

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ

А В Т О М Е Т Р И Я

2005, том 41, № 1

УДК 550.831.23.084

Г. П. Арнаутков

(Новосибирск)

РЕЗУЛЬТАТЫ МЕЖДУНАРОДНЫХ
МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ СРАВНЕНИЙ
АБСОЛЮТНЫХ ЛАЗЕРНЫХ
БАЛЛИСТИЧЕСКИХ ГРАВИМЕТРОВ

Представлен обзор результатов испытаний и международных сравнений различных вариантов транспортабельных абсолютных лазерных баллистических гравиметров, разработанных в России (ранее в СССР) (в Институте автоматизации и электрометрии) и в других странах. Проанализирована эволюция повышения точности измерений абсолютного значения ускорения силы тяжести.

Введение. Современная международная гравиметрическая сеть основана на результатах измерений абсолютных значений ускорения силы тяжести, проведенных лазерными баллистическими гравиметрами разных стран в различных точках Земли. Эта сеть является основополагающей при геодезических, геофизических и метрологических исследованиях. Для установления единства результатов измерений различными гравиметрами и оценки точности международной гравиметрической сети с 1981 г. в Международном бюро мер и весов в Париже проводятся регулярные (приблизительно раз в четыре года) метрологические сравнения гравиметров разных стран.

Испытания первых вариантов транспортабельного гравиметра, созданных в Институте автоматизации и электрометрии (ИАиЭ) СО АН СССР на гравиметрических пунктах СССР, Потсдама и Парижа. Первый вариант гравиметра был испытан в 1975 г. на гравиметрических пунктах «Ледово» (Москва), «Таллин» и «Тбилиси». Сравнивались результаты измерений абсолютных значений ускорения силы тяжести $g_{\text{абс}}$ со значениями g , полученными на этих пунктах (базовых для гравиметрической системы СССР) с помощью относительных гравиметров и маятниковых комплексов в международной гравиметрической системе IGSN-71 [1]. Погрешность измерения $g_{\text{абс}}$ гравиметром ИАиЭ СО АН СССР (далее ИАиЭ) оценивалась в то время величиной, не превышающей 25 мкГал [1] ($1 \text{ мкГал} = 10^{-8} \text{ м/с}^2$).

В результате измерений было установлено, что на пунктах гравиметрической сети СССР g $g_{\text{абс}}$ g и составляла: 38 27 мкГал («Ледово»), 72 35 мкГал («Таллин») и 2 41 мкГал («Тбилиси»); при этом среднеквадратическая погрешность определения g относительным методом составляла 10, 25 и 33 мкГал соответственно.

Большой интерес представляло сравнение разности значений $g_{\text{абс}}$ и g на эталонном гравиметрическом базисе между Москвой и Тбилиси. Этот базис был определен в 1970 г. относительными гравиметрами ГАГ-2 и маятниками ОВМ [2]. Установлено, что разность значений ускорений силы тяжести на пунктах «Ледово» и «Тбилиси», измеренных абсолютным и относительными гравиметрами, составила $40 \text{--} 50 \text{ мкГал}$ [1]. Это подтвердило исключительно высокую точность определения сети гравиметрических пунктов 1-го класса, созданной в то время на территории СССР относительными методами (относительная ошибка разности масштабов составляла $2,8 \cdot 10^{-5}$).

Таким образом, в результате испытаний абсолютного лазерного баллистического гравиметра ИАиЭ, проведенных в 1975 г. на международном гравиметрическом пункте «Ледово» и на пунктах гравиметрической сети СССР «Таллин» и «Тбилиси», была подтверждена его высокая (для того времени) точность измерения абсолютного значения ускорения силы тяжести: среднеквадратическая погрешность измерений не превышала 25 мкГал .

В 1976 г. в ИАиЭ СО АН СССР был создан второй вариант транспортабельного абсолютного лазерного баллистического гравиметра, который получил международную известность под названием ГАБЛ. В этом гравиметре впервые в мире для контроля длины волны рабочего лазера интерферометра использовался транспортабельный малогабаритный лазер с йодной ячейкой поглощения, который позволял контролировать длину волны излучения рабочего лазера непосредственно во время гравиметрических определений с относительной погрешностью менее $5 \cdot 10^{-10}$. Ранее для такого контроля привлекались метрологические центры, т. е. лазерный гравиметр не был полностью автономным, что снижало точность и надежность его измерений.

