

УДК 550.312

## ПОЛЕВОЙ АБСОЛЮТНЫЙ ЛАЗЕРНЫЙ БАЛЛИСТИЧЕСКИЙ ГРАВИМЕТР\*

И. А. Бунин, Е. Н. Калиш, Д. А. Носов, М. Г. Смирнов, Ю. Ф. Стусь

*Учреждение Российской академии наук  
Институт автоматизации и электрометрии Сибирского отделения РАН,  
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1  
E-mail: stus@iae.nsk.su*

Представлен абсолютный лазерный баллистический гравиметр нового поколения, разработанный в Институте автоматизации и электрометрии СО РАН. Прибор предназначен для работы в полевых условиях и отличается малыми габаритами и весом. В качестве источника света в интерферометре гравиметра применён оптический стандарт с длиной волны излучения  $\lambda = 532$  нм, состоящий из Nd:YAG-лазера бегущей волны с внутрирезонаторным удвоением частоты излучения и системы стабилизации по резонансам насыщенного поглощения в молекулярном йоде. Инструментальная среднеквадратическая погрешность измерения абсолютного значения ускорения силы тяжести гравиметром не превышает  $\pm 5 \cdot 10^{-8}$  м/с<sup>2</sup> (5 мкГал).

*Ключевые слова:* лазерный баллистический гравиметр, оптический стандарт длины, метод многих отсчётов, полевые условия.

**Введение.** В настоящее время для измерения абсолютного значения ускорения силы тяжести  $g$  наиболее точным и перспективным является баллистический метод. При этом значение  $g$  определяется по результатам измерения пути и времени свободного падения пробного тела. Стационарные баллистические гравиметры (GABL-G, FG-5, IMGC), как показали регулярные Международные сверки абсолютных гравиметров (ICAG), проводимые раз в четыре года в Международном бюро весов и мер (BIPM, Севр, Франция), хорошо зарекомендовали себя при работе в лабораторных условиях [1, 2]. Однако для развития фундаментальных и прикладных геофизических исследований остро стоит задача измерения абсолютного значения ускорения силы тяжести в жёстких условиях внешней среды.

Цель данной работы — создание абсолютного баллистического гравиметра на базе современных стандартов длины и времени, отличающегося малыми габаритами, высокой надёжностью, независимым энергопитанием и простотой эксплуатации при условии сохранения высоких метрологических характеристик в полевых условиях.

**1. Принцип действия и метрологическое обеспечение абсолютного баллистического гравиметра.** Принцип действия баллистического гравиметра основан на измерении интервалов времени  $T_i$ , за которые свободно падающее тело проходит заданные интервалы пути  $S_i$  (при  $i = 1, \dots, N$ ). Вычисляемое по результатам измерений интервалов  $S_i$  и  $T_i$  значение  $g$  представляет собой величину ускорения силы. Для определения  $g$  с малой погрешностью (порядка нескольких единиц микрогалов) необходимо производить измерения интервалов пути, проходимых свободно падающим телом, как минимум, с погрешностью до нанометров, а измерения соответствующих интервалов времени с погрешностью до десятых долей наносекунды.

\*Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № ОФИ-08-02-12009).

Задача высокоточного измерения интервалов пути решается интерферометрическими методами. Применение интерферометра с оптическим стандартом длины на базе стабилизированного лазера позволяет решить данную задачу, так как в этом случае мерой пути служит длина волны лазера. Относительная стабильность и воспроизводимость частоты используемого стандарта длины, подробно рассмотренного ниже, не хуже  $2 \cdot 10^{-10}$ . Мерой интервалов времени являются сигналы прецизионного (например, рубидиевого) стандарта. Использование коммерческого рубидиевого стандарта типа AR-40A обеспечивает стабильность воспроизводства частоты до  $5 \cdot 10^{-10}$ . Таким образом, в приборе непосредственно заложены стандарты длины и времени, что обеспечивает его высокие метрологические характеристики.

