

ВЫСОКОТОЧНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ АБСОЛЮТНОГО ЗНАЧЕНИЯ И ВАРИАЦИЙ УСКОРЕНИЯ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ ЗЕМЛИ ЛАЗЕРНЫМ БАЛЛИСТИЧЕСКИМ ГРАВИМЕТРОМ



Г. П. АРНАУТОВ

Разработка лазерного баллистического гравиметра для прецизионного измерения абсолютного значения ускорения силы тяжести g и его вариаций Δg началась в нашем институте в 1970 г. Гравиметрическая тематика в Институте к тому времени была не новой: разработкой методов и средств высокоточных измерений ускорения силы тяжести и его вертикального градиента, начиная с 1964 г., занимались под руководством заведующего лабораторией Л. Д. Гика сотрудники Г. П. Арнаутов, М. Г. Смирнов, И. С. Малышев и В. Н. Затолокин.

К тому времени в лаборатории В. П. Коронкевича мощное развитие получила лазерная интерферометрия для измерения перемещений и вибраций движущихся объектов. Знание основных гравиметрических проблем и наработки в области лазерной интерферометрии и быстродействующей электронно-измерительной техники позволили нашему институту достаточно быстро войти в число мировых лидеров в области высокопрецизионных измерений ускорения свободного падения лазерным интерферометрическим способом. Естественно, этому способствовал и зарубежный опыт разработки аналогичных приборов: публикации проф. А. Сакумы из Международного бюро мер и весов, или МБМВ (Париж, Севр), и проф. Дж. Фаллера и Дж. Хэммонда из Астрофизической лаборатории Колорадского университета (США) и Национального бюро стандартов США соответственно.

В МБМВ А. Сакума создал стационарный баллистический гравиметр, первоначально занимавший два этажа здания и работавший по схеме интерферометра Фабри-Перо в белом свете. Дж. Фаллер и Дж. Хэммонд построили первый транспортабельный баллистический гравиметр, основу измерительной схемы которого составлял лазерный интерферометр Майкельсона с непрерывным счетом интерференционных полос.

До настоящего времени наиболее точным и перспективным является баллистический метод измерения абсолютного значения ускорения силы тяжести g . Согласно этому методу,

значение g определяется по результатам измерения пути и времени свободного падения оптического уголкового отражателя. Измерение пути, пройденного падающим телом, осуществляется лазерным интерферометром (мерой пути служит длина волны излучения лазера, стабилизированного по атомному реперу в спектре его излучения), а мерой интервалов времени служат сигналы прецизионного (например, рубидиевого) стандарта частоты.

На первом этапе основную группу разработчиков лазерного гравиметра в ИАиЭ СО АН СССР составляли Л. Д. Гик, В. П. Коронкевич, Г. П. Арнаутов, Е. Н. Калиш, Ю. Ф. Стусь, И. С. Малышев. Конструктивное участие в этой разработке принимали директор института Ю. Е. Нестерихин, а также А. И. Лохматов, В. А. Ханов, М. Г. Смирнов, В. Г. Тарасюк и Г. Г. Тарасов.

При разработке гравиметра решались задачи теоретического характера, а также технологические и конструкторские проблемы. В результате исследований были выбраны оптимальные соотношения задаваемых и измеряемых интервалов пути и времени, разработана методика контроля и учета ограниченного быстродействия электронных частотомеров, используемых в первых разработках гравиметров. В первых схемах гравиметров измерялись два-три интервала пути и времени свободного падения оптического уголкового отражателя. С 1985 г. для гравиметра типа ГАБЛ-М схема измерений была построена по методу многих отсчетов. При этом для замены частотомеров была разработана и изготовлена специальная

схема измерений интервалов времени. В настоящее время при продолжительности свободного падения, примерно равной 0,24 с, число измеряемых интервалов пути и времени может составлять до 600.

