

ЛАЗЕРНЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 528.27

Г. П. Арнаутов, Е. Н. Калиш, М. Г. Смирнов, Ю. Ф. Стусь, В. Г. Тарасюк
(Новосибирск)

ЛАЗЕРНЫЙ БАЛЛИСТИЧЕСКИЙ ГРАВИМЕТР ГАБЛ-М
И РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ ВАРИАЦИЙ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ

Дано описание методики и схем прецизионного (с погрешностью не более $\pm 6 \cdot 10^{-