

Ю. Д. БУЛАНЖЕ
ПОПРАВКА ПОТСДАМСКОЙ СИСТЕМЫ

Приводятся результаты определения поправки Потсдамской системы относительно новой Международной гравиметрической стандартизированной сети 1971 г. (МГСС-71). Поправка, полученная из относительных определений, оказалась равной -14002 ± 15 *мкГал*. По данным абсолютных определений — 13980 ± 6 *мкГал*. Выявлено систематическое расхождение между значениями поправки, полученной по измерениям на европейских пунктах и на пунктах других континентов, равное 65 ± 18 *мкГал*. Установлено, что нуль системы МГСС-71 (Севр, 1971) смещен на 53 ± 3 *мкГал* по отношению к последним абсолютным определениям.

НЕМНОГО ИСТОРИИ. ФОРМУЛИРОВКА ЗАДАЧИ

Вскоре после переезда Сейсмологического института Академии наук СССР из Ленинграда и Москву в его составе была образована Гравиметрическая лаборатория. Её возглавлял профессор, ныне академик, А. А. Михайлов. В то время работы по гравиметрии только разворачивались. Было плохо с приборами. Их надо было создавать. У нас не было опыта их изготовления. Далеко не все было ясно с методикой самих измерений силы тяжести. Бурное же развитие народного хозяйства требовало интенсивного изучения гравитационного поля Земли как в целях разведки полезных ископаемых, так и для геодезии.

Руководитель лаборатории А. А. Михайлов очень хорошо понимал необходимость совершенствования методики гравиметрических измерений, направленной в первую очередь на повышение точности полевых определений, которые могли бы заложить основу для проведения фундаментальных исследований важнейших свойств гравитационного поля Земли.

Эти работы были начаты в 1936 г. Они продолжились до начала войны и были возобновлены в 1945 г. Если до войны исследования касались только маятниковых методов, то после войны одновременно с маятниками исследовались возможности использования для высокоточных измерений начинавших тогда входить в практику гравиметров. При этом всегда уделялось особое внимание метрологии измерений и разработке методов, наиболее полно учитывающих систематические погрешности, которые не выявлялись из внутреннего согласия измерений.

Именно в это время были опубликованы две известные работы Н. Н. Парийского [1, 2], а несколько позже работа автора [3]. Эти работы положили начало созданию опорной гравиметрической сети в Советском Союзе.

Позже под руководством автора была разработана методика многократных групповых измерений с гравиметрами и были созданы специально для построения опорных сетей оригинальные отечественные гравиметры ГАЭ-2 и ГАЭ-3, затем получивший широкое признание гравиметр ГАГ-2. С помощью этих приборов, несмотря на их сравнительно невысокую точность, удалось в довольно сжатые сроки создать опорную гравиметрическую сеть Советского Союза, точность которой не уступала аналогичным сетям на западе. Эти работы практически были завершены в 1968 г. Созданная сеть полностью удовлетворяла основным потребностям народного хозяйства страны и, в частности, требованиям геодезистов.

В последнее десятилетие были достигнуты поразительные успехи в определении абсолютной величины ускорения силы тяжести. Этими работами была доказана необходимость перехода на новую международную систему, поскольку Потсдамская система, в которой проводились все гравиметрические измерения, содержала ошибку нуля, близкую к 14 *мГал*.

В результате энергичной деятельности Международной гравиметрической комиссии, возглавляемой проф. К. Морелли, была создана новая глобальная гравиметрическая сеть высшей точности, получившая название «IGSN-71» (Международная гравиметрическая стандартизированная сеть 1971 г., МГСС-71) [4].

К настоящему времени число гравиметрических пунктов, определенных в Потсдамской системе, достигает величины порядка $(7—8) \times 10^6$, а прирост их числа, уже в новой системе, составляет не менее 1×10^6 в год. При таком положении со съемками естественно возникает необходимость определения с предельно достижимой точностью поправки Потсдамской системы с тем, чтобы без потери точности иметь возможность редуцировать любые измерения из одной системы в другую.