Первый макет лазерного баллистического гравиметра был построен в ИАиЭ СО АН СССР в 1972 г. Это был стационарный прибор, на котором проводились исследования влияния на точность измерения g вибрационных и сейсмических помех, остаточного газа в баллистическом блоке, электромагнитных полей и других помех. На основе этих исследований осуществлялась доработка конструкции гравиметра, совершенствовалась методика измерений. Разрешающая способность этого макета прибора позволяла регистрировать земные приливные изменения величины g , достигавшие $2 \cdot 10^{-6} \text{ м/с}^2$, или $2 \cdot 10^{-7} g$. В 1973 г. аэрогравиметрической экспедицией Института физики Земли АН СССР с использованием группы относительных гравиметров было определено значение g на пункте ИАиЭ СО АН СССР относительно исходного пункта Потсдамской международной гравиметрической сети. Относительная гравиметрическая связь Новосибирска с Потсдамом была выполнена со средней ошибкой $\pm 5.1 \cdot 10^{-7} \text{ м/с}^2$. В результате этого эксперимента была определена поправка Потсдамской гравиметрической системы, равная $(-1390.2 \pm 5.1) \cdot 10^{-7} \text{ м/с}^2$. В принятой в это время новой Международной гравиметрической системе IGSN-71 эта поправка составляла $1400 \cdot 10^{-7} \text{ м/с}^2$. Таким образом, можно заключить, что в 1973 г. погрешность измерения абсолютного значения g гравиметром ИАиЭ СО АН СССР не превышала погрешности относительной гравиметрической связи Новосибирска и Потсдама, равной $\pm 5.1 \cdot 10^{-7} \text{ м/с}^2$.

В 1974 г. были проведены первые измерения g транспортабельным вариантом баллистического гравиметра вне лаборатории ИАиЭ СО АН СССР: в Ленинграде (во Всесоюзном НИИ метрологии им. Д. И. Менделеева) и в г. Кабанске (Бурятская АССР, Байкальская рифтовая зона). Измерения прошли успешно, и в 1975 г. при поддержке заместителя председателя Межведомственного геофизического комитета при Президиуме АН СССР, чл.-кор. АН СССР Ю. Д. Буланже гравиметр ИАиЭ СО АН СССР прошел испытания на международном гравиметрическом пункте «Ледово» (Московская обл.) и на опорных пунктах гравиметрической сети СССР в Таллине и Тбилиси. Погрешность измерения g гравиметром ИАиЭ СО АН СССР в то время не превышала $\pm 25 \cdot 10^{-8} \text{ м/с}^2$, что подтвердили измерения g на указанных выше пунктах.

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 осуществлять указанный контроль непосредственно во время гравиметрических определений с относительной погрешностью менее $5 \cdot 10^{-10}$. Ранее такой контроль осуществлялся с привлечением метрологических центров, т. е. лазерный гравиметр не был полностью автономным. А это приводило к снижению точности и надежности его измерений.

Гравиметр ГАБЛ также прошел испытания в июле 1976 г. на международных гравиметрических пунктах «Ледово» и «Потсдам» под руководством чл.-кор. АН СССР Ю. Д. Буланже. Проведено сравнение величины $g_{\text{абс.}}$, измеренной гравиметром ГАБЛ на пункте «Потсдам S-13», и $g_{\text{отн.}}$, полученной в результате относительных измерений в системе IGSN-71. Кроме того, определялась погрешность измерений разности значений g , полученных на гравиметрических пунктах «Ледово» и «Потсдам».

Разность между измеренным значением абсолютной величины силы тяжести для «Потсдама» и значением в системе IGSN-71 составила $(51 \pm 23) \cdot 10^{-8} \text{ м/с}^2$. Полученный результат стал первым прямым определением этой разности для «Потсдама» с помощью современного лазерного гравиметра. Позже было показано, что он соответствует погрешности определения системы IGSN-71.

В 1977 г. в Севре (МБМВ) сравнивались результаты измерений, проведенных различными гравиметрами в различные времена. Учитывая то, что величина g может изменяться во времени, Международная ассоциация геодезии приняла решение о проведении сравнений абсолютных гравиметров в незначительно отличающиеся интервалы времени (до нескольких суток) и желательно на одном пункте (или на разных, но имеющих достаточно точную гравиметрическую связь). Первые работы такого плана были проведены в Севре в 1981 г. и регулярно продолжаются до сих пор с интервалом в 45 лет. Во всех этих «состязаниях», за исключением 1994 и 2001 гг. (из-за отсутствия финансовых средств), от СССР, а затем от России, принимают участие постоянно модифицируемые гравиметры ИАиЭ.

Результаты проведенных сравнений свидетельствуют о лидирующем мировом уровне высокоточных абсолютных гравиметрических

измерений гравиметрами ИАиЭ. Так, по данным 1997 г., достойно показал себя гравиметр ГАБЛ-Э - последняя на тот момент модификация гравиметра ИАиЭ СО РАН. Различие между значениями g , измеренными во время этих сравнений гравиметрами российской (а им был именно ГАБЛ-Э) и американской разработки (FG 5/107), не превышало $\pm 5 \cdot 10^{-9}$ м/с². Разброс показаний других абсолютных гравиметров, принимавших участие в этих сравнениях (Италия, Китай, Польша), оказался на порядок больше.

