

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ
НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

**Геолого-геофизический факультет
Кафедра геофизики**

А. В. ЛАДЫНИН

**Эталонирование гравиметров
методом наклона**

Методическое пособие

Новосибирск
2010

УДК 550.3 (075):55 (1/9)
ББК Д2 я 73–1
Л.157.

Ладынин А. В. Эталонирование гравиметров методом наклона: Метод. пособие / Новосибирский гос. ун-т. Новосибирск, 2010. 19 с.

Эталонирование гравиметров методом наклона в установке на основе теодолита ОТ-02 является наиболее надежным методом определения цены деления полевых гравиметров. На учебной геофизической практике в Шира определение цены деления гравиметров является важной частью практических занятий по гравиметрии. Соответствующее оборудование и снаряжение имеются, а методического пособия не было.

Дано краткое описание установки УЭГТ (установка эталонирования гравиметров с термостатом) – комбинации установки УЭГП-1 и двухступенчатого термостата ТЭГ-2.

В такой установке определяется не только цена деления гравиметра, как это делается на эталонных полигонах, но также ее нелинейность в пределах шкалы микрометра и ее зависимость от температуры.

Отмечены важные для практики детали юстировки установки и гравиметра в ее термостате, приведена оптимальная схема измерений, их технология и основы обработки данных эталонирования.

Пособие предназначено студентам-геофизикам 2 курса, проходящим практику по геофизике. Оно может быть полезно специалистам производственных организаций, которые также нуждаются в сжатом изложении основных приемов работы с установкой эталонирования полевых гравиметров.

© Новосибирский государственный университет, 2010
© А. В. Ладынин, 2010

Предисловие

Эталонирование методом наклона является наиболее надежным методом определения цены деления полевых гравиметров. На учебной геофизической практике в Шира определение цены деления гравиметров входит в план практических занятий по гравиметрии. Соответствующее оборудование имеется. Заводское "Техническое описание и инструкция по эксплуатации УЭГП-1" недавно утрачено; оно, впрочем, перегружено техническими деталями и в качестве пособия было мало пригодно.

Кварцевые астазированные гравиметры являются относительными приборами: ими измеряются разности значений силы тяжести g в разных точках или в одной точке в разное время; они требуют эталонирования – определения цены деления. Цена деления – это отношение измеряемого значения приращения силы тяжести к разности отсчетов: $C = \Delta g / \Delta S$.

Для эталонирования значение Δg должно быть известно. В методе эталонирования наклоном оно измеряется углом наклона гравиметра $\Delta g = -g \beta^2 / 2$.

Устройство УЭГТ

Установка УЭГТ (термостатированная установка эталонирования гравиметров) – это комбинация установки УЭГП-1 (установка эталонирования гравиметров полевая, 1 модель) или теодолитной части гравиметра ГАГ-2 (геодезический астазированный

гравиметр, модель 2) и двухступенчатого электрического термостата для гравиметра ТЭГ-2.