Необходимость определения этой поправки вызывается еще одним обстоятельством. При уравнивании сети МГСС-71 ее нуль благодаря принятому соотношению весов фактически опирается на один пункт, определенный в Севре профессором Сакумой. Масштаб же системы был задан сравнительно небольшим числом определений, выполненных абсолютным прибором Фаллера и неоднородными и низкими по точности маятниковыми измерениями. К тому же как пункты абсолютных определений, так и маятниковые пункты располагались неравномерно, преимущественно в северном полушарии.

На очередном заседании Международной гравиметрической комиссии в 1970 г. в Париже автор, поддерживая идею перехода на новую систему МГСС-71, внес предложение о выполнении гравиметрических связей Потсдама с пунктами МГСС-71, находящимися на различных континентах. При этом имелось в виду получить поправку Потсдамской системы и проконтролировать МГСС-71. Это предложение было единодушно одобрено.

Учитывая большую научную и практическую значимость этих работ. Межведомственный геофизический комитет при Академии наук СССР принял необходимые меры к их выполнению. Первоначально предполагалось сделать связи Потсдама с Парижем, Теддингтоном, Оттавой, Вашингтоном, Токио, Сиднеем и другими пунктами в Африке и Южной Америке. При этом имелось в виду для выполнения дальних связей использовать хорошо зарекомендовавшие себя маятниковые приборы ЦНИИГАиК [5], а для более близких — гравиметры ГАГ-2 [6], разработанные в Институте физики Земли АН СССР. Однако при реализации намеченных планов пришлось столкнуться со многими пока непреодоленными трудностями.

Вместе с тем по инициативе стран, заинтересованных в уточнении их исходных пунктов, представилась возможность сделать несколько связей, ранее не предусматривавшихся.

ОТНОСИТЕЛЬНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Выполнять гравиметрические связи Потсдама с названными выше пунктами было много проще и дешевле через промежуточный пункт в п. Ледово [7], находящийся в окрестностях г. Москвы. В связи с этим были приняты меры к определению величины силы тяжести в Лёдове в Потсдамской системе с наивысшей точностью. Это было достигнуто многократными маятниковыми и гравиметровыми связями Ледово с Потсда мом. Результаты этих измерений изложены в [8]. Для Ледово, марка 5035, была получена величина g в Потсдамской системе, оказавшаяся равной