Мировое признание гравиметра ГАБЛ, занявшего по результатам международных метрологических сравнений одну из лидирующих позиций по точности измерения g , пришло еще в 1976 г. и нашло отражение во включении ГАБЛ в различные международные программы исследований гравитационного поля Земли. Гравиметры серии ГАБЛ участвовали в уточнении и расширении международной гравиметрической сети и исследованиях неприливых вариаций ускорения силы тяжести.

В различных точках Земли с их помощью создано около 50 опорных гравиметрических пунктов высшей точности в диапазоне широт от +68° (Финляндия) до -43° (Тасмания) (см. рис. 2, красные точки).

Результаты этих исследований включены в каталоги Международной сети абсолютных гравиметрических базовых станций (IAGBN) и Унифицированной европейской гравитационной сети (UEGN-94).

Серией повторных измерений g в экваториальной зоне (Сингапур), в средних широтах Евразии и в сейсмоактивных районах Тянь-Шаня, Камчатки и Байкала обнаружены неприливые вариации силы тяжести (как глобальные, так и региональные), имеющие принципиальное значение для решения проблем геодинамики.

Результаты гравитационных экспериментов с участием гравиметров серии ГАБЛ-М представлены на рис. 3 и 4.

На рис. 3 показаны результаты измерения приливных вариаций g (отмечены знаком о) на пункте «Ключи» (Новосибирская обл.). Здесь изображена переменная часть измеренных значений ускорения силы тяжести Δg , причем погрешность определения этих значений, если отложить ее на графике, меньше размеров знака о. Сплошной линией изображено теоретическое приливное изменение $\Delta g_{\text{пр}}$.

Рис. 4 иллюстрирует неприливые вариации силы тяжести на пункте «Талая» (Иркутская обл., Байкальская рифтовая зона). За нулевой отсчет вариаций g принято начальное значение измерений на пункте с учетом поправок на прилив и движение полюса. Во все результаты измерений внесены поправки, учитывающие притяжение атмосферных масс, которые зависят от атмосферного давления во время измерений. В течение 1992-1995 гг. неприливые вариации g соответствовали изменениям, обусловленным движением полюса Земли. В