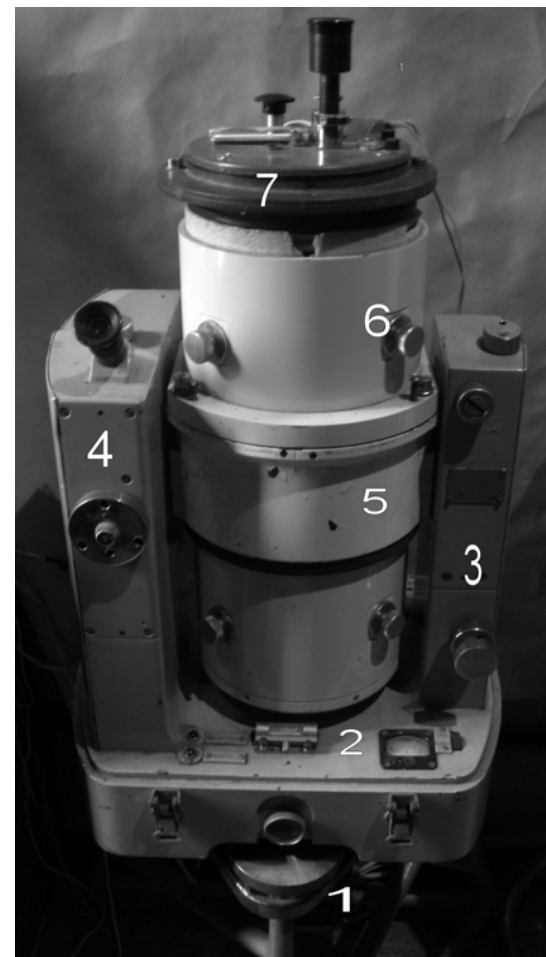


Рис. 1. Установка эталонирования гравиметров с термостатом в сборе. Цифры: 1 – тренога и винт регулировки продольного уровня; 2 – станина теодолита с поперечным уровнем; 3 – колонна изменения наклона с микрометром (внизу); 4 – колонна измерения наклона с окуляром и микрометром (внизу); 5 – кольцо-держатель гравиметра с термостатом; 6 – внешний стакан с винтами крепления гравиметра; 7- кольцо крепления гравиметра

В установке определяется цена деления гравиметра, ее нелинейность в пределах шкалы микрометра и ее зависимость от температуры. В нее помещаются любые гравиметры серии ГНУ (гравиметр наземный узкодиапазонный), в том числе модели ГНУ-КВ, ГНУ-КС, ГНУ-К2 и др., а также гравиметры дру-

гих моделей, если диаметр стакана гравиметра (без внешнего корпуса и сосуда Дюара) равен 82 ± 5 мм.

Эталонирование гравиметров, не соответствующих этим условиям, может быть выполнено с помощью комплекса этой установки и наклоняемой плиты с прецизионным винтом подъема. Установка в этом случае служит для калибровки плиты. Таким образом, в частности, был эталонирован приливный гравиметр GS-15 фирмы “Askania”.

Базой установки (и гравиметра ГАГ-2) служит станина теодолита ОТ-02 (оптический теодолит с отчетной точностью $0,2''$) с вертикальным кругом; горизонтального круга нет. На рис. 1 показан общий вид гравиметра в установке УЭГТ с двухступенчатым термостатом ТГ-2. Установка УЭГТ крепится на массивной треноге-подставке (1). Она имеет арретирное устройство: поворот рычага освобождения арретира производится до выполнения измерений.

Гравиметр в установке размещается так, чтобы направление наклона, достигаемого вращением винта установки (рис. 1, 3) совпадало с осью поперечного уровня гравиметра. Это условие вызвано тем, что отечественные гравиметры перечисленных выше типов имеют нелинейную зависимость чувствительности от угла наклона, причем в одном из крайних положений чувствительность становится практически бесконечной; маятник гравиметра (блик) невозможно зафиксировать в горизонтальном положении (в сере-

дине окулярной шкалы). От наклона по поперечному уровню чувствительность зависит мало.

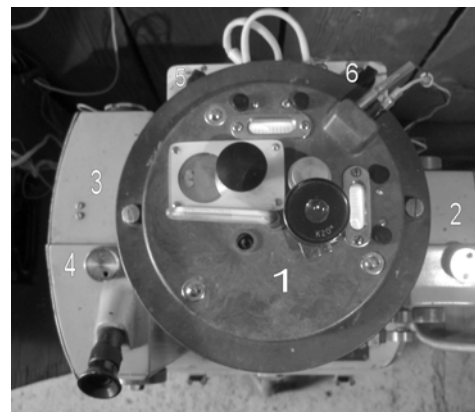


Рис.2. Гравиметр в установке эталонирования (вид сверху). Цифры: 1 – панель гравиметра; 2 – колонна изменения наклона с ручкой разъединения гравиметра и лимба; 3 – колонна измерения наклона; 4 – ручка переустановки лимба без изменения наклона; 5 – плата термостата и регулятор режима внешнего термостата; 6 – регулятор режима внутреннего термостата