$$g = 981\,565\,327 \pm 10 \text{ мкГал}$$

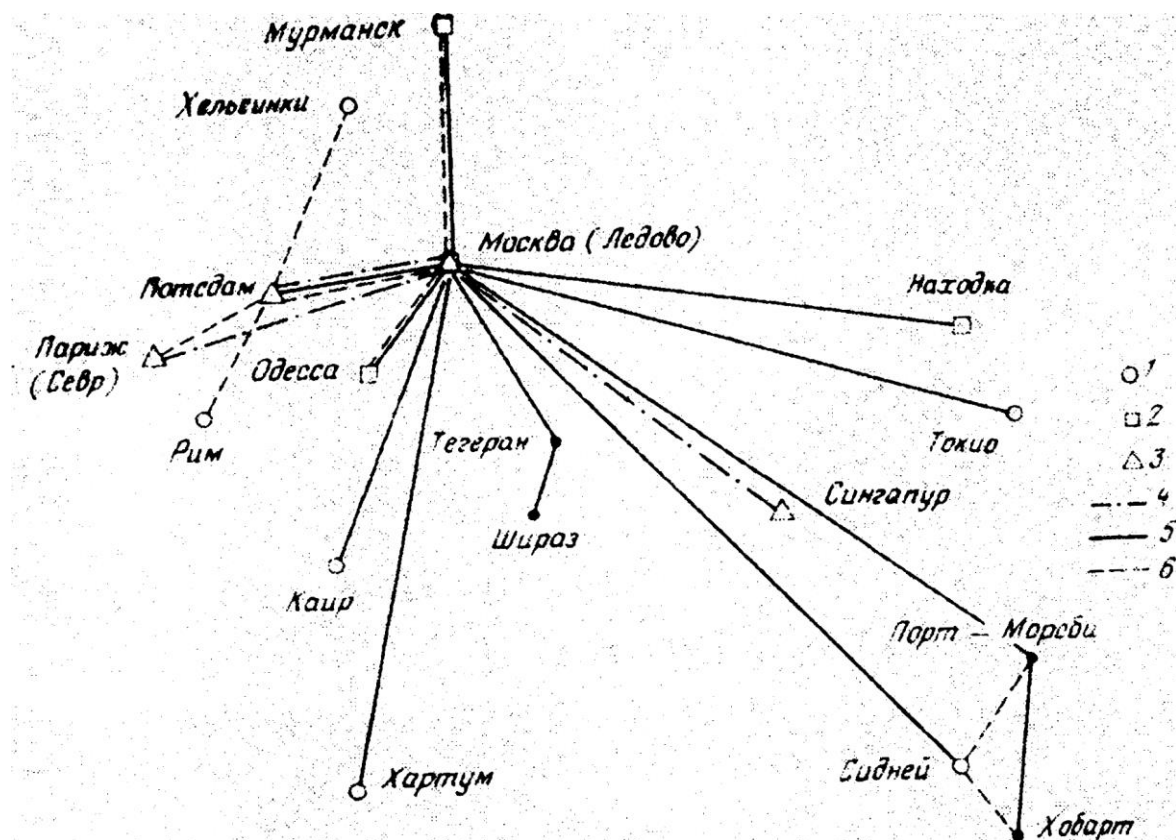


Схема международных гравиметрических связей, выполненных ИФЗ АН СССР, ИАиЭ СО АН СССР и ЦНИИГАиК ГУГК при СМ СССР

1 — пункты, входящие в систему МГСС-71; 2 — международные пункты на территории СССР; 3 — пункты абсолютных определений; 4 — связи, сделанные абсолютным прибором; 5 — связи, сделанные маятниковым прибором; 6 — связи, сделанные гравиметрами

Опыт работы показал, что комплектом маятников ОВМ конструкции ЦНИИГАиК [5] возможно осуществление дальних связей с ошибкой порядка $\pm 50 \text{ мкГал}$. В этом случае ошибка измерения силы тяжести на определяемом пункте не будет увеличена за счет ошибки g в Лёдове. Это дает возможность пункт в Лёдове рассматривать как эксцентрик пункта в Потсдаме и все связи вместо Потсдама делать от Ледова. На рис. 1 показаны все международные гравиметрические связи, выполненные советскими экспедициями от Ледова и Потсдама. Эти связи следующие:

1. 1970 г. Потсдам — Хельсинки A ,
2. 1971 г. Лёдово — Хартум A ,
3. 1972 г. Лёдово — Каир B ,
4. 1972 г. Лёдово — Токио C ,
5. 1972 г. Лёдово — Сидней A .

Результаты этих измерений изложены соответственно в работах [9—13].

В 1976 г. д-ром Сето тремя гравиметрами Ла-Коста — Ромберга была сделана связь Север — Токио через Потсдам и Лёдово [14]. Это дало возможность передать из Севера величину g в системе МГСС-71 в Потсдам и Лёдово и тем самым получить поправки Потсдамской системы для этих пунктов.

Наконец, по данным измерений Δg между различными столбами в Потсдаме, выполненных Харнишем [15], была получена поправка Потсдамской системы относительно МГСС-71 для столба S—13.

При сравнении Потсдамской системы с системой МГСС-71 в значения Δg , измеренные

в Потсдамской системе, вводились поправки за изменение масштаба, а в значения g поправки Хонкасало [16].