Испытания гравиметра ГАБЛ были проведены в июле 1976 г. на международных гравиметрических пунктах «Ледово» и «Потсдам» (Германия) [3]. Сравнивались значение $g_{\text{абс}}$ на пункте «Потсдам-S13», измеренное гравиметром ГАБЛ, и значение $g_{\text{отн}}$ в системе IGSN-71. Кроме того, находилась погрешность определения разности значений g на пунктах «Ледово» и «Потсдам».

Результаты измерений гравиметром ГАБЛ приведены в табл. 1.

Средние значения $g_{\text{абс}}$ на пунктах «Ледово» (марка № 5035) и «Потсдам» (столб «S13») с учетом погрешностей абсолютных измерений составляют 981551378 ± 16 и $981261422 \pm 16 \text{ мкГал}$ соответственно.

По данным каталога системы IGSN-71 [3] значение абсолютной величины силы тяжести для пункта «Потсдам-А» (номер по каталогу 25523А) составляет $g_A = 981260190 \pm 17 \text{ мкГал}$. Учитывая разность значений g между пунктами «Потсдам-S13» и «Потсдам-А», равную 1181 мкГал , получаем

Т а б л и ц а 1

Пункт измерений	Дата измерений	Измеренное значение g , мкГал
«Ледово»	2–6 июля 1976 г.	981551373
«Потсдам»	13–15 июля 1976 г.	980261419
«Потсдам»	15–16 июля 1976 г.	980261426
«Ледово»	25–26 июля 1976 г.	981551384

Т а б л и ц а 2

Дата измерений	Измеренное значение g , мкГал	Абсолютная погрешность измерения g , мкГал
12–13 сентября 1977 г.	980925925	15
13–14 сентября 1977 г.	980925932	15
19–20 сентября 1977 г.	980925930	15

П р и м е ч а н и е. Среднее значение $g = 980925929 \pm 15$ мкГал.

перенесенное на второй пункт значение $g_{\text{абс}} = 981260241 \pm 16$ мкГал. Таким образом, разность между измеренным значением абсолютной величины силы тяжести для пункта «Потсдам» и значением в системе IGSN-71 оказалась равной 51 ± 23 мкГал и является первым прямым определением такой разности для этих пунктов с помощью современного лазерного гравиметра. В работе [4] показано, что результат соответствует погрешности определения системы IGSN-71.

Сравнивались разности значений ускорений силы тяжести на пунктах «Ледово» и «Потсдам», полученные по совокупности относительных измерений [2] ($g = 289945 \pm 8$ мкГал) и с помощью лазерного гравиметра [3] ($g = 289956 \pm 23$ мкГал). Разность этих значений равна 11 ± 24 мкГал.

Этот результат еще раз подтвердил высокую точность ранее выполненных относительных определений и отсутствие заметных систематических ошибок обоих методов.

Таким образом, эксперименты с лазерным гравиметром в «Ледово», «Тбилиси», «Таллине» и «Потсдаме» показали хорошую (в пределах погрешности измерений) сходимость результатов относительных и абсолютных измерений на этих пунктах. В связи с этим актуальной стала необходимость непосредственных сравнений результатов измерений абсолютными гравиметрами на одном пункте. Первое такое сравнение осуществлено в 1977 году: были проведены измерения $g_{\text{абс}}$ на гравиметрическом пункте «Север-А₃» Международного бюро мер и весов (МБМВ) в Париже.

Результаты измерений g гравиметром ГАБЛ на пункте «Север-А₃» приведены в табл. 2.

В табл. 3 кроме среднего значения g из табл. 2, перенесенного на пункт «Север-А», приведены результаты измерений ускорения силы тяжести, выполненных проф. А. Сакумой [5], д-ром Дж. Хамондом и д-ром Дж. Фаллером [6].