ба без изменения наклона; 5 – плата термостата и регулятор режима внешнего термостата; 6 – регулятор режима внутреннего термостата

Термостат предназначен для стабилизации температуры гравиметра, помещенного в установку. Он снабжен выносным коммуникатором и индикатором режима работы, который подключается к источнику постоянного тока БТ-8, питаемому от сети 220 В (рис. 3). Нагревание термостата производится посредством проволочной спирали. Обогреватель первой ступени размещен во внешнем стакане, который крепится во внешнем стакане тремя парами винтов, которые расположены друг над другом и под углами 120° по окружности стакана.

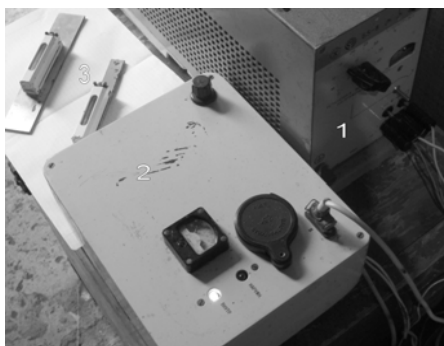
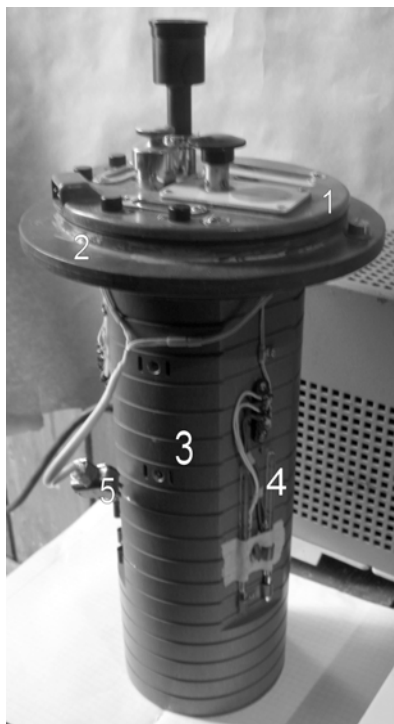


Рис. 3. Обеспечение УЭГТ. Цифры: 1 – блок коммуникации и контроля работы термостата; 2 – блок питания БТ-8; 3 – накладные уровни

Обогреватель второй ступени крепится в пазах металлического внутреннего стакана, в который помещается эталонируемый гравиметр (без сосуда Дюара и внешнего светоотражающего корпуса). Спирали замыкают контактные термометры.



Гравиметр крепится во внутреннем стакане термостата тремя парами винтов (рис. 4); они расположены по той же схеме, как на рис. 1, – 120° между парами по окружности, в паре один над другим.

Рис. 4. Гравиметр во внутреннем стакане термостата. Цифры: 1 – плата гравиметра; 2 – крепежное кольцо; 3 – стакан ми с бороздками нагревательной спирали и винтами крепления гравиметра в термостате; 4 – контактные термометры; 5 – вилка внутреннего термостата

Юстировка установки

Чтобы обеспечить высокую точность определения цены деления гравиметра, необходимо выполнить некоторые регулировки:

1. Подставка-тренога должна прочно стоять на жестком основании, ее верхняя плита должна быть горизонтальной – это можно оценить с помощью накладного уровня (рис. 3, 3).

2. Ось вращения теодолита должна быть горизонтальной – это тоже проверяется накладным уровнем. Перед проверкой нужно вынуть внешний стакан термостата из кольца-держателя гравиметра, выкрутив шесть винтов крепления стакана термостата и сняв их держатели (рис. 1, 6). Каждый держатель прикреплен к внешнему стакану тремя винтиками.