Таблица 1

Поправка Потсдамской системы по данным относительных измерений

Названия пунктов	g в Потсдамской системе, $мкГал$	g и системе МГСС-71, $мкГал$	Поправка Потсдамской системы Δ , $мкГал$
Потсдам S-13	981 275 415±5	981 261 371±17	—14 044±18
Париж А	980 939 906±6	980 925 880±14	—14 028±17
Хельсинки А	981 914 624±20	981 900 590±19	—14 034±28
Ледово, 5035	981 565 362±10	981 551 332±39	—14 030±32
Каир В	979 290 735±51	970 276 760±25	—13 975±57
Хартум А	978 302 657±70	978 288 640±24	—14 017±74
Токио С	979 777 124±67	979 763 190±18	—13 934±69
Сидней А	979 685 811±63	979 671 860*21	—13 951±66
арифметическое среднее общее:		—14 002±15	
арифметическое среднее для Европы:		—14 034±4	
арифметическое среднее для других пунктов		—13 969±18	
разность		—65±18	

В приведенной табл. 1 дана сводка выполненных измерений и вычисленных поправок Потсдамской системы относительно системы МГСС-71. В среднем поправка Потсдамской системы оказалась равной —14 002 $мкГал$. Ее ошибка M_{Δ} была вычислена в двух вариантах: по отклонениям от среднего

$$M_{\Delta}' = ([\varepsilon\varepsilon]/[n(n-1)])^{1/2} = \pm 15 \text{ мкГал}$$

и квадрированием ошибок определения поправок Δ

$$M_{\Delta}'' = [m_{\Delta}^2]^{1/2} / n = \pm 18 \text{ мкГал}$$

Отличная сходимость ошибок M_{Δ}' и M_{Δ}'' указывает на отсутствие заметных систематических ошибок определения отдельных значений поправки Δ . Скорее можно было бы ожидать, что ошибка M_{Δ}'' будет существенно меньше ошибки M_{Δ}' , поскольку ошибки m_{Δ} не содержат систематических ошибок, присущих данному определению Δ . В действительности же мы имеем обратное соотношение.

Вместе с тем обращает на себя внимание систематическое различие величин поправок, полученных по европейским пунктам и по пунктам, расположенным на других континентах. В первом случае поправка оказалась равной —14 034±4 $мкГал$, а во втором —13 969±18 $мкГал$. Откуда разность между ними будет: —65±18 $мкГал$. Столь существенное расхождение трудно приписать случайной комбинации ошибок измерений. Скорее это является следствием неравномерного распределения пунктов, задающих масштаб системы МГСС-71.

АБСОЛЮТНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ

В начале 70-х годов в Институте автоматики и электрометрии СО АН СССР был создан первый отечественный гравиметр для абсолютных определений силы тяжести. После того как была доказана его работоспособность и возможность его транспортировки, с помощью этого прибора была сделана проверка масштаба и исходного нуля опорной гравиметрической сети Советского Союза. Эти измерения показали, что созданный прибор обладает точностью, достаточной для решения многих задач как научного, так и прикладного характера.

Принцип действия прибора основан на наблюдениях за свободным падением уголкового отражателя в вакууме. Описание прибора опубликовано в [17—19]. Измерения с ним производились, как правило, в следующей последовательности. После установки прибора на столбе и юстировки всех измерительных устройств начинались наблюдения. Каждое измерение, которое вводилось в обработку, получалось как арифметическое среднее из 140—

150 наблюдений за свободным падением уголкового отражателя. Броски следовали один за другим через 15—20 сек. Наблюдения полностью автоматизированы, поэтому оператор в конце каждого измерения списывал с табло только число сделанных бросков, среднее значение g_0 и ее среднюю квадратическую погрешность.

После каждого такого измерения проводился контроль юстировки прибора, что занимало примерно 15—20 мин. Затем прибор включался вновь и начиналось следующее измерение. На каждом пункте в зависимости от условий наблюдений делалось несколько серий таких измерений. Каждая серия состояла из 10—15 измерений.

В измеренную величину g_0 вводились поправки за интервал времени Δg_t эффект Доплера Δg_d , остаточное сопротивление воздуха Δg_p , уклонение луча лазера от вертикали Δg_r , изменение длины волны лазера Δg_x , приливные изменения силы тяжести Δg_f , вертикальный градиент силы тяжести для приведения показаний прибора к поверхности столба Δg , на котором он установлен, и, наконец, поправка Хонкасало Δg_H .

