

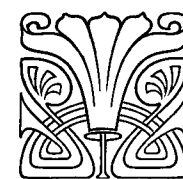
X 304 e. h.

Первый рядъ

наблюдений съ горизонтальными
маятниками въ Юрьевѣ

надъ деформациями земли подъ вліяніемъ
луннаго притяженія.

А. Я. Орловъ.



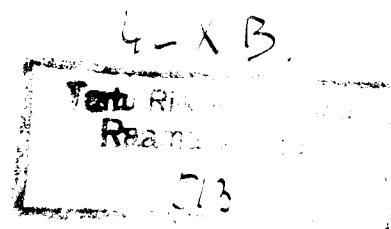
117580.

Юрьевъ.

Типографія К. Маттисенъ.

1911.

Кол. 30к.



Первый рядъ наблюдений съ горизонтальными маятниками въ Юрьевѣ надъ деформациями земли подъ вліяніемъ луннаго притяженія.

I. Введеніе.

§ 1. Три рода астрономическихъ наблюдений приводятъ къ мысли о томъ, что землю нельзя считать неизмѣняемымъ твердымъ тѣломъ:

1. наблюдение морскихъ приливовъ и отливовъ;
2. наблюдения надъ колебаніемъ полюсовъ;
3. наблюдение надъ отклоненіями отвѣса подъ вліяніемъ луннаго притяженія.

Дѣйствительно, приливныя волны океана имѣютъ лишь $\frac{2}{3}$ той амплитуды, которую онѣ должны были бы имѣть при абсолютно твердой землѣ; вмѣсто эйлерова періода колебаній полюса наблюдены широты даютъ чандлеровъ періодъ; наконецъ, маятники, подъ вліяніемъ луннаго притяженія, совершаютъ приблизительно $\frac{2}{3}$ того размаха, который былъ бы при абсолютно твердой землѣ. Всѣ эти явленія объясняются тѣмъ, что земля не есть неизмѣняемое тѣло, какъ это обыкновенно допускаютъ: она способна довольно сильно деформироваться.

Наши наблюденія относятся къ третьей изъ перечисленныхъ выше категорій: они произведены съ горизонтальными маятниками Цельнера, которые еще ни разу не примѣнялись для систематическихъ наблюдений надъ колебаніями отвѣса: въ виду этого, мы позволяемъ себѣ остановиться здѣсь какъ на способахъ опредѣленія инструментальныхъ постоянныхъ, такъ и на способѣ обработки наблюдений. Изложеніе этихъ способовъ и примѣненіе ихъ къ нашимъ наблюденіямъ и составляетъ предметъ настоящаго сочиненія. Кромѣ того, мы приводимъ здѣсь описаніе маятниковъ Цельнера и излагаемъ краткую ихъ исторію.

§ 2. Такъ называемый горизонтальный маятник Цельнера былъ построенъ тремя учеными независимо другъ отъ друга и въ разные времена, а именно, студентомъ Динглеромъ [Dingler's polytechn. Journal 1832 В. 43], французскимъ ученымъ Перро [С. R. Т. 54 1862] и известнымъ физикомъ Цельнеромъ [Annalen der Physik und Chemie 1873], отъ котораго маятникъ и получилъ свое названіе. Маятники у всѣхъ трехъ ученыхъ имѣютъ совершенно одинаковое устройство. Это стеклянный или металлическій стержень съ грузомъ на одномъ концѣ; за другой конецъ стержень удерживается почти въ горизонтальномъ положеніи двумя тонкими нитями, изъ которыхъ одна идетъ вверхъ, другая внизъ. У Цельнера этотъ маятникъ такъ быстро и сильно мѣнялъ свое положеніе равновѣсія, что Цельнеръ рѣшилъ замѣнить проволоки тонкими стальными полосками, которыя должны были удерживать маятникъ въ опредѣленномъ направленіи, не мѣшая ему совершать малыхъ колебаній. Всѣ три названные ученые считали описанный маятникъ самымъ подходящимъ инструментомъ для наблюденія лунно-солнечнаго притяженія, а Цельнеръ высказалъ даже надежду, что въ будущемъ горизонтальные маятники дадутъ возможность опредѣлять массы луны и солнца, ихъ параллаксы и даже скорость распространенія силы тяжести.