Т а б л и ц а 3

Исполнитель измерений	Дата измерений	Измеренное значение g , мкГал	Абсолютная погрешность измерения g , мкГал
А. Сакума	1973 г.	980926016	6
Дж. Хамонд, Дж. Фаллер	1969 г.	980925984	41
ИАиЭ	1977 г.	980926019	15

Следует отметить, что результат измерения Сакумы взят из графика многолетних наблюдений, приведенного в [5], по четырем измерениям, выполненным в 1973 г. Из таблицы видно хорошее совпадение результатов, полученных абсолютными гравиметрами различных конструкций, что свидетельствует об отсутствии заметных систематических ошибок измерений указанными приборами [7]. Однако сравниваемые результаты, полученные в разное время, могут испытывать влияние неприливных изменений g , что потребовало проведения сравнений абсолютных гравиметров в небольшие промежутки времени (до нескольких суток) на одном пункте (или на разных, но имеющих достаточно точную относительную гравиметрическую связь). Поэтому по рекомендации Генеральной ассоциации геодезии в 1981 г. были проведены международные сравнения абсолютных гравиметров, которые затем повторялись регулярно с периодичностью 4–5 лет.

Международные метрологические сравнения абсолютных гравиметров в МБМВ. Первые сравнения были проведены в 1981 г. и освещены в работе [8]. Одновременно сравнивались два абсолютных гравиметра США и советский прибор ГАБЛ. Более чем на полгода позже были выполнены измерения новым транспортабельным гравиметром Сакумы (МБМВ) и итальянским гравиметром, принадлежащим Институту метрологии им. Дж. Колонетти в Турине. В 1980 г. была определена абсолютная величина силы тяжести в МБМВ китайским прибором [9]. Для сравнения были привлечены также результаты измерений в Севре, осуществлявшихся в 1976–1982 гг. Это измерения, сделанные итальянским прибором (два в 1976 г., два в 1977 г. и одно в 1982 г.) [10]; гравиметром ГАБЛ в 1977 и 1981 гг. [7]; двумя приборами США (под руководством Хаммонда и Фаллера) в 1981 г.; стационарным гравиметром Сакумы в 1976 г. и его новым транспортабельным прибором в 1982 г., а также измерения, выполненные в 1980 г. китайским прибором. Гравиметры СССР, США и Китая использовали схему несимметричного измерения свободного падения, гравиметры Италии и Сакумы – симметричную.

Связь между различными гравиметрическими пунктами и измерения вертикальных градиентов производились шестью относительными гравиметрами Ла-Коста-Ромберга. Погрешность этих измерений оценивалась в среднем величиной 2 мкГал.

Результаты определений абсолютной величины силы тяжести в Севре представлены в табл. 4. Поправка g_w уравнивает результаты измерений вертикального градиента силы тяжести, проведенных на пункте « A_3 » в разные годы.

Оценка точности абсолютных определений силы тяжести была сделана в трех вариантах: приняты независимыми все измерения, сделанные в Севре ($n = 12$); приняты независимыми только средние значения по приборам ($n = 6$); используются значения силы тяжести, измеренные только в 1981 и 1982 гг. ($n = 5$). Все три варианта обработки дали практически один и тот же результат: среднеквадратическая погрешность определения абсолютного значения силы тяжести одним прибором оказалась порядка 8... 9 мкГал. Из этих данных следует, что результаты всех абсолютных определений достаточно хорошо согласуются между собой и что отклонения отдельных приборов от среднего не превышают среднеквадратические погрешности указанных измерений. Исключением является прибор Хаммонда (первый абсолютный гравиметр, разработанный в США совместно с Фаллером). Величина g , полученная этим прибором, отличается от среднего значения