Учитывая высокую точность, которая может быть получена с этим прибором, измерения с ним производились в первую очередь с целью уточнения абсолютной величины силы тяжести в исходном пункте страны — Лёдове, а также для изучения неприливных изменений силы тяжести.

Таблица 2
Абсолютные определения в Лёдове

Дата измерений	Число бросков n	Число измерений n	g , мкГал	Вес P
1975, 5-6 октября	5528	29	981 551 402±19 398±25	3
4 ноября	1850	15	377±5,6	2
1976, 2-5 июля	2736	18	386±6,1	32
25-26 июля	3889	21	375±5,2	27
8 декабря	1548	11	378±5,1	37
27 декабря	905	8	383±5,8	38
1977 29-30 августа	1582	12	379±6,5	30
30 сентября	1448	11		24
Всего	$\sum k = 19,486$	$\sum n = 125$	арифметическое среднее 981 551 380 весовое среднее 981 551 379	$\sum P = 188$

$$M_g' = \pm 1,7 \text{ мкГал} \quad M_g'' = \pm 2,3 \text{ мкГал}$$

Таблица 3

Абсолютные определения в Потсдаме

Дата измерений	Число бросков k	Число измерений n	g , мкГал	Вес P
1976, 13-15 августа	2537	15	981 261 422±4,647	
15-16 августа	1666	9	424±9,711	
Всего	$\sum k = 4.203$	$\sum n = 24$	арифметическое среднее 981 261 423 весовое среднее 981 261 423	$\sum P = 58$

$$M_g' = \pm 1,4 \text{ мкГал} \quad M_g'' = \pm 5,4 \text{ мкГал}$$

Таблица 4

Абсолютные определения в Севре

Дата измерений	Число бросков k	Число измерений n	g , мкГал	Вес P
1977, 12-13 сентября	1432	11	980 925 934±5,4	34
13-14 сентября	1489	12	941±2,8	127
19-20 сентября	1328	10	939±3,7	73
Всего	$\sum k = 4,249$	$\sum n = 33$	980 925 938 980 925 939	$\sum P = 234$

арифметическое среднее
весовое среднее

$$M_g' = \pm 2,1 \text{ мкГал} \quad M_g'' = \pm 2,4 \text{ мкГал}$$

Представляло значительный интерес сравнение нашего прибора со стационарным

абсолютным гравиметром профессора Сакумы в Севре, который, судя по литературным данным, в настоящее время имеет наивысшую точность. Этим прибором были выполнены многократные определения силы тяжести в Ледове, Потсдаме и Севре. Были также проведены первые измерения в Сингапуре для изучения неприливных изменений в экваториальной зоне.

Измерения в Лёдове с абсолютным гравиметром производились на том же пункте, что и относительными методами. Прибор устанавливался на столбе непосредственно над маркой 5035. В Потсдаме наблюдения производились в подвальном Помещении Центрального института физики Земли АН ГДР на столбе S—13 [10].

В Сингапуре — в отдельно стоящем домике на территории Сингапурского университета в бывшем хранилище радиоактивных веществ. Подробное описание этого пункта и результаты выполненных там измерений изложены в [20]. Наблюдения в Севре производились в гравиметрической лаборатории Международного бюро мер и веса. Ввиду невозможности установить наш прибор на столбе А, являющемся основным пунктом системы МГСС-71, измерения были сделаны на столбе Аз. Величина Δg между этими столбами, равная $90,5 \pm 2,2$ мкГал, а также значение вертикального градиента силы тяжести над столбом 273 мкГал/м были любезно сообщены нам проф. Сакумой.

В табл. 2 приведены результаты всех измерений, выполненных абсолютным гравиметром в Лёдове. В графе 2 дано число бросков k , в графе 3 — число измерений n , в графе 4 приводится величина g , полученная как арифметическое среднее из всех сделанных измерений на данном пункте, и ее погрешность M_g , вычисленная по их сходимости. В последней графе дается вес P , величина которого принималась обратно пропорциональной квадрату погрешности M_g .