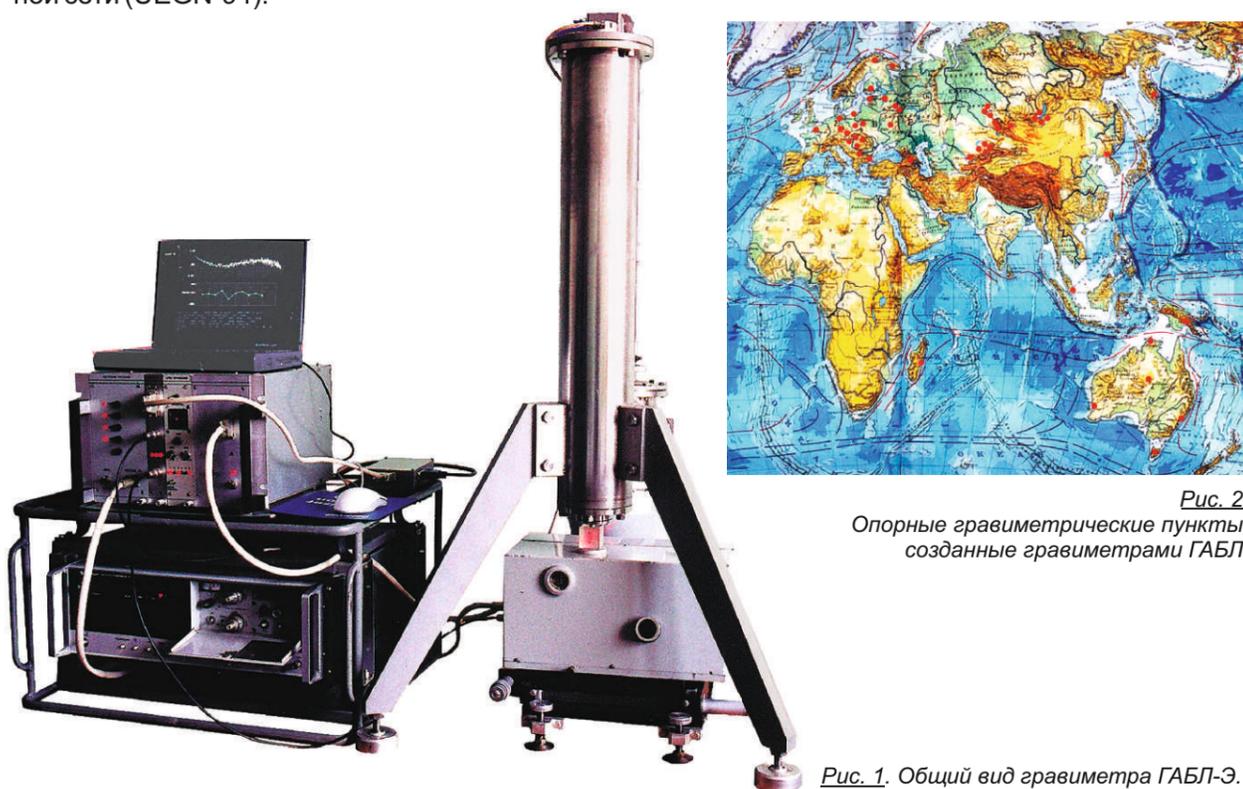
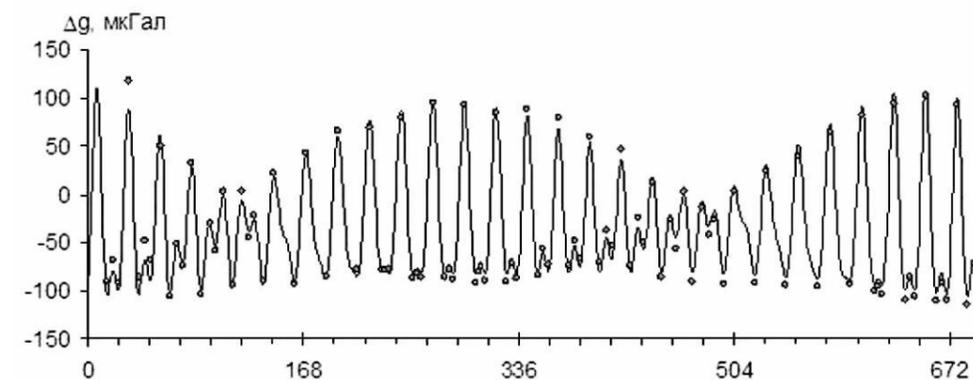


Рис. 2. Опорные гравиметрические пункты, созданные гравиметрами ГАБЛ.

Рис. 1. Общий вид гравиметра ГАБЛ-Э.

Рис. 3. Результаты измерения приливных вариаций g на пункте «Ключи».



1996-1997 гг. значение ускорения силы тяжести увеличилось на $12 \cdot 10^{-8}$ м/с², а в 1998-1999 гг. оно уменьшилось на $6 \cdot 10^{-8}$ м/с² по сравнению с максимальным значением, достигнутым в 1997 г., и сопровождалось колебаниями в виде переходного процесса с размахом до $5 \cdot 10^{-8}$ м/с².

В октябре 1999 г. значение g установилось на уровне, который сохранялся и в течение 2000-2001 гг. Это новое абсолютное значение ускорения силы тяжести на пункте «Талая» на $7 \cdot 10^{-8}$ м/с² превысило данные 1992-1995 гг. Приведенные на рис. 4 вариации g носят локальный характер и относятся только к данному району сейсмоактивной Байкальской рифтовой зоны. На контрольном гравиметрическом пункте в Иркутске, расположенном в платформенной области, g стабильно в пределах погрешности измерений, равной $\pm 2 \cdot 10^{-8}$ м/с².

Гравитационный эффект на пункте «Талая» не связан с данными гидрологических наблюдений в этом районе - изменениями уровня подземных вод. Теоретически изменение g на пункте «Талая», по-видимому, обусловлено изменением уровня земной поверхности в точке наблюдений. Согласно этой гипотезе, в 1996-1997 гг. высота данного пункта уменьшилась на 4 см, а в 1998-1999 гг. она увеличилась на 2 см по сравнению с уровнем 1997 г.