На рис. 5 показано кольцо-держатель в станине теодолита ОТ-02; в этой части УЭГП-1 и ГАГ-2 не отличаются.

Рис. 5. Корпус установки (гравиметра ГАГ-2) без эталонируемого гравиметра и термостата. Цифры: 1 – станина; 2 – колонна изменения наклона; 3 – измерительная колонна, 4 – кольцо-держатель гравиметра в установке



Кольцо-держатель гравиметра устанавливается горизонтально в два этапа с помощью накладного уровня. Сначала устанавливаем его горизонтально поперек оси вращения винтом наклона теодолита (рис. 1, 3). Накладной уровень кладем поверх кольца по его диаметру, перпендикулярному оси вращения, приводим уровень в горизонт (вращением винта наклона теодолита), поворачиваем уровень на 180° вокруг его вертикальной оси. Если пузырек уровня отклонился от нулевого положения, значит, уровень надо отрегулировать. Регулировочным винтом уровня смещаем его пузырек на $\frac{1}{2}$ отклонения, а остальную часть отклонения убираем винтом наклона теодолита. Проверяем результат: в обоих положениях накладного уровня пузырек должен быть в середине; допускается отклонения не более $\frac{1}{2}$ деления уровня.

Второй этап – определение отрегулированным накладным уровнем горизонтальности оси теодолита. При отклонении накладного уровня от нулевого положения его приводят в горизонт подъемными винтами установки, а затем, если потребуются, регулируют уровень установки по той же схеме, как при регулировке накладного уровня.

3. При креплении гравиметра во внутреннем стакане термостата надо соблюдать последовательность закручивания винтов, чтобы не перекосить гравиметр: сначала по очереди закручивать каждую пару винтов на три оборота, затем в том же порядке добавить еще по три оборота, наконец, в том же порядке закрутить винты до отказа.

4. Внутренний стакан термостата с закрепленным в нем гравиметром помещается во внешний стакан термостата с ориентировкой продольного уровня гравиметра по направлению горизонтальной оси вращения теодолита и закрепляется шестью винтами крепления термостата. Гравиметр нивелируется по уровням. Затем положение гравиметра уточняется таким образом. Поворачиваем винт наклона теодолита на большой угол; поперечный уровень уходит от нулевого положения. Если при этом значительно смещается и продольный уровень, после восстановления уровней в горизонте поворачиваем гравиметр на небольшой угол, добиваясь, чтобы при следующем такой испытании смещение продольного уровня было меньше. Возможен более сложный вариант уточнения ориентировки гравиметра – по направлению минимального изменения чувствительности гравиметра к наклону [1]. Это направление соответствует наклону в плоскости поперечного уровня, так как в этом случае чувствительность изменяется мало. Если же ориентировка нарушена, прибор наклоняется и по продольному уровню, а здесь чувствительность сильно зависит от наклона.

5. Следующий этап – регулировка уровней гравиметра нужен потому, что при закреплении его в установке неизбежны деформации корпуса гравиметра относительно платы и смещение уровней. Эта регулировка выполняется после введения гравиметра в режим стабильности термостата.

Продольный уровень гравиметра, параллельный оси вращения теодолита, регулируют подъемными винтами установки. Порядок измерений такой же, как в обычной проверке поперечного уровня гравиметра. В регулировке есть важные детали. Если уровень сбит, ставят наклон, соответствующий вершине параболы и подгоняют уровень в ноль его регулировочными винтами; затем нивелируют установку по уровню (рис. 1, 2) и подправляют уровень гравиметра регулировочными винтами на кольце-держателе. Теперь гравиметр готов к эталонированию.

Схемы и техника измерений

Порядок измерений определяется задачей эталонирования.