Упрощённая схема реализации рассмотренного принципа измерения параметров движения свободно падающего тела в баллистическом гравиметре показана на рис. 1. Основной схемой является лазерный интерферометр, измерительное плечо которого представляет собой уголкового отражатель, закреплённый на свободно падающем теле. Информация о его движении регистрируется фотодетектором.

## 2. Описание конструкции лазерного баллистического гравиметра ГАБЛ-П.

Основными узлами гравиметра являются: баллистический блок, лазерный интерферометр, электронно-вычислительная система, устройство виброзащиты.

2.1. *Баллистический блок* предназначен для реализации процесса свободного падения пробного тела. Он включает в себя вакуумную камеру, в которой создаётся рабочее давление порядка  $5 \cdot 10^{-5}$  Па. Это обеспечивает снижение влияния силы сопротивления остаточного газа при свободном падении пробного тела до величины порядка  $0,5 \cdot 10^{-9} g$ . Вакуумная камера изготовлена в виде трубы из нержавеющей немагнитной стали. К нижней части трубы через патрубок подсоединён магнитоэлектрический (ионный) насос, постоянно поддерживающий в камере требуемое давление. Свободно падающее пробное тело содер-

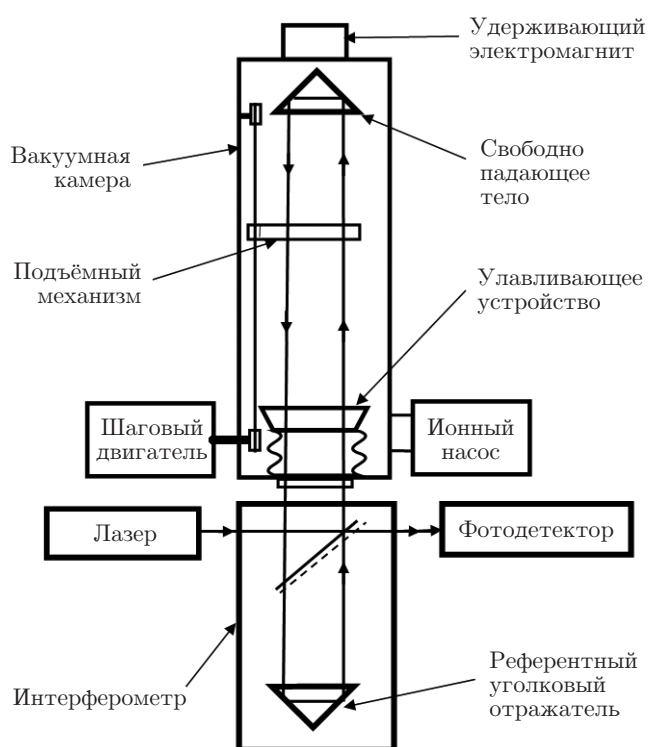


Рис. 1. Схема баллистического гравиметра

жит оптический уголкового отражатель, закреплённый в титановом корпусе. В процессе работы пробное тело с помощью подъёмного механизма устанавливается в стартовое положение, захватывается удерживающей системой и после сброса свободно падает, попадая в конце движения в улавливающее устройство. Подъёмный механизм приводится в движение шаговым двигателем. Передача вращательного движения от двигателя внутрь камеры производится через вакуумный ввод вращения.

Установка пробного тела в стартовое положение осуществляется с использованием трёхточечной опоры, иглы которой расположены на падающем теле, а ответные контактные площадки укреплены на верхнем фланце вакуумной камеры. Удерживание пробного тела в стартовом положении производится электромагнитом, магнитопровод которого выполнен из феррита. Плоская ферритовая пластина, закреплённая на падающем теле, замыкает магнитный поток и удерживается им в верхнем положении до момента размыкания цепи питания катушки электромагнита. Улавливание пробного тела в конце его свободного падения осуществляется мягкой пружинной системой.

2.2. *Интерферометр.* В отличие от традиционно используемых в гравиметрах гелий-неоновых лазеров в полевом гравиметре используется новый оптический стандарт длины Nd:YAG/I<sub>2</sub>, спроектированный и изготовленный Институтом лазерной физики СО РАН [3, 4].