Возможна связь измеренных вариаций Δg с подготовкой и последствиями землетрясений, произошедших 29 августа 1995 г. ($M = 5.5$, расстояние до эпицентра $L = 50$ км) и 25 февраля 1999 г. ($M = 5.9$, $L = 80$ км). По данным сейсмологических исследований, механизм очага землетрясения от 29.06.95 характеризовался отсутствием вертикальной компоненты смещения (главной компонентой было сжатие земной коры), а для землетрясения рифтового типа 25.02.99 (главная компонента - растяжение) вертикальная компонента является основной, что и отразилось во временных вариациях поля силы тяжести.

При анализе причин зарегистрированных на пункте «Талая» вариаций Δg учитывались результаты измерений деформаций и наклонов земной поверхности вблизи этого пункта (удаление не более 50 м), проведенных сотрудниками Института геофизики СО РАН и Института лазерной физики СО РАН. Установлена связь изменений объемной деформации и вариаций Δg . С 1991 по 1996 г. среднее значение объемной деформации было постоянным (с погрешностью $\pm 1 \cdot 10^{-6}$), в 1996 г. она увеличилась на $2 \cdot 10^{-6}$ и сохраняется (с погрешностью не более $\pm 1 \cdot 10^{-6}$) до настоящего времени. Имеется также корреляция вариаций Δg с наклоном земной поверхности и в точке

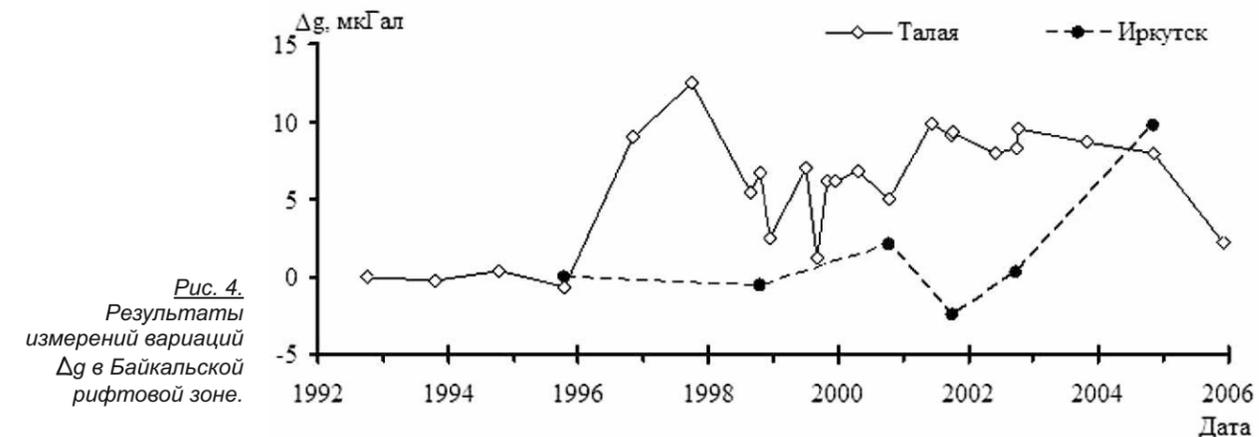


Рис. 4. Результаты измерения вариаций Δg в Байкальской рифтовой зоне.

наблюдений: в 1996 г. произошло резкое изменение вектора наклона.

Проводимый в ИИЭ СО РАН мониторинг гравитационного поля Земли в Байкальской рифтовой зоне и платформенной области имеет принципиальное значение для решения проблем геодинамики и, в частности, при поиске предвестников сильных землетрясений. Эти исследования были и остаются одной из основных задач гравиметрической тематики СО РАН. Другая, не менее важная проблема -

создание Государственной поверочной схемы в области гравиметрии. Эта работа ведется совместно с организациями Госстандарта России.

Таким образом, работы ИИЭ СО РАН в области высокопрецизионных измерений абсолютного значения гравитационного ускорения и его вариаций с 1976 г. общепризнаны специалистами в области геофизики, геодезии и метрологии и до сих пор сохраняют лидирующий статус в мире.



Обсуждение результатов измерений в Париже. 1997 г.
Слева - проф. Дж. Валер (США), справа - Г.П. Арнаутков (СССР).



Ю. Ф. Стусь



Е. Н. Калиш



М. Г. Смирнов



Со спящим кенгуру. Сиднейский зоопарк. 1979 г.



Речная экскурсия в Западной Австралии. 1979 г..
Слева направо: Ю.Ф. Стусь, Е.Н. Калиш, Г.П. Арнаутков