Т а б л и ц а 4

Дата измерений	Пункт измерений	Число измерений	Измеренное значение g, мкГал	Поправка g'	Перенос результата измерения к пункту «А3»	Сила тяжести на пункте «А3»	М	Отклонения от среднего v
Итальянский транспортабельный гравиметр								
1976, май	«А3»	98	980925892	+8,3	–	980925900	10	–13
1976, июнь	«А3»	85	980925902	+8,4	–	980925910	10	–3
1977, январь	«А3»	82	980925892	+8,5	–	980925904	10	–9
1977, март	«А3»	84	980925906	+8,5	–	980925914	10	+1
1982, апрель	«А3»	90	980925900	+8,4	–	980925908	5	+5
Среднее значение: 980925907 2,4								
Гравиметр ГАБЛ								
1977, сентябрь	«А3»	33	980925906	+13,5	–	980925920	8	+7
1981, октябрь	«А6»	24	980926609	–	–688,3	980925921	8	+8
1981, ноябрь	«А3»	6	980925907	+13,5	–	980925920	9	+7
Среднее значение: 980925920 0,3								
Стационарный гравиметр Сакумы								
1976	А	–	980925990	–	–78,8	980925911	7	–2
Транспортабельный гравиметр Сакумы								
1982, март	А	–	980925997	–	–78,8	980925918	8	+5
Транспортабельный гравиметр Хаммонда								
1981, октябрь	«А4»	–	980926620	–	–657,9	980925962	12	+49
Транспортабельный гравиметр Фаллера								
1981, октябрь	«А5»	–	980926562	–	–659,8	980925902	10	–11
Транспортабельный китайский гравиметр								
1980, апрель	«А3»	29	980925914	+14,0	–	980925928	16	+15

Пр и м е ч а н и е. Средние значения: $n = 12, g = 980925913 \pm 2,5$ мкГал;

g , измеренного группой других приборов на 49 мкГал, т. е. на величину, в 4 раза превосходящую полную погрешность M .

Сравнение абсолютных гравиметров позволило с большой точностью определить на пункте « A_3 » величину $g = 980925914 \pm 3,9$ мкГал. В то же время в Международной системе IGSN-71 для этого пункта принято значение $g = 980925867 \pm 14$ мкГал, т. е. на 47 мкГал меньше. Этот результат подтверждает отмеченную выше разницу значений g , измеренных абсолютным гравиметром ГАБЛ в Потсдаме, и значения g , приписанного для данного пункта в системе IGSN-71 (см., например, [4]).

Вторые сравнения абсолютных гравиметров в Севре были проведены в 1985 году. В них одновременно сопоставлялись шесть абсолютных гравиметров:

1. Прибор Международного бюро мер и весов (Франция).
2. Прибор Института метрологии им. Дж. Колонетти (Италия).
3. Прибор Национального института метрологии (Китай).
4. Прибор Астрофизической лаборатории Колорадского университета США-1 (США).
5. Прибор Скрибского института океанографии США-2 (США).
6. Абсолютный гравиметр ГАБЛ-М (СССР).

Программой сравнения предусматривалось проведение измерений по возможности одновременно. Все шесть приборов были установлены на различных постах на пунктах «А», « A_3 » « A_7 », расположенных в Главном лабораторном здании. Советским прибором ГАБЛ-М были проведены измерения на пунктах « A_6 » и « A_3 ».

Относительная гравиметрическая связь между пунктами и измерения вертикальных градиентов осуществлялись 14 гравиметрами Ла-Коста – Ромберга. Ошибки переноса результатов измерений к пунктам были в пределах $0,6 \dots 0,7$ мкГал, а ошибки определения вертикальных градиентов – в пределах $0,8 \dots 1,3$ мкГал [11]. Все абсолютные определения были выполнены относительными гравиметрами в интервале времени 28 июня – 9 июля 1985 г. Результаты сравнений, отнесенные к пункту «А», представлены в табл. 5. Как видно из таблицы, их можно разделить на три группы. В первой группе гравиметр МБМВ показал значение, на 24 мкГал меньше

Т а б л и ц а 5

Страна	Пункт измерений	Измеренное значение g , мкГал	Перенос результата измерения	Значение g , приведенное к пункту «А»
Франция (МБМВ)	«А»	980925976,3 ± 5,6	–	980925976,3 ± 5,6
Италия	« A_3 »	980925924,7 ± 5,3	+70,7 ± 0,4	980925995,4 ± 5,3
СССР	« A_3 »	980925931,8 ± 5,6	+70,7 ± 0,4	980926002,5 ± 5,6
СССР	« A_6 »	980926611,2 ± 6,0	–609,2 ± 0,4	980926002,0 ± 6,0
США (США-1)	« A_5 »	980926578,1 ± 7,6	–578,7 ± 0,4	980925999,4 ± 7,6
Китай	« A_4 »	980926599,4 ± 13,8	–583,2 ± 0,5	980926016,2 ± 13,8
США (США-2)	« A_7 »	980926673,5 ± 6,7	–660,1 ± 0,4	980926013,4 ± 6,7*