Въ 1881 году маятникъ Цельнера подвергся критикѣ со стороны братьевъ Дарвиновъ; они признали этотъ маятникъ мало пригоднымъ для наблюденій надъ лунно-солнечнымъ притяженіемъ, а самыя наблюденія преждевременными. Максимальное отклоненіе отвѣса подъ вліяніемъ притяженія луны едва достигаетъ въ нашихъ широтахъ 0,01; такую величину Дарвины считали невозможнымъ опредѣлить съ приборомъ Цельнера, гдѣ положеніе равновѣсія непрерывно мѣняется даже при пружинахъ. [Report of the Br. Association 1881 и 1882]. Замѣчанія Дарвиновъ были, однако, плохо обоснованы. Уже въ 1892 г. Робертъ-Пашвицъ показалъ полную возможность наблюдать вліяніе луннаго притяженія на горизонтальный маятникъ, если только примѣнить для наблюденій фотографическую регистрацію и обработать затѣмъ записи по правиламъ гармоническаго анализа, какъ это дѣлается при изученіи мареографическихъ кривыхъ. Наблюденія свои Робертъ-Пашвицъ велъ не съ Цельнеровскими приборами, а съ горизонтальнымъ маятникомъ, имъ самимъ изобрѣтеннымъ. Этотъ новый маятникъ имѣетъ видъ треугольной дверцы, подвѣшенной для уменьшенія тренія на остряхъ. Наблюденія Робертъ-Пашвица съ его маятниками повторили Кортацци въ Николаевѣ [Извѣстія Рус. Астр. Общ. Вып. IV 1895 и V 1896], Элертъ въ Страсбургѣ [Beiträge zur Geoph. В. III] Швейдаръ въ Гейдельбергѣ [Beiträge zur Geoph. В. VII] и Геккеръ въ Потсдамѣ [O. Hecker. Beobachtungen an Horizontalpendeln etc. 1907]. Всѣ эти наблюденія согласно привели къ тому заключенію, что горизонталь-

ный маятникъ Робертъ-Пашвица отклоняется подъ вліяніемъ луннаго притяженія значительно меньше, чѣмъ даетъ теорія въ предположеніи абсолютно твердой земли. Отношеніе наблюдаемаго отклоненія къ вычисленному колеблется отъ 0.4 до 0.8, что составляетъ въ среднемъ около $\frac{2}{3}$. Кромѣ того, у Геккера это отношеніе въ значительной степени зависитъ отъ азимута, въ которомъ установленъ приборъ. Этотъ послѣдній результатъ пуждается, однако, въ провѣркѣ.

§ 3. Какъ мы видимъ, всѣ наблюденія, сдѣланныя до сихъ поръ, произведены съ маятниками на шпичахъ, а маятники Цельнера снова были почти забыты. Только въ 1899 г. проф. Г. В. Левницкій рѣшилъ сравнить маятники Робертъ-Пашвица съ маятниками Цельнера. Для этой цѣли въ старомъ пороховомъ подвалѣ, врытомъ далеко въ гору, на которой стоитъ Юрьевская обсерваторія, были поставлены рядомъ маятники той и другой конструкціи. Это сравненіе дало замѣчательный результатъ. Оказалось, что маятники Цельнера имѣютъ цѣлый рядъ преимуществъ передъ маятниками Робертъ-Пашвица. Преимущества эти слѣдующія:

1. Простота устройства маятника Цельнера.
2. Независимость періода малыхъ колебаній отъ амплитуды.
3. Большее постоянство положенія равновѣсія, или, какъ говорятъ, большее постоянство нуль-линіи.
4. Большая чувствительность.
5. Большее постоянство чувствительности.