Новый оптический стандарт обладает следующими важными достоинствами:

а) не нуждается в периодической поверке в отличие от поляризационно-стабилизированных лазеров типа AL-1 или RB1;

б) не имеет модуляции выходного излучения, как в стабилизированных по йоду лазерах типа WEO Model 100 или NIKKON, которая вносит дополнительную погрешность в определение гравитационного ускорения  $g$ ;

в) выходная мощность в 5–10 раз превышает мощность лазеров, применяемых в других баллистических гравиметрах, что позволяет существенно улучшить соотношение сигнал/шум выходного сигнала даже при использовании оптоволоконного кабеля для ввода лазерного излучения в интерферометр.

Стандарт состоит из Nd:YAG-лазера и системы стабилизации частоты лазера по резонансам насыщенного поглощения в молекулярном йоде. Стабилизация частоты производится по линии  $a_1 R(56)$ , 32-0 и может осуществляться как в ручном, так и в автоматическом режиме. Для получения одночастотного режима работы Nd:YAG-лазера с продольной диодной накачкой используется кольцевая схема резонатора лазера с однонаправленной бегущей волной. В данной схеме полностью устраняется эффект пространственного неоднородного насыщения усиления, приводящий к многомодовому режиму генерации. В основу конструкции Nd:YAG-лазера бегущей волны с внутрирезонаторным удвоением и температурной перестройкой частоты была положена непланарная двухзеркальная геометрия резонатора с усиливающей средой, выполненной в виде призмы. Использование кристалла KTP в качестве внутрирезонаторного удвоителя частоты и перестраиваемого температурой двулучепреломляющего фильтра позволило создать простую конструкцию с минимальным количеством внутрирезонаторных элементов. Основные параметры оптического стандарта приведены в табл. 1. Оптическая схема модифицированного интерферометра Майкельсона показана на рис. 2.

Излучение оптического стандарта вводится в оптическую систему гравиметра через одномодовый оптический волоконный кабель с сохранением поляризации и после прохождения асферического коллиматора 1 типа 60FC-4-A18-01 направляется на светоделитель 2, который рассчитан на длину волны 532 нм. В целях минимизации оптических потерь светоделитель выполнен в виде стеклянной плоскопараллельной пластины, имеющей с двух сторон светорасщепляющее напылённое покрытие. Лазерное излучение направляется на напылённую часть лучеделителя, где в точке А разделяется на два луча. Отражённый

Таблица 1

Характеристики стандарта	Параметры
Выходная мощность излучения во внешнюю оптическую схему	$\geq 5$ мВт
Относительная стабильность частоты	не хуже $10^{-10}$
Относительная воспроизводимость частоты	не хуже $2 \cdot 10^{-10}$
Частота лазера при стабилизации по резонансу $a1 R(56), 32-0$	$533259651950 \pm 50$ кГц
Модовый состав	$TEM_{00q}$
Поляризация	линейная

светоделителем луч через входное окно вакуумной камеры 3 попадает на уголкового отражатель 4, установленный на свободно падающем теле гравиметра. Половина излучения проходит сквозь стекло до следующей лучеделительной поверхности и является опорным плечом, а вторая половина, отразившись от передней грани лучеделителя, направляется на отражатель 4. Обратный луч проходит через прозрачную (ненапылённую) часть пластины в точке *C* и попадает на референтный уголкового отражатель 5. Затем излучение поступает на напылённую часть лучеделителя 2, где на втором покрытии в точке *B* рекомбинирует с опорным лучом. Полученное в результате интерференции излучение выводится через выходные диафрагму 6 и коллиматор 7 по оптоволоконному кабелю на фотоприёмник. Фотоприёмник выходного сигнала интерферометра (лавинный фотодиод) вынесен из интерферометра и конструктивно расположен в блоке контроллера гравиметра. С помощью web-камеры 8 на диафрагме 6 отслеживается совмещение лазерных пучков. Отражённая в точке *C* слабая часть излучения вводится в скоростную web-камеру 9 для отслеживания смещения светового пятна при выставлении вертикали.