среднего результата измерений всеми гравиметрами, что в 4 раза больше погрешности, оцененной авторами данного прибора. Вторую группу результатов дали гравиметры США-2 и китайский: их средний результат $g = 980926014,8 \pm 7,6$ мкГал превышал среднее значение измерений всеми приборами на 14,1 мкГал. Гравиметры Италии, США (США-1) и СССР (третья группа) дали среднее значение $g = 980925999,8 \pm 3,1$ мкГал, отличающееся на 0,9 мкГал от среднего значения g для всех гравиметров. Отдать предпочтение какой-либо из этих групп приборов трудно, поэтому по результатам сравнений 1985 года можно констатировать, что некоторые абсолютные гравиметры имели неучтенные систематические ошибки, достигающие десятков микрогал, при их среднеквадратической ошибке $6 \dots 7$ мкГал.

Третьи сравнения абсолютных гравиметров в МБМВ проводились в 1989 г. В этот раз сравнивались девять абсолютных гравиметров: итальянский (типа IMGС); пять гравиметров типа JLA_g, приобретенных Канадой, Финляндией, Австрией и Германией в США (разработаны под руководством Фаллера); гравиметр ГАБЛ-М (СССР); гравиметр NIM (Китай) и гравиметр NAO (Япония). Гравиметры Италии и Японии использовали симметричную схему измерений: свободно падающее тело подбрасывалось вверх, и измерения его движения производились на симметричных относительно вершины траектории отрезках пути. Гравиметры США, Китая и СССР использовали несимметричную схему измерения пути и времени свободного падения оптического уголкового отражателя. Практически всеми гравиметрами, как и в 1985 г., измерения пути и времени свободного падения производились методом многих отсчетов: за время свободного падения (около 0,25 с) делалось до 600 отсчетов отрезков пути и времени свободного падения.

При помощи некоторых гравиметров в 1989 г. были осуществлены измерения g на двух пунктах, поэтому в третьей колонке табл. 6 представлены два результата [12], которые отнесены к пункту « A_0 » на высоту 0,9 м.

Т а б л и ц а 6

Страна	Тип прибора	Измеренное значение g , мкГал
Италия	IMGС	980925701
Канада	JLA _g -2	980925719, 980925716
Германия	JLA _g -3	980925705, 980925722
Финляндия	JLA _g -5	980925704, 980925707
Австрия	JLA _g -6	980925717, 980925722
США	JLA _g -1	980925717
СССР	ГАБЛ-М	980925724, 980925721
Китай	NIM	980925705
Япония	NAO	980925716, 980925715

П р и м е ч а н и е. Среднее значение по всем измерениям: $g = 980925714$ мкГал.

Разброс показаний различных гравиметров не превышал 23 мкГал, что почти в 2 раза меньше предыдущих сравнений. Интересно отметить, что и однотипные гравиметры (типа JLAG) дали результаты, отличающиеся на 18 мкГал.

Четвертые международные сравнения абсолютных гравиметров проводились в 1994 г. (Россия в этом мероприятии участия не принимала). В подавляющем большинстве были представлены гравиметры, разработанные в США под руководством Фаллера [12, 13] (четыре гравиметра типа JLAG и пять гравиметров типа FG5 – модификации гравиметра JLAG). Кроме этих гравиметров для сравнения были представлены гравиметр Италии (типа IMGС) и гравиметр Японии (типа JAEGER-МБМВ), построенный по схеме Сакумы.