Послѣ того, какъ этотъ результатъ былъ полученъ, горизонтальные маятники Цельнера были установлены еще въ Ташкентѣ, Иркутскѣ, Баку и Балаханахъ; однако, до сихъ поръ вездѣ эти маятники примѣнялись только для регистраціи землетрясеній, и лишь въ началѣ 1909 года мы сдѣлали первые опыты примѣненія ихъ къ наблюденію лунно-солнечнаго притяженія. Предварительные результаты этихъ наблюденій напечатаны въ Изв. Импер. Ак. Наукъ 1910 г. (май).

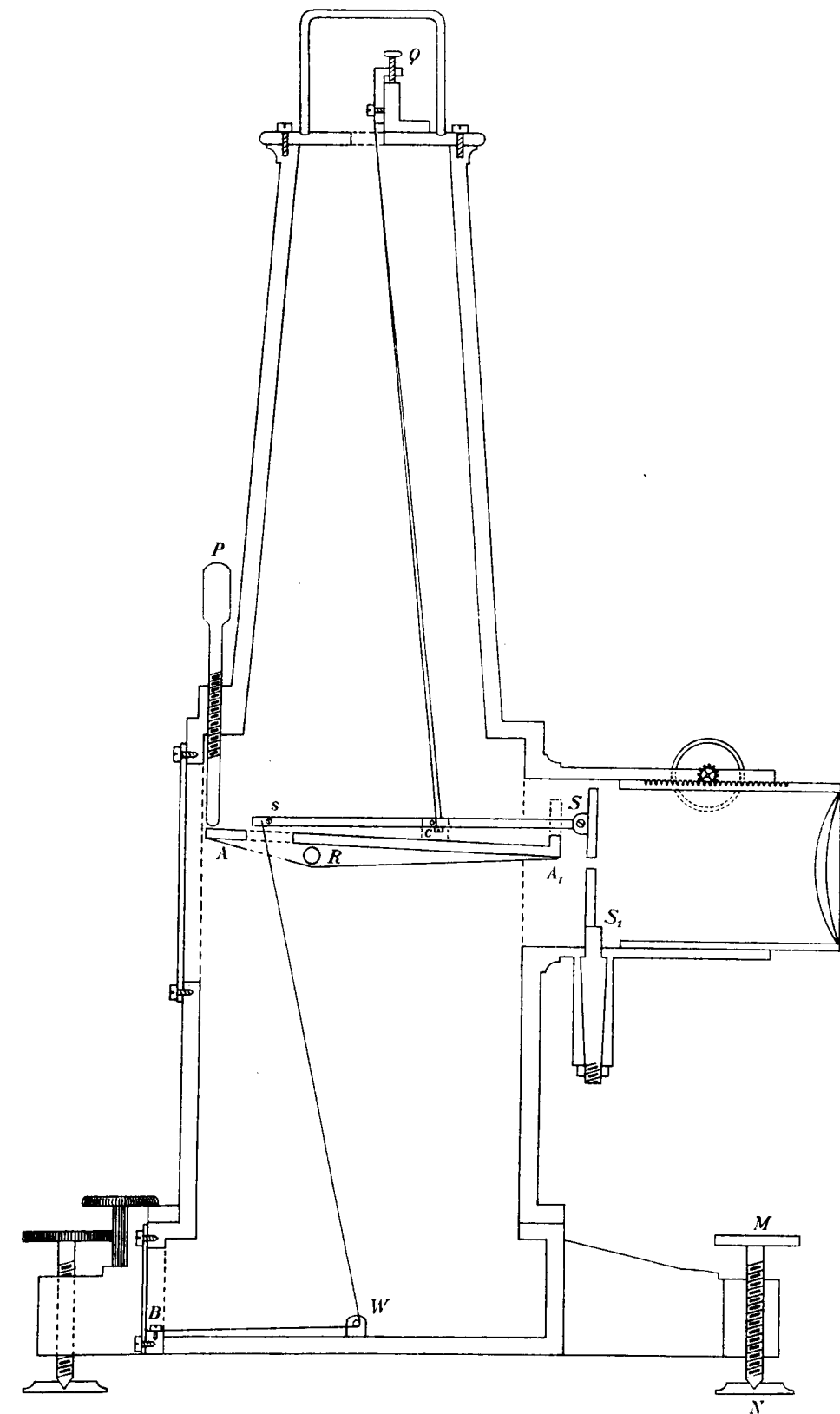
Юрьевскіе горизонтальные маятники построены известнымъ механикомъ Репсольдомъ по указаніямъ Г. В. Левницкаго. Схематически нашъ маятникъ изображенъ на рисункѣ 1. Къ верхнему и нижнему основанію полагая усѣченного чугуннаго конуса прикрѣплены тонкія платиновыя проволоки діаметромъ 0,005. Эти проволоки поддерживаютъ латунный стерженецъ, длиною въ 16 см. Всѣмъ этого стержня съ зеркаломъ, прикрѣпленнымъ къ его концу для фотографической регистраціи, равенъ 26 гр. Одинъ конецъ нижней проволоки зажать въ расщелинѣ стержня; другой конецъ этой проволоки перекинуть черезъ валъ II и закрѣпить винтомъ В. Верхняя нить перекинута черезъ стержень маятника, къ которому она прикрѣплена винтикомъ С, такъ что съ оба конца идутъ вверхъ и при-