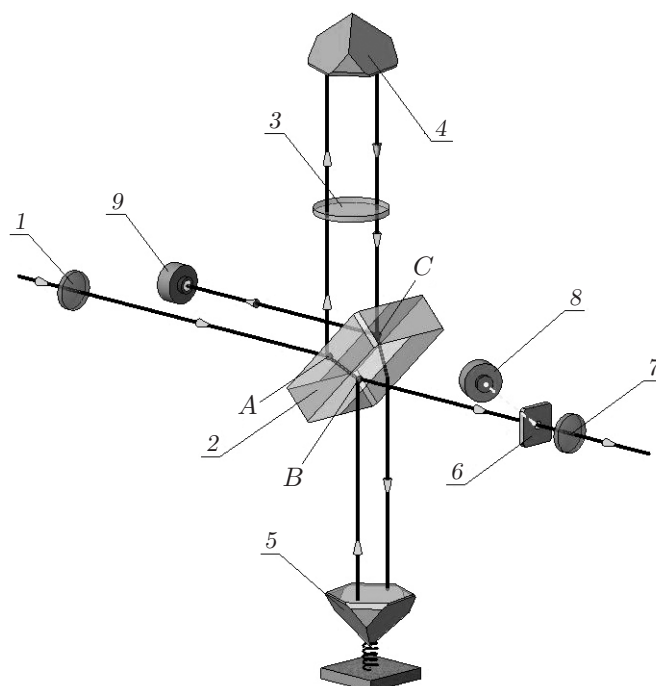


Рис. 2. Оптическая схема интерферометра

Камера 9 (Philips SPC1300NC) обладает быстродействием 90 кадр./с при разрешении  $640 \times 480$  пикселей, это позволяет делать до 30 снимков за время падения пробного тела. Волоконные кабели снабжены оптическими разъёмами, что облегчает разбор при транспортировке и способствует минимизации времени запуска всей системы на новом месте измерения.

Предложенная версия оптической системы с линейным расположением лучей относительно измерительного и референтного плеч интерферометра даёт возможность существенно снизить погрешности, обусловленные горизонтальной составляющей вибросейсмических помех.

2.3. *Электронно-вычислительная система.* Управление всеми узлами гравиметра и требуемые вычислительные процедуры осуществляются с помощью портативного компьютера типа ноутбук. Схематическое изображение основных узлов электронно-вычислительной системы представлено на рис. 3.

2.3.1. *Измерительно-вычислительная система и контроллер баллистического блока.* Подсистема, образующая измерительно-вычислительный блок, интегрированный с контроллером баллистического блока, конструктивно реализована на одной компактной плате. Контроллер производит приём команд управления и параметров в соответствии с используемой моделью гравиметра, обеспечивает выполнение временной последовательности цикла бросков, принимает информацию со счётчиков, сконфигурированных в программируемой логической интегральной схеме (ПЛИС), накапливает её во встроенной памяти и передаёт в компьютер для последующего анализа. Функциональная схема подсистемы и описание её работы приведены в [5].

В счётном блоке ПЛИС выполнены все необходимые схемы для реализации измерения ускорения свободного падения методом многих отсчётов [6]. Применяемый способ измерения основан на том, что интервалы времени определяются в два этапа: прямой счёт меток времени и учёт ошибок квантования  $\Delta t$  путём их дополнительного измерения согласно формуле

$$T_i = qK_i + \Delta t_i - \Delta t_{i+1} \quad (i = 1, \dots, N),$$

где  $q$  — интервал квантования (период следования счётных импульсов);  $K_i$  — целое число импульсов, поступивших на основной счётчик при измерении  $i$ -го интервала;  $\Delta t_i$  — интервалы досчёта (интервал времени между меткой пути и приходом ближайшей метки времени). Длительность импульса досчёта, формируемого в счётном блоке, измеряется с