Из сравнений этих результатов было выявлено систематическое несоответствие показаний гравиметров типа JLAG и типа FG5. После анализа предполагаемых причин такого расхождения результатов измерений авторы разработки гравиметра FG5 обнаружили систематическую погрешность, обусловленную зависимостью показаний этого гравиметра от амплитуды интерференционного сигнала. Величина погрешности составляла от 10 до 14 мкГал. После внесения поправки на эту погрешность результаты измерений всеми гравиметрами JLAG и FG5 в 1994 г. отличались не более чем на 10 мкГал. При этом значения g , измеренные итальянским гравиметром IMGС, соответствовали приблизительно среднему значению показаний гравиметров JLAG и FG5. Была выявлена также значительная (от 60 до 70 мкГал) систематическая ошибка измерений гравиметром JAGER-МБМВ, поэтому результаты измерений g этим гравиметром были исключены из сверки 1994 г. (табл. 7)

Т а б л и ц а 7

Пункт измерений	Страна	Тип прибора	$g_{A_0(0,9\text{ м})}$ g_r , мкГал
«A ₂ »	США	FG5-107	5710,7
«A ₂ »	Германия	JLAG-3	5713,0
«A ₂ »	США	FG5-102	5711,6
«A ₂ »	США	FG5-107	5713,0
«A ₃ »	Канада	JLAG-2	5715,8
«A ₃ »	Япония	FG5-104	5712,1
«A ₃ »	Италия	IMGС	5709,0
«A ₈ »	Финляндия	JLAG-5	5706,3
«A ₈ »	Австрия	JLAG-6	5706,0
«L ₃ »	США	FG5-102	5704,6
«L ₃ »	Германия	FG5-101	5709,7
«L ₄ »	Франция	FG5-108	5711,2

Примечание. g_r 980920000 мкГал, $g_{A(0,9\text{ м})}$ 980920710,2 3,3 мкГал.

[12]. Данные результаты перенесены на пункт «А₀» на высоту 0,9 м от поверхности постамент. В результаты измерений гравиметром FG5 внесены поправки на его систематическую погрешность.

Среднее значение результатов измерений остальными гравиметрами (с учетом указанной выше поправки для гравиметров FG5) в 1994 г. составило $g_{A(0,9 м)} = 980920710,2 \pm 3,3$ мкГал.

Пятое международные сравнения абсолютных гравиметров проводились в 1997 г. Результаты сравнений изложены в [14]. Сопоставлялись абсолютные гравиметры США: семь типа FG5 и четыре типа JLAG. По одному гравиметру представили Россия, Польша, Китай и Италия. В гравиметре Польши (ZZB) использовалась схема симметричных измерений, аналогичная схеме Сакумы. Остальные гравиметры сохранили прежнюю схему измерений: гравиметры типа ГАБЛ, JLAG и NIM – несимметричный метод свободного падения, типа IMGС – симметричный метод измерений. Результаты измерений представлены в табл. 8.

Все результаты измерений на различных пунктах были отнесены относительными гравиметрами на пункт «Север-А» на высоту 0,9 м от уровня постамент. Значение g определяет отличие результата измерения каждым гравиметром от среднего значения показаний всех гравиметров $g_{A(0,9 м)} = 980925708,1$ мкГал.

Т а б л и ц а 8

Тип прибора	Страна	g , мкГал	N
FG5-101	Германия	-3,0	2
FG5-108	Франция (МБМВ)	-1,6	16
FG5-103	Англия	-1,3	3
FG5-202	Бельгия	1,8	2
FG5-107	США	2,3	3
FG5-105	Англия	-2,9	2
FG5-206	Франция	-5,5	3
JLAG-5	Финляндия	0,6	3
JLAG-3	Германия	5,0	2
JLAG-6	Австрия	-5,5	2
JLAG-2	Канада	0,7	3
ГАБЛ-Э	Россия	3,2	2
ZZB	Польша	-0,2	2
NIM2A	Китай	-0,2	2
IMGС	Италия	9,2	1

П р и м е ч а н и е. Среднеквадратическая ошибка равна $\pm 3,9$ мкГал.

Измерения проводились на нескольких пунктах N (см. табл. 8, четвертая колонка).