жимаются пластинкой къ небольшому выступу, сдѣланному на верхнемъ основаніи чугуннаго конуса. Этотъ выступъ съ нитью можно перемѣщать вверхъ и внизъ съ помощью винта Q . Когда маятникъ подвѣшенъ, то нижняя нить прижимается внизу къ неподвижному выступу, которымъ оканчивается валикъ W ; для этой цѣли служитъ пластинка, которая можетъ только скользить вдоль по цилиндрическому валику W . При такомъ способѣ подвѣски, проволоки не имѣютъ сгибовъ у точекъ прикрѣпленія. Длина верхней, двойной нити равна 30 см.; длина нижней — 15 см. Расстояние между точками прикрѣпленія нитей на стержнѣ равно 7 см.

Изъ приведеннаго описанія видно, что конусообразный штативъ является въ то же время и козлакомъ, предохраняющимъ маятникъ отъ вѣшнихъ вліяній. Чтобы имѣть доступъ къ маятнику, въ штативѣ сдѣланы три окошечка, закрываемыя привинчивающимися крышками. Спереди, передъ зеркаломъ маятника, къ штативу привинчена трубка съ длиннофокуснымъ объективомъ. Регистрація колебаній маятника производится обычнымъ способомъ: въ фокусѣ объектива находится освѣщенная газовой горѣлкой щель; лучи свѣта проходятъ черезъ объективъ и, отражаясь отъ зеркала маятника, снова собираются въ фокусѣ объектива; здѣсь поставлена цилиндрическая линза, обращающая свѣтящееся изображеніе щели въ яркую точку, которая падаетъ уже на фотографическую бумагу, натянутую на барабанъ регистрирнаго аппарата. На этой бумагѣ получались у насъ слѣды отъ трехъ свѣтящихся точекъ: двѣ точки — отъ двухъ маятниковъ, установленныхъ взаимно перпендикулярно; третья же точка получалась отъ зеркала, неизмѣнно связаннаго со штативомъ маятника. Это зеркало давало на бумагѣ прямую линію, относительно которой и производились затѣмъ измѣренія ординатъ кривыхъ, выписываемыхъ маятниками. Чтобы получить на барабанѣ регистрирнаго аппарата свѣтящіяся точки сразу отъ обоихъ маятниковъ, передъ однимъ изъ нихъ ставится зеркало подъ угломъ въ 45° къ направленію луча свѣта.