Методика оценки точности абсолютных определений пока еще не разработана. Очевидно, что приведённые выше погрешности не учитывают всех систематических ошибок, присущих данному прибору. Поэтому реальная точность абсолютных определений силы тяжести может быть получена только из сравнения измерений, выполненных приборами различных конструкций, использующих различные принципы регистрации свободного падения тела.

Результаты абсолютных определений силы тяжести в Потсдаме и Севре даны в табл. 3 и 4.

При рассмотрении полученных результатов обращает на себя внимание поразительная сходимость результатов измерений. Особенно ярко это видно из измерений, проведенных в Ледове. За истекшие два года прибор подвергался многим переделкам: была введена в двух вариантах защита от микросейсм и вибраций, введено новое устройство, контролирующее длину волны лазера, уменьшены габариты прибора, и, несмотря на все это, сходимость оказалась много лучше, чем этого можно было ожидать не только из оценок погрешностей отдельных измерительных устройств прибора, но и из рассмотрения ошибок M_g , приведенных в табл. 2. Расхождения между измерениями нигде не превосходят их средние погрешности. На всех пунктах без исключения ошибки M_g' оказались меньше ошибок M_g'' . Это обстоятельство позволяет сделать важный вывод о том, что в созданном приборе систематические погрешности, присущие данной установке прибора, сведены к минимуму и практически не сказываются на результатах измерений.

Полученные значения абсолютной величины силы тяжести на пунктах Ледово, Потсдам и Севр дают возможность определить поправку Потсдамской системы и одновременно сравнить новые значения g с системой МГСС-71 (см. табл. 5 и 6).

В табл. 5 в графе 2 приведены значения g в Потсдамской системе, исправленные за масштаб и поправкой Хонкасало. В графе 3 — новые значения g , определенные абсолютным гравиметром. В Сиднее новое значение g дано по определениям, приведенным Д. Беллом в [21].

Согласие поправок оказалось вполне хорошим. Их расхождения лежат в пределах

точности их определения. Это является, несомненно, следствием высокой точности выполненных измерений, а также свидетельствует об отсутствии заметных систематических погрешностей. Исключение представляет результат, полученный в Сиднее. Ввиду большой ошибки определения g на этом пункте этот результат исключен из рассмотрения.

Весовое и арифметическое средние значения поправки Δ совпали и оказались равными —13 980 и —13 981 $мкГал$. Указанная величина хорошо согласуется со средней величиной этой поправки, полученной из относительных определений (—14 002±18 $мкГал$). Их разность составляет всего лишь 21±19 $мкГал$. Однако если эту поправку сравнить с поправкой, выведенной из измерений на европейских пунктах, то различие становится более заметным: 52±7,5 $мкГал$, что указывает на систематический эффект, присущий системе МГСС-71, но крайней мере для пунктов, находящихся в Европе.

Этот вывод хорошо подтверждается сравнением новых абсолютных определений с системой МГСС-71 (табл. 6). Средняя величина этой разности оказалась равной 53±2,9 $мкГал$.

Совпадение этих двух величин не может быть случайным и нуждается в дальнейшем тщательном изучении. Для этого необходимо в первую очередь существенно увеличить число абсолютных определений в странах Европы.

Таблица 5

Названия пунктов	g в Потсдамской системе, приведенное к МГСС-71, $мкГал$	Новые определения g , $мкГал$	Поправка Потсдамской системы Δ , $мкГал$	Веса P
Потсдам	981 275 415±5	981 261 423±5	—13 992±7	20
Лёдово	981 565 362±10	981 551 380±2	982±10	10
Севр	980 939 908±6	980 925 938±2	970±6	28
Сидней	979 685 811±63:	979 672 000±200	811±210	0
	арифметическое среднее	среднее	—13 981	$\sum P = 58$
	весовое среднее	среднее	—13980	
	$M_g' = \pm 6,4$ $мкГал$	$M_g'' = \pm 3,5$ $мкГал$		