Следует обратить внимание на хорошее согласие (в пределах $0,5$ мкГал) результатов измерений гравиметрами FG5/107 (США) и ГАБЛ-Э (Россия), проведенных разработчиками. Сравнивая результаты измерений абсолютными гравиметрами типа JLAG и FG5, проведенных в 1989, 1994 и 1997 гг., можно заключить, что они зависят от квалификации исполнителей измерений: различия между результатами в несколько раз превосходят инструментальную погрешность приборов.

Заключение. Международные сравнения абсолютных гравиметров позволили контролировать уровень точности постоянно совершенствующихся конструкций и схем этих гравиметров. Некоторые из таких гравиметров (Япония и Франция (МБМВ)) пока не прошли испытаний из-за их высокой систематической погрешности. Для других (например, для гравиметра FG5 (США)) эти испытания явились стимулом определения их инструментальной погрешности. Гравиметры ГАБЛ, ГАБЛ-М и ГАБЛ-Э за весь период сравнений (1977–1997 гг.) сохраняли одно из лидирующих положений среди лучших в мире разработок абсолютных гравиметров. Ко времени последних (1997 г.) сравнений абсолютных гравиметров, в которых были представлены приборы России, абсолютная погрешность измерений всех приборов снизилась до 4 мкГал.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арнаутков Г. П., Буланже Ю. Д., Калиш Е. Н. и др. Измерение абсолютной величины ускорения силы тяжести на гравиметрических пунктах «Ледово» (Москва), «Таллин» и «Тбилиси» // Сб. статей: Результаты высокоточных гравиметрических измерений. М.: Сов. радио, 1977.
2. Буланже Ю. Д., Гусев Н. А. Ускорение силы тяжести на международном гравиметрическом пункте «Ледово» (Москва) // Там же.
3. Буланже Ю. Д., Арнаутков Г. П., Калиш Е. Н. и др. Новое определение абсолютной величины ускорения силы тяжести в Потсдаме // *Gerlands Beiträge zur Geophysik*. 1978. 87, Н. 1.
4. Буланже Ю. Д., Арнаутков Г. П., Щеглов С. Н. Контроль системы IGSN-71 // *ДАН СССР*. 1984. 277, № 2.
5. Sakuma A. A permanent station for the absolute determination of gravity approaching one microgal accuracy // *Proc. Symp. on Earth's Gravitational Field and Secular Variations in Position*. Sydney: University of N.S.W., 1973.
6. Hammond J. A., Faller J. E. A Laser Interferometer System for Absolute Determination of the Acceleration due to Gravity // *N.B.S. Special Publication 343*, 1971.
7. Boulanger Yu., Arnautov G., Kalish E. et al. The absolute value of gravity acceleration on the A_3 point at Sevres // *Bull. d'Inform. IGB*. 1978. N 42.
8. Буланже Ю. Д., Арнаутков Г. П., Калиш Е. Н. и др. Результаты первого международного сравнения абсолютных гравиметров. Севр, 1981 г. // *Изв. АН СССР. Физика Земли*. 1983. № 3.
9. Guang G. Y., Lun H. D. et al. Transportable gravimeter for the absolute determination of gravity // *National Institute of Metrology. Beijing. Preprint*, 1981. P. 9.

10. Cannizzo L., Cerutti G., Marson I. Absolute gravity measurements in Europe // Nuovo Cimento. 1978. 1C, N 1.
11. Boulanger Yu., Faller J., Groten E. et al. Results of the second International Comparison of Absolute Gravimeters in Sevres 1985 // Bull. d'Information, Bureau Gravimetrique International. 1986. N 59.
12. Marson I., Faller J., Cerutti G. et al. Fourth International Comparison of Absolute Gravimeters (ICAG94) // Metrologia. 1995. 3, N 3.
13. Niebauer T. M., Sasagawa G. S., Faller J. E. et al. A new generation of absolute gravimeters // Ibid.
14. Robertson L. Results of the fifth International Comparison of Absolute Gravimeters (ICAG97) // Journées Luxembourgeoises de Géodynamique. 84th session. Bonn, Deutschland: Universität Bonn, 1998.

Институт автоматизации и электротехники СО РАН,
E-mail: arnautov@iae.nsk.su

Поступила в редакцию
8 декабря 2003 г.