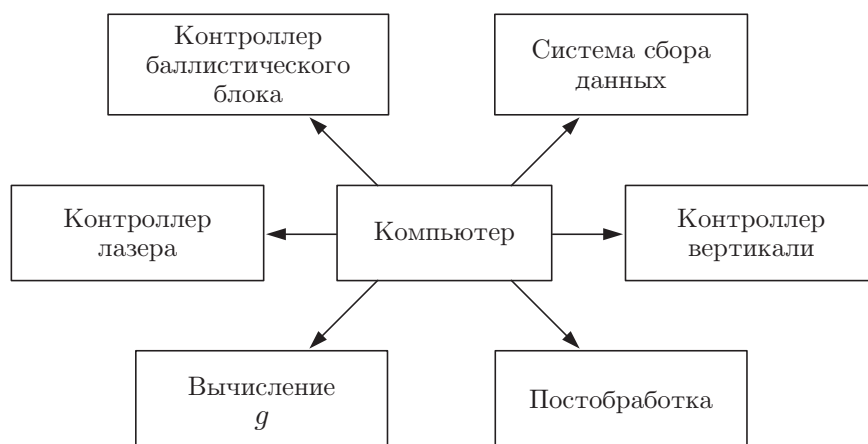


Рис. 3. Основные компоненты электронно-вычислительной системы гравиметра

помощью преобразователя время—амплитуда, выполненного на скоростном интеграторе. Измерение амплитуды производится на внутреннем АЦП управляющего микроконтроллера.

Измерительно-вычислительный блок определяет абсолютное значение ускорения силы тяжести со среднеквадратической погрешностью, не превышающей  $\pm 5 \cdot 10^{-9}$  м/с<sup>2</sup> (0,5 мкГал) при разрешающей способности измерения интервалов времени менее 100 пс и числе отсчётов интервалов пути и времени за один бросок тела не менее 5000.

2.3.2. *Контроллер оптического стандарта длины* ИР I<sub>2</sub>/532 обеспечивает его нормальную работу. С помощью контроллера осуществляется поиск нужной линии поглощения в йоде, её идентификация по заданному образцу и автоматический захват за резонанс а1. В случае больших изменений внешних температурных условий производится автоматическая перестройка диапазона с захватом за требуемый резонанс. На дисплее компьютера графически отображаются параметры работы стандарта и ведётся журнал процесса работы. Кроме того, управляющей программой стандарта создаётся индикатор текущего состояния, доступный другим внешним программам. Это позволяет приостановить работу гравиметра в случае выхода стандарта из нормального режима.

2.3.3. *Контроллер вертикали*. Несовпадение направления луча в измерительном плече интерферометра с направлением движения отражателя (в нашем случае с вертикалью) на угол  $\varphi$  приводит к косинусной погрешности в измерении перемещения:  $\Delta S = S(1 - \cos \varphi)$ . Такую же погрешность имеет и значение гравитационного ускорения  $\Delta g = g(1 - \cos \varphi) \approx -g(\varphi^2/2)$ .

В предыдущих модификациях гравиметров ГАБЛ операция выставления вертикали по жидкостному зеркалу сводилась к выравниванию на сетке телескопа пучков по яркости. В разработанном интерферометре используется способ выставления вертикали по контролю смещения следа измерительного луча в плоскости ПЗС-матрицы web-камеры в процессе падения пробного тела.

Получаемые при этом видеосигналы передаются в компьютер через USB-порт. Далее, используя соответствующие программы, можно проводить контроль вертикальности лазерного луча либо в реальном времени (как правило, используется на этапе предварительной настройки), либо при раскадрировании полученной записи и анализе движения пятна в последовательности кадров. Для полуавтоматического выставления вертикали используются промышленные актуаторы, представляющие собой шаговый двигатель с передачей винт—гайка и направляющими, находящимися внутри корпуса. Ошибка выставления вертикали составляет не более 7 угл. с. При этом относительная погрешность определения  $g$  не превышает  $7 \cdot 10^{-10}$ .