Таблица 6

Сравнение с системой МГСС-71

Названия пунктов	g в системе МГСС-71, $мкГал$	Новые определения g , $мкГал$	Разность ϵ , $мкГал$	Веса P
Лёдово	981 551 332±30	981 551 380±2	+48±30	11
Севр	981 261 371±17	981 261 423±5	+52±18	31
Потсдам	980 925 880±14:	980 925 938±2	+58±14	51
	арифметическое среднее	среднее	+53	$\sum P = 93$
	весовое среднее	среднее	+55	
	$M_g' = \pm 2,9$ $мкГал$	$M_g'' = \pm 12,6$ $мкГал$		

Таблица 7

Сравнение абсолютных гравиметров на пункте Севр Аз

Приборы	g , $мкГал$
французский, 1976-77	980 925 326±7
итальянский, 1976-77	980 925 925±10
советский, 1977	980 925 938±2
арифметическое среднее:	980 925 930±4,4
$M_g' = \pm 4,4$ $мкГал$	$M_g'' = \pm 4,1$ $мкГал$

Рассмотрим результаты сравнения трех абсолютных гравиметров, которое было проведено в 1977 г. в Севре (табл. 7). Сравнивались три прибора: Стационарный гравиметр проф. Сакумы, итальянский и наш советский, созданный в Новосибирске. Сходимость приборов оказалась вполне хорошей. Максимальное расхождение между приборами получилось равным 13±10 $мкГал$, а максимальное отклонение от среднего — 8 $мкГал$.

В результате этих измерений в Севре для пункта Аз было получено значение g с

рекордной точностью. Ее погрешность, выведенная по сходимости приборов, оказалась равной $\pm 4,4$ *мкГал*, что еще раз подтверждает вывод об отсутствии заметных систематических погрешностей у абсолютных гравиметров при их правильной эксплуатации и должной метрологической аттестации всех измерительных устройств, входящих в прибор.

В заключение сравним новое значение g для пункта Севр Аз с значением g , приведенном в каталоге пунктов МГСС-71. Имеем:

$$\begin{aligned}\text{МГСС-71 } g &= 980\,925\,880 \pm 14 \text{ мкГал} \\ \text{Новое определение } g &= 980\,925\,930 \pm 4 \text{ мкГал} \\ \text{Разность: } &+50 \pm 15 \text{ мкГал},\end{aligned}$$

т. е. получаем еще одно подтверждение того, что величина силы тяжести на исходном пункте системы МГСС-71 занижена на 50 ± 15 *мкГал*.

Выводы

1. Получена поправка Потсдамской системы относительно системы МГСС-71 по гравиметрическим связям Потсдама с пунктами, расположенными на разных континентах. Средняя величина поправки оказалась равной -14002 ± 15 *мкГал*. При этом выявлена систематическая разность 65 ± 18 *мкГал* между поправкой, полученной по европейским пунктам, и пунктам, расположенным на других континентах.

2. Эта же поправка, полученная по абсолютным определениям, сделанным советским абсолютным гравиметром, оказалась равной $-13\,981 \pm 6,4$ *мкГал*.

3. По результатам измерений, выполненных советским абсолютным гравиметром на европейских пунктах МГСС-71, получено систематическое расхождение, равное 53 ± 29 *мкГал*.

4. Проведенное в Севре сравнение приборов проф. Сакумы, итальянского и советского абсолютного гравиметров показало отсутствие у них заметных систематических ошибок, что позволяет оценивать получаемые результаты по внутренней сходимости. Точность определения g одним прибором по принятым программам измерений характеризуется средней квадратической погрешностью порядка ± 7 — 8 *мкГал*.

5. Для пункта Севр Аз, являющегося исходным для системы МГСС-71, выявлено расхождение с новыми определениями, выполненными в 1976—1977 гг., равное 50 ± 15 *мкГал*.

В заключение автор приносит глубокую благодарность профессору А. Сакума и Директору Международного бюро мер и веса профессору Ж. Терьену за предоставленную возможность провести измерения в Севре, моему заместителю по экспедиционным работам ст. н. с. С. Н. Щеглову, организатору и основному исполнителю измерений с маятниками ст. н. с. ЦНИИГАиК Н. А. Гусеву, руководителю работ с абсолютным гравиметром ст. н. с. ИАиЭ СО АН СССР Г. П. Арнаутову, а также всем участникам описанных работ, без помощи которых они не были бы осуществлены.