Если требуется определить температурный коэффициент цены деления, серия приемов эталонирования выполняется при одной температуре, затем термостаты переключаются на более высокую температуру и после стабилизации режима термостатов выполняется другая серия приемов. В каждом приеме цена деления определяется в одинаковом и возможно большем интервале шкалы микрометра гравиметра.

Если нужно (для высокоточных наблюдений) оценить нелинейность микрометра, измерения выполняются на каждом целом делении по всей шкале микрометра (детали этого способа см. в работе [2]).

Для обычного ежегодного контроля цены деления применяется наиболее простая схема. Суть ее

видна из записи приема эталонирования в журнале (табл. 1).

Гравиметр № 568

Таблица 1

Прием 3	МГ 95°36'23,0"			
Отсчет		β^+		β^-
2	1	96°02'57,0"	4	95°10'09,3"
12	2	96°22'51,2"	3	95°36'23,5"
$T = 23^\circ$	МГ 95°36'19,2"			

Здесь МГ – место горизонта, отсчет теодолита при нулевом положении поперечного уровня гравиметра; β^+ и β^- – углы при увеличении и уменьшении отсчетов теодолита.

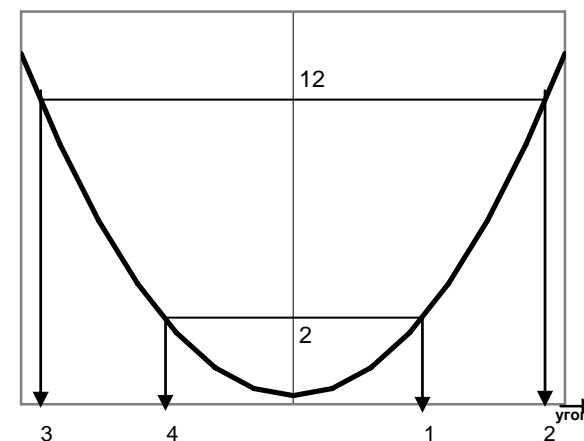


Рис. 6. Параболическая зависимость отсчетов от угла наклона, положение отсчетов и порядок измерений (цифры внизу)

Такая схема измерений позволяет при обработке данных автоматически исключать смещение нуля-пункта гравиметра, если оно невелико и линейно, а измерения распределены равномерно по времени.

Эти условия довольно хорошо выполняются, так как в стационарном режиме термостата и при отсутствии механических воздействий не имеется оснований предполагать сколько-нибудь сложный закон изменения смещения нуля-пункта гравиметра.

Для оценки точности и повышения надежности определения цены деления требуется несколько (n) таких приемов эталонирования; тогда точность цены деления повышается в \sqrt{n} раз.

Каждый прием эталонирования начинается и заканчивается измерением МГ (места горизонта). Это отсчет по теодолиту при нулевом положении уровня. Отсчет состоит в совмещении двойных штрихов шкал противоположных частей лимба (рис. 7).



Рис. 7. Пример отсчета по шкале теодолита

Цена деления шкал – $10'$; в окне видна часть лимба в 2° . Горизонтальная

линия, разделяющая эти две части лимба отсекает в левом окошке шкалы отсчет в минутах и секундах. Длина этой шкалы – $5'$; в окошке видна небольшая ее часть, около $12''$; цена наименьшего деления – $0,5''$. Совмещение штрихов двух частей лимба возможно единственным образом (за исключением отсчета кратного $5'$). Оно достигается вращением измери-

тельной ручки, что ведет к перемещению верхней и нижней частей шкалы в противоположные стороны. Из-за этого сдвигания цена деления основной шкалы равна $5'$. К отсчету по этой шкале, кратному $5'$, ($55^\circ 20'$) добавляются минуты и секунды по шкале в окошке слева ($3'04,5''$).

Измерения при разных наклонах гравиметра включают установку микрометра гравиметра на нужные деления и отсчеты по теодолиту в порядке, указанном в табл. 1 и на рис. 6.