Подъ стержнемъ маятника находится пластинка съ двумя вилочками. Эта пластинка помощью винта A вращается вокругъ горизонтальной оси и служитъ для арретирования маятника. Последний подхватывается сначала передней вилкой и затѣмъ серединой своей ложится на другую маленькую вилку арретира.

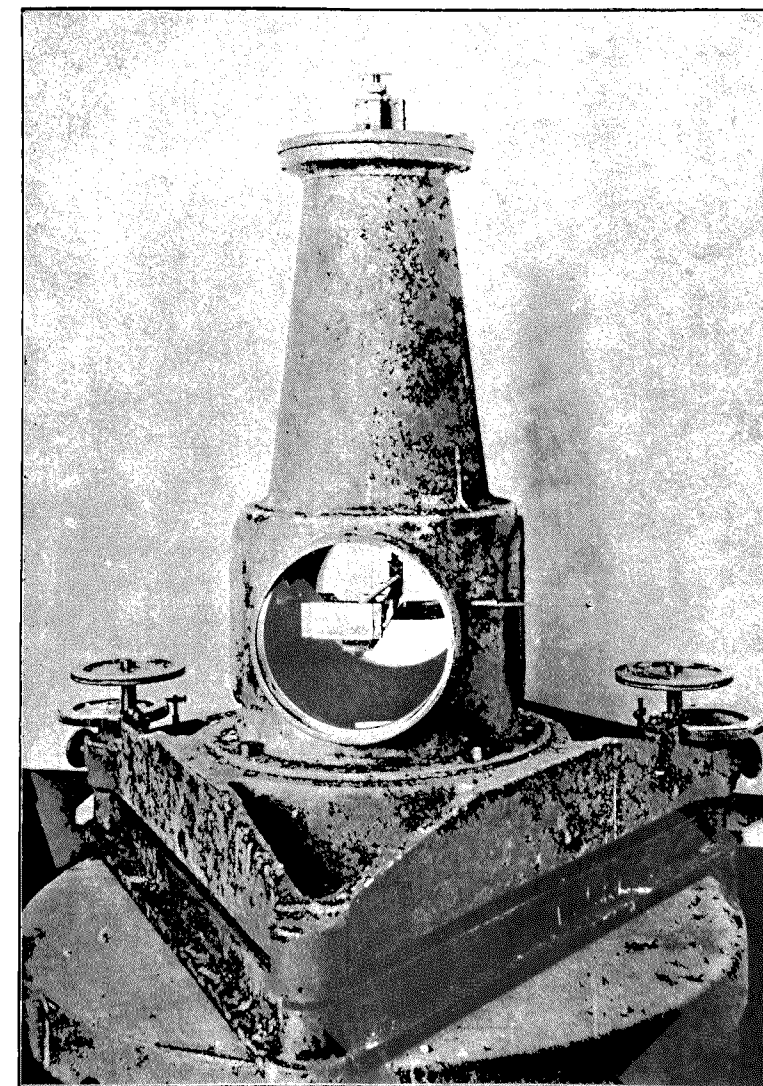
Штативъ у маятниковъ репсольдовой работы имѣетъ только два установочныхъ винта: впереди подъ объективомъ онъ упирается на штифтъ. (См. рис. II.) Отсутствие третьяго установочнаго винта является, по нашему мнѣнію, главнымъ недостаткомъ описаннаго маятника. Большія неудобства представляетъ также трудность доступа къ маятнику, такъ какъ окошечки въ штативѣ сдѣланы слишкомъ малыми. Нѣтъ также приспособ-



Горизонтальный маятникъ Цельнера-Репсольда.

- sS — стержень маятника, оканчивающійся зеркаломъ S .
- AA_1 — арретиръ, вращающійся около горизонтальной оси R .
- P — винтъ для подниманія и опусканія арретира.
- S_1 — неподвижное зеркало, имѣющее приспособленія для его вращенія вокругъ горизонтальной и вертикальной осей.
- MN — винтъ съ тонкой нарезкой, раздѣленной головкой и съ неподвижнымъ индексомъ; послѣдній на рисункѣ не изображенъ.

