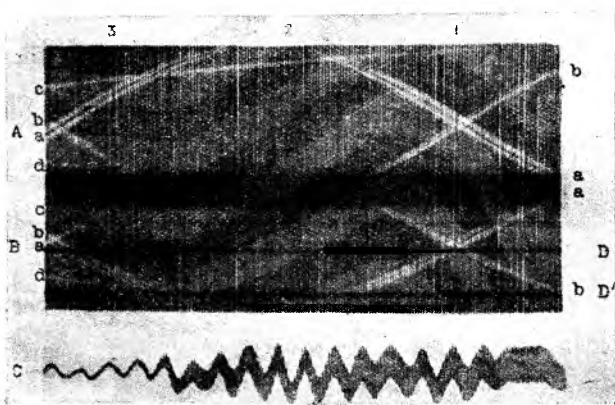


Рис. 6.

На рис. 6 воспроизведена запись с новым прибором, сделанная 2 ноября в порту Туниса. *A* и *B* — кривые гипотетических маятников (кривые перекрывают друг друга). Кривых времени всего четыре: *a* и *b* — дают звездное время (малый период), *c* и *d* — среднее время (большой период). *C* — кривая среднего маятника. На-

клон плоскости колебаний: *D* — затухающий маятник; *D'* — незатухающий маятник.

Рис. 7 дает запись в Средиземном море от 10 ноября. Субмарина в погруженном состоянии. Обозначения такие же, как и на черт. 6. Незатухающий маятник *D'* отсутствует.

Преимущества нового аппарата перед старым следующие:

1) Наблюдатель гораздо меньше утомляется при производстве наблюдений, так как ему не нужно держать корпус в неудобном положении под черной материей, которой закрывался старый аппарат.

2) Измерения записей производить гораздо легче благодаря отчетливости и правильности их.

3) Вычисления значительно упрощаются, так как на пленке сразу получаются кривые гипотетических маятников и их не нужно выводить из кривых отдельных маятников.

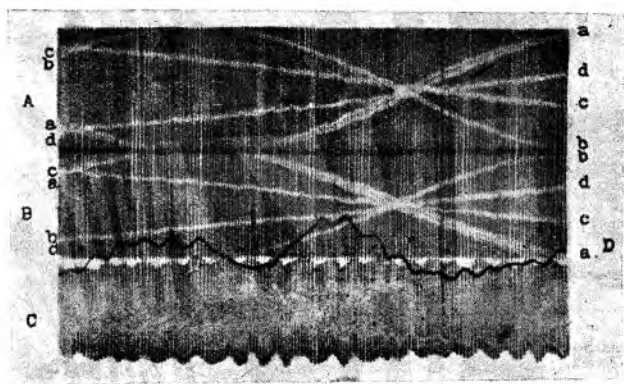


Рис. 7.

4) Точность наблюдений больше, она не ниже обычных измерений на суше.

5) Новый аппарат может свободно употребляться в тех случаях, когда старый аппарат отказывал в действии.

Во время последнего путешествия были сделаны наблюдения в следующих пунктах: в устье Канала недалеко от берегов Франции; в Бискайском заливе у берегов Испании; в Севильи на Гвадалквивире; в Средиземном море, между Гибралтаром и Тунисом; в порту Туниса; в Средиземном море, между Мальтой и Александрией, и в порту Александрии.

Некоторые наблюдения уже обработаны; результаты, полученные в портах Туниса и Александрии, отличаются, соответственно, на 0,001 и 0,007 см/сек^2 от наблюдений 1923 года.

Погода стояла все время хорошая, и море было спокойное. Незначительное число наблюдений в Атлантическом океане объясняется тем обстоятельством, что время, назначенное для перехода из Гельдера в Севилью, не позволяло делать частых остановок. Наблюдения на Средиземном море являются ценным дополнением к наблюдениям 1923 года.

На обратном пути Мейнец произвел серию наблюдений на борту парохода между Критом и Сицилией. Море было очень спокойно, и качка корабля — незначительна. Аппарат был размещен в каюте, без подвеса. Полученные кривые показывают существование вибраций, обусловленных работой машин, но ход изменений амплитуд довольно регулярный. К сожалению, погода во время остального путешествия не позволила сделать дальнейших измерений. Полученные результаты показывают, что при благоприятных условиях возможно новый аппарат применять и для измерения силы тяжести на пароходах.

В 1926 году Голландский Геодезический Комитет предполагает организовать поездку на о. Яву через анамский канал, что позволит произвести измерения силы тяжести в целом ряде пунктов, чрезвычайно интересных в гравитационном отношении ¹⁾.

¹⁾ Во время печатания настоящей статьи появилось сообщение в *Nature* 117, № 2953, что это путешествие уже состоялось.