Для отсчета 1 рукоятка наклона вращается против часовой стрелки – в сторону увеличения угла от МГ. Затем микрометр гравиметра ставим на 12 и отсчет 2 получаем вращением ручки наклона в ту же сторону. Далее при отсчете микрометра 12 перекидываем теодолит на другую ветвь параболы, вращая ручку наклона по часовой стрелке – в сторону уменьшения угла – отсчет 3; при этом блик гравиметра сначала уходит от нулевого штриха за пределы окулярной шкалы, а потом возвращается к нулю. Для отсчета 4 ставим микрометр гравиметра на деление 2 и вращаем ручку наклона против часовой стрелки.

Довольно сложная система отсчета по шкале теодолита может приводить к промахам. Чтобы избежать их, следует после записи каждого отсчета проверить его повторным считыванием (без дополнительного вращения микрометра теодолита).

Важным элементом контроля является сравнение отсчетов (табл. 2):

Таблица 2

S	β^+	β^-	Δg	C	$\Delta\beta^+$	$\Delta\beta^-$	МГ
2	96,0344	95,1668	28,125	5,9782	0,3330	0,3331	95,6006
12	96,3677	94,8338	87,907				95,6007

1) полусумма отсчетов по шкале теодолита на каждом делении микрометра гравиметра должна быть равна месту горизонта до и после отсчетов на 2 и 12 (табл. 1)

2) разности углов теодолита на отсчетах 2 и 12 на обеих ветвях параболы должны быть равны; если различие есть и оно сохраняется от приема к приему, это значит, что вершина параболы не совпадает с МГ, требуется дополнительная юстировка поперечного уровня гравиметра;

3) часто причина невыполнения этих условий может быть установлена только в серии приемов; тогда появляются дополнительные критерии – регулярность изменения отсчетов по теодолиту на делениях микрометра 2 и 12 от приема к приему.

Некоторые закономерности и причины нестабильности цены деления гравиметров

Масштабные коэффициенты большинства гравиметров, используемых на практике в Шира, были детально исследованы в 80-е годы прошлого века, а в 2010 г. выполнены измерения цены деления всех гравиметров по изложенной выше схеме (табл. 1, рис. 6).

В работе [1] изложены результаты эталонирования гравиметров методом наклона в установке УЭГТ

и на сертифицированных полигонах – Баксанском и Алма-Атинском. Определены виды нестабильности, способы выявления нестабильности разных видов, вероятные их причины и пути устранения их влияния на результаты гравиметрических наблюдений.

Выявлены следующие виды нестабильности цены деления гравиметров:

а) зависимость цены деления от температуры кварцевой системы;

б) непостоянство цены деления в пределах диапазона микрометра (нелинейность шкалы);

в) зависимость цены деления от давления воздуха в корпусе кварцевой системы;

г) изменение цены деления во времени из-за нестабильности упругих свойств материала системы (плавленого кварца) или прогрессирующего повышения давления в корпусе кварцевой системы.

Каждый вид нестабильности цены деления гравиметров требует специальной схемы измерений.

Температурная зависимость цены деления определяется по общей при различной температуре – летом 23, 35 и 40°, зимой 5, 23 и 35°. Так как изменений температурных коэффициентов цены деления во времени или в зависимости от температуры не обнаружено, полная характеристика цены деления включает значение цены деления при 0, $C(0)$, и температурного коэффициента $dC / C(0) dT$.

Температурные коэффициент кварцевых гравиметров имеют порядок 10^{-3} и совпадают по знаку с

ценой деления. Это объясняется увеличением жесткости кварца с повышением температуры.

Изучение нелинейности шкалы проводится при фиксированной температуре по симметричной схеме наблюдений. Значения углов наклона измеряются на всех целых отсчетах микрометра гравиметра. В УЭГТ ввиду стабильной температуры прибора и отсутствия вибраций смещение нуля-пункта гравиметра, как правило, невелико и линейно, что позволяет использовать тот же принцип автоматического учета смещения нуля-пункта, как в схеме (табл. 1, рис. 6).