Рис. II.



Горизонтальный маятникъ безъ объектива.

соблеіія для передвиженія объектива, что затрудняетъ установку свѣтящихся точекъ по фокусу.

Время на діаграммахъ отмѣчается тѣмъ, что каждый часъ свѣтъ фонаря автоматически закрывается ширмочкой на нѣсколько секундъ, вслѣдствіе чего линіи на діаграммѣ получаются прерывистыми. Иногда отмѣтки времени устраиваются такъ, что закрывается лишь свѣтъ, идущій отъ неподвижнаго зеркала: этотъ способъ кажется намъ весьма неудобнымъ. Если же линіи получаются съ перерывами, какъ у насъ, то сразу видно какое мѣсто кривой, выписываемой маятникомъ, соответствуетъ моменту, когда свѣтъ закрылся: въ противномъ случаѣ, нужно перерывъ постоянной линіи проектировать на линію маятника, что влечетъ за собой различныя ошибки и затрудняетъ измѣренія. Длина часа на валѣ у насъ равна 15 mm.

Послѣ первой серіи наблюденій мы сдѣлали у нашихъ маятниковъ нѣсколько передѣлокъ, о которыхъ будетъ сказано ниже.

§ 4. Помѣщеніе, въ которомъ устанавливаются маятники, должно быть выбрано съ особенной тщательностью. Въ Лейпцигѣ Цельнеръ установилъ свои маятники въ подвалѣ университета на глубинѣ почти двухъ сажень; несмотря на это, маятники сильно отклонялись въ сторону, когда во второмъ этажѣ въ аудиторію собирались студенты. Въ Юрьевѣ, какъ было уже сказано, маятники установлены въ старомъ погребѣ, врытомъ въ середину горки, гдѣ стоятъ обсерваторія, анатомическій театръ и другія университетскія зданія. Стѣны большой камеры погреба, гдѣ именно и помѣщаются горизонтальные маятники, нѣсколько толще сажени: эта камера со всѣхъ четырехъ сторонъ окружена корридормъ, толстыя внѣшнія стѣны котораго находятся прямо въ землѣ; только съ сѣвера внѣшняя стѣна, толщиною въ сажень, остается открытой. Температура погреба въ теченіе года мѣняется въ предѣлахъ лишь двухъ градусовъ. Недостаткомъ нашего погреба является очень большая сырость. Это обстоятельство нѣсколько затрудняетъ наблюденія. Долгое время нельзя было достигнуть хорошихъ изображеній свѣтящихся точекъ на валѣ регистрирнаго аппарата, такъ какъ для этого нужно было имѣть узкую щель у фонаря: когда сужали щель, то влага быстро собиралась въ пей и совсѣмъ закрывала свѣтъ. Теперь механику Б. А. Мессеру удалось устранить этотъ недостатокъ тѣмъ, что пластинки, образующія щель сдѣланы изъ эбонита, а самая щель открыта снизу; кромѣ того, у самой щели впаяна трубка, другой конецъ которой выходитъ надъ пламенемъ горѣлки; вслѣдствіе этого около щели образуется тяга, и влага собратся уже не можетъ. Теперь щель фонаря можно сузить, какъ угодно.

Рѣдкаязда надъ погребомъ совершенно не передается на маятники. Наши наблюденія показали кромѣ того, что всякія внѣшнія вліянія, напримѣръ, сильныя измѣненія внѣшней температуры, оказываютъ у насъ

меньшее дѣйствіе на маятники, чѣмъ въ извѣстномъ потсдамскомъ колодцѣ, гдѣ маятники были установлены на глубинѣ 12 сажень. Полъ нашего погреба находится приблизительно на 6 сажень выше центральной части Юрьева: обсерваторія приблизительно настолько же выше пола погреба; она стоитъ нѣсколько въ сторонѣ, а не надъ самымъ погребомъ.