2.3.4. *Программное обеспечение*. Для измерений абсолютного значения ускорения силы тяжести  $g$  баллистическим лазерным гравиметром разработан пакет прикладных программ, которые ориентированы на работу в среде Windows<sup>TM</sup> и специфицированы по автономному обслуживанию соответствующих узлов гравиметра. Рассмотрим подробнее главную программу GVM. Она обеспечивает управление работой баллистического блока и измерительно-вычислительной системы гравиметра, реализует сложную систему сбора информации о параметрах движения свободно падающего тела в гравиметре и вычисление абсолютного значения ускорения силы тяжести. Кроме того, программа осуществляет анализ данных, статистическую обработку результатов измерений и предусматривает введение поправок, необходимых при гравиметрических измерениях. К числу инструментальных поправок относятся: поправка на конечность скорости света при определении пути свободного падения интерферометрическим методом и поправка, учитывающая силу торможения остаточным газом пробного тела в процессе падения в вакуумной камере. Поправки на внешние условия учитывают: а) приливные изменения силы тяжести, обусловленные влиянием притяжения Луны и Солнца; б) изменение широты, вызванное

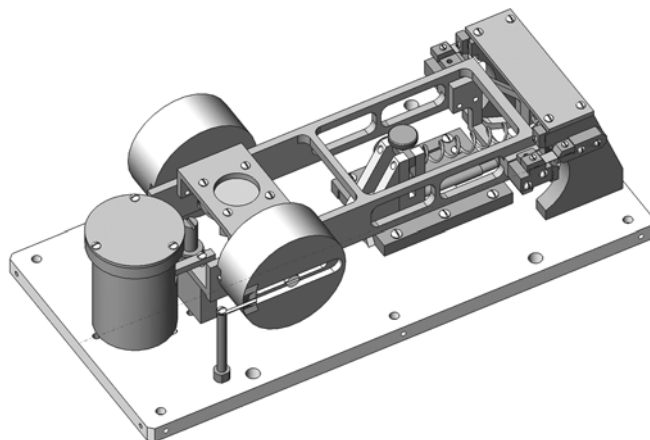


Рис. 4. Сейсмограф виброзащитной системы

движением полюса Земли; в) барометрическое давление, связанное с эффектом притяжения атмосферных масс. Программа функционирует как в реальном времени, так и в режиме постобработки, сохраняя исходные данные, полученные в процессе измерений, выдаёт графическую информацию и протокол результатов определения силы тяжести. Дополнительно программа позволяет осуществлять диагностическое тестирование тракта измерительно-вычислительной системы гравиметра.

2.4. *Виброзащитная система.* Пассивная виброзащитная инерционная система выполнена на базе низкочастотного сейсмографа с периодом собственных колебаний до 10 с. Для этого в его центре качаний установлен оптический уголковый отражатель, который входит в опорное плечо интерферометра. При колебаниях основания сейсмографа на частотах выше его собственной частоты центр качаний благодаря силе инерции остаётся практически неподвижным.



Рис. 5. Общий вид гравиметра ГАБЛ-П

Таблица 2

Характеристики гравиметра	Параметры
Среднеквадратическая погрешность измерения абсолютного значения ускорения силы тяжести	не более $\pm 5 \cdot 10^{-8}$ м/с <sup>2</sup> (5 мкГал)
Диапазон измерений абсолютных значений силы тяжести	не ограничен
Рабочий температурный диапазон	от 0 до +30 °С
Относительная погрешность стандарта частоты (эталона времени)	не более $2 \cdot 10^{-10}$
Относительная стабильность частоты оптического стандарта (эталона длины)	не хуже $5 \cdot 10^{-10}$
Длина волны лазера (в зелёной области спектра)	532,24557601 нм
Давление остаточного газа в баллистической камере	не более $5 \cdot 10^{-5}$ Па
Цикл единичного измерения	не более 8,5 с
Число отсчётов за одно падение свободно падающего тела	не менее 5000
Погрешность установки вертикальности лазерного луча	не более 7 угл. с
Вычислительные процедуры и управление гравиметром	ПК типа ноутбук
Период сейсмографа виброзащитной системы	не менее 3 с
Полный вес прибора (с системой предварительной откачки)	90 кг
Вес прибора без системы предварительной откачки	не более 60 кг
Габариты прибора без упаковки	42 × 47 × 93 см
Потребляемая мощность	не более 250 Вт (220 В, 50 Гц) или 12 В постоянного тока
Время подготовки прибора перед наблюдениями на пункте	1 ч

Общий вид виброзащитной системы, разработанной для гравиметра ГАБЛ-П по классической схеме сейсмографа Б. Б. Голицына, приведён на рис. 4. Прибор снабжён датчиком перемещения и сервосистемой для автоматической установки нулевого положения маятника.