Академия наук СССР Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта

Литература

1. Парийский Н. Н. Ускорение силы тяжести в основных опорных пунктах Союза: Пулково, Москве, Полтаве и Казани. М., Известия ВТОГиГР, 1935.
2. Парийский Н. Н. Развитие теории ошибок Боррасса для современной методики маятниковых наблюдений. Труды Сейсмологического ин-та АН СССР, вып. 127, 1948.
3. Буланже Ю. Д. Предварительные результаты определения гравиметрического пункта первого класса в селении Оби-Гарм. Труды ГеоФИАН. вып. 5 (132). М., 1949.
4. Morelli C. The international Gravity Standardization Net 1971 (IGSN-71). Bureau Central IAG. Paris.
5. Хейфец М. Е. Новый маятниковый прибор гравиметрической лаборатории ЦНИИГАиК, Труды ЦНИИГАиК, вып. 145, М., 1902.

6. Романюк П. .1. Геодезический астазированный гравиметр ГЛГ-2. М.. Деп. ВИНТИ, № 1830-70, 1969
7. Буланже Ю. Д. и др. Ускорение силы тяжести на пунктах «Ледово» (Москва), «Мурманск», «Одесса» в «Находка». В кн.: «Результаты высокоточных гравиметрических измерений». М., «Сов. радио», 1977.
8. Буланже Ю. Д., Гусев Н. А. Ускорение силы тяжести на международном гравиметрическом пункт «Ледово» (Москва). В кн.: «Результаты высокоточных гравиметрических измерений». М.. «Сов. радио». 1977.
9. Буланже Ю. Д. Гравиметрическая связь Потсдам— Хельсинки. В кн.: «Результаты высокоточных гравиметрических измерений». М., «Сов. радио». 1977.
10. Буланже Ю. Д. и др. Определение ускорения силы тяжести в Каире. В кн.: «Результаты высокоточных гравиметрических измерений». М., «Сов. радио», 1977.
11. Буланже Ю. Д. и др. Гравиметрическая связь Потсдам -- Токио. В кн.: «Результаты высокоточных гравиметрических измерений». М., «Сов. радио», 1977.
12. Буланже Ю. Д. и др. Определение ускорения силы тяжести в Сиднее. В кн.: «Результаты высокоточных гравиметрических измерений». М., «Сов. радио», 1977.
13. Хейфец М. Е. и др. Результаты некоторых международных маятниковых связей, выполненных ЦНИИГАиК. В кн.: «Результаты высокоточных гравиметрических измерений». М., «Сов. радио», 1977.
14. Seto Г., Tasma M. Gravity tie between Japan and Europe. Commun. presented XVI General Ass. IAG. Grenoble, 1975.
15. Harnisch G. Das lokale Schwerfeld uber gravimetrischen Anschlusspunkten, Vermessungstechnik, H. 11, 1976.
16. Honkasalo T. On the tidal gravity correction. Boll. Geof. Teor. Appl., 1964, VI, 21.
17. Арнаутков Г. П. и др. Измерение абсолютной величины ускорения силы тяжести на гравиметрических пунктах «Ледово», «Таллин» и «Тбилиси». В кн.: «Результаты высокоточных гравиметрических измерений». М., «Сов. радио», 1977.
18. Измерение абсолютного значения гравитационного ускорения. Ред. Ю. Е. Нестерихина. Новосибирск, 1972.
19. Буланже Ю. Д. и др. Новое определение абсолютной величины ускорения силы тяжести в Потсдаме. Gerlands Beitrage zur Geophysik, 87. H. 1, 1978.
20. Boulanger Yu. D. Determination of the absolute value of Gravity in Singapore. Bull. d'Information IGB. Paris, 1978.
21. Bell G. A. and others. An absolute Determination of Gravitational acceleration at Sydney, Australia, Metrologia, 1973, № 9.