II. Собственное движеніе горизонтальнаго маятника и опредѣленіе его постоянныхъ.

§ 5. Подъ собственнымъ движеніемъ маятника разумѣютъ тѣ колебанія, которыя совершаетъ маятникъ послѣ толчка подѣ влияніемъ силы тяжести. Уравненіе этого движенія выводится очень просто.

Возьмемъ прямоугольную систему координатъ $OXYZ$ съ началомъ въ точкѣ пересѣченія оси вращенія маятника AB съ перпендикуляромъ, опущеннымъ на эту ось изъ центра тяжести, K , маятника. Ось OZ пусть совпадаетъ съ осью вращенія AB , а ось OX съ перпендикуляромъ OK . Проекціи силы тяжести на оси OX , OY и OZ будутъ соответственно равны:

$$mg \sin i, \quad 0, \quad -mg \cos i,$$

гдѣ m есть элементъ массы, g ускореніе силы тяжести мѣста наблюденія, а i — очень малый уголъ между осью OZ и вертикальной линіей. Пусть C есть моментъ инерціи маятника вокругъ оси AB ; θ — уголъ отклоненія маятника отъ положенія равновѣсія, и L — моментъ силы тяжести относительно оси вращенія, тогда

$$C \frac{d^2 \theta}{dt^2} = L = -\sum mgy \sin i.$$

Здѣсь m есть элементъ массы маятника съ координатами x, y, z , а суммированіе распространено на все тѣло маятника. Обозначимъ, далѣе, черезъ ξ, η, ζ координаты того же элемента относительно осей, неизмѣнно связанныхъ съ тѣломъ маятника, причемъ ось $O\xi$ пусть совпадаетъ съ осью OZ , а ось $O\eta$ проходитъ черезъ центръ тяжести маятника. Мы имѣемъ:

$$\left. \begin{aligned} x &= \xi \cos \theta - \eta \sin \theta \\ y &= \xi \sin \theta + \eta \cos \theta \end{aligned} \right\} \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad (1)$$

Соотвѣтственно нашему выбору координатъ,

$$\sum m\eta = 0, \quad \sum m\xi = Ml,$$

гдѣ M есть масса маятника, а l разстояніе его центра тяжести отъ оси вращенія. Слѣдовательно:

$$L = -Mlg \sin i \sin \theta$$

и

$$\frac{d^2 \theta}{dt^2} + \frac{Ml}{C} g \sin i \sin \theta = 0$$

Ограничиваясь, затѣмъ, случаемъ весьма малыхъ колебаній и полагая

$$\frac{Ml}{C} = l_0, \quad l_0 g \sin i = n^2,$$

получаемъ:

$$\frac{d^2 \theta}{dt^2} + n^2 \theta = 0 \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad (2)$$

Собственное движеніе маятника не представляется еще уравненіемъ (2); сюда надо прибавить члены, зависящіе отъ сопротивленія воздуха, дѣйствія проволоки и т. д.; при весьма малыхъ колебаніяхъ эти члены мы можемъ представить суммой

$$\varepsilon \theta + 2k \frac{d\theta}{dt}$$

гдѣ ε и k суть двѣ малыя постоянныя величины, и вмѣсто уравненія (2) мы будемъ имѣть:

$$\frac{d^2 \theta}{dt^2} + 2k \frac{d\theta}{dt} + (n^2 + \varepsilon) \theta = 0.$$

Величина k^2 у насъ исчезающе мала по сравненію съ n^2 , поэтому, интегрируя послѣднее уравненіе, получимъ:

$$\theta = e^{-kt} (A \cos \mu t + B \sin \mu t), \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad (3)$$

гдѣ A и B суть двѣ произвольныя постоянныя, а

$$\mu^2 = n^2 + \varepsilon - k^2.$$

Величиной k^2 обыкновенно мы можемъ пренебречь и принять

$$\mu^2 = n^2 + \varepsilon.$$

Пусть при

$$t = 0, \quad \theta = \theta_0 > 0 \quad \text{и} \quad \frac{d\theta}{dt} = 0,$$