**3. Технические характеристики гравиметра ГАБЛ-П.** Фотография гравиметра ГАБЛ-П, показывающая расположение его основных узлов, представлена на рис. 5, а в табл. 2 приведены технические характеристики прибора.

**4. Полевые испытания гравиметра ГАБЛ-П** были проведены в 2009 г. в Горном Алтае и Заполярье в существенно различающихся условиях внешней среды. Измерения на Алтае в летний период осуществлялись при высокой температуре воздуха в пределах +29... +31 °С и пониженном атмосферном давлении 650–655 мм рт. ст. В Заполярье температура воздуха колебалась в пределах 0... +10 °С, а атмосферное давление было в пределах 760–770 мм рт. ст. Испытания проводились при питании прибора от автомобильного аккумулятора с напряжением 12 В через инвертор, от бензогенератора 220 В, а также внешней сети 220 В (при её наличии в пункте измерений). Прибор располагался в обычной туристической палатке. Во время испытаний гравиметра обрабатывались два режима удалённого управления всеми его узлами с помощью портативного компьютера: по кабелю и по беспроводной сети.

**Заключение.** Успешные испытания прибора показали, что гравиметр сохраняет свои технические и эксплуатационные характеристики в сложных полевых условиях. По резуль-



татам измерений установлено, что инструментальная среднеквадратическая погрешность измерения абсолютного значения ускорения силы тяжести гравиметром не превышает  $\pm 5 \cdot 10^{-8} \text{ м/с}^2$  (5 мкГал). Создание прибора с указанной погрешностью и улучшенными эксплуатационными характеристиками позволит в перспективе повысить эффективность гравиметрических работ в стране на пунктах фундаментальной астрономо-геодезической сети, государственной фундаментальной гравиметрической сети, эталонных гравиметрических и геодинимических полигонах и на полевых гравиметрических пунктах 1-го класса.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Robertson L., Francis O., van Dam T. M. et al.** Results from the fifth international comparison of absolute gravimeters, ICAG'97 // Metrologia. 2001. **38**, N 1. P. 71–78.
2. **Vitushkin L., Jiang Z., Becker M. et al.** The seventh international comparison of absolute gravimeters ICAG-2005 at the BIPM. Organization and preliminary results // Proc. of the 1st Intern. Gravity Field Service Symp. "Gravity Field of the Earth". 28 August – 1 September, 2006. Istanbul, Turkey. Publ.: General Command of Mapping, 2007. Spec. Is. 18. P. 382–387.
3. **Nevsky A. Yu., Holzwarth R., Reichert J. et al.** Frequency comparison and absolute frequency measurement of I<sub>2</sub>-stabilized lasers at 532 nm // Opt. Commun. 2001. **192**. P. 263–272.
4. **Okhapkin M. V., Skvortsov M. N., Belkin A. M. et al.** Tunable single-frequency diode-pumped Nd:YAG ring laser at 1064/532 nm for applications of optical frequency standard // Opt. Commun. 2002. **203**. P. 359–362.
5. **Stus Yu. F., Kalish E. N., Smirnov M. G.** The new measuring-computing system for a laser ballistic gravimeter // Proc. of the Intern. Symp. "Terrestrial Gravimetry: static and mobile measurements (TG-SMM 2007)". Saint Petersburg, Russia: The State Research Center of the Russian Federation, Central Scientific and Research Institute Elektropribor, 2008. P. 106–111.
6. **Калиш Е. Н.** Метод многих отсчетов в определении ускорения свободного падения // Автометрия. 1982. № 2. С. 73–77.

*Поступила в редакцию 18 мая 2010 г.*

---