В большинстве случаев нелинейность шкалы не превышает $3 \cdot 10^{-3}$. Отдельные приборы имеют значительную нелинейность на краях шкалы, из-за чего обычно не рекомендуется работать на отсчетах меньше 2 и больше 13. Причинами нелинейности являются: а) малый запас хода винта микрометра – для нелинейности на краях шкалы; б) недостаточная чистота нарезки винта и сборки микрометра, с чем связаны не очень устойчивые (от приема к приему эталонирования) выскоки на некоторых делениях шкалы над уровнем погрешности $3 \cdot 10^{-3}$. Неустойчивость поправки за нелинейность шкалы, вероятно, вызванная перемещением микрочастиц в винте микрометра, снижает возможность повышения точности измерений за счет учета этой поправки.

Изменение цены деления гравиметров во времени обусловлены двумя причинами:

а) изменением упругих свойств измерительной пружины – старение плавленого кварца ведет к уве-

личению его жесткости и цены деления гравиметра; надежных оценок этого фактора пока нет;

б) прогрессирующей потерей вакуума, повышением остаточного давления воздуха в корпусе измерительной системы. Этот фактор имеет два эффекта разного знака и значимости. Вследствие повышения давления воздуха и архимедовой силы рычага цена деления может увеличиться максимум на $0,5 \cdot 10^{-3}$ [2]. Другой эффект связан с перемещением сильфона микрометра в процессе измерения. Оценки [1, 2] показывают, что по этой причине цена деления может уменьшаться на величину $(5-10) \cdot 10^{-3}$ в зависимости от объема камеры гравиметра (у гравиметров КВГ-1М она вдвое меньше, чем у ГНУ).

Исследование части нашего парка гравиметров, результаты которого опубликованы в [2], показало систематическое уменьшение модуля цены деления на величины $(0,5-5) \cdot 10^{-3}$ в год.

В 2010 г. выполнено эталонирование парка 14 гравиметров. Половина из них обнаружили уменьшение модуля цены деления на $(0,01-0,11) \cdot 10^{-3} \text{ год}^{-1}$, остальные – увеличение на $(0,02-0,08) \cdot 10^{-3} \text{ год}^{-1}$ в среднем за 25 лет (с 1985 г).

Эталонирование [2] проводилось в перерывах между периодами интенсивной работы с гравиметрами. В 2010 г. эталонировались гравиметры, которые эксплуатировались мало, максимум 4–5 дней в году во время учебной практики в Шира.

Причиной этого различия скорости изменения цены деления до и после 1985 г. может быть разная

скорость изменения давления. Она зависит от интенсивности эксплуатации гравиметра: в рейсах гравиметры подвергаются вибрации и неравномерному нагреванию, что снижает степень герметичности корпуса кварцевой системы. На практике в Шира гравиметры находятся в спокойных по температуре и вибрации условиях. Поэтому скорость изменения давления в корпусе гравиметра и цены деления мала, и основной фактор уменьшения цены деления – движение сильфона действует менее эффективно, чем повышение жесткости измерительной пружины, вызывающее увеличение цены деления гравиметра.

Список литературы

Буданов В.Г., Веселов К.Е., Горенблат Н.М., Евдокимов Ю.С. Некоторые причины нестабильности цены деления гравиметров // Прикладная геофизика, 1972, вып. 65. С. 187–192.

Ладынин А. В. Закономерности и причины нестабильности цены деления кварцевых гравиметров // Геология и геофизика, 1990, № 1. С. 111–120.

Эталонирование гравиметров методом наклона / К.Я. Козьякова, В.А. Романюк, Р.Б. Рукавишников и др. // М.: Наука, 1979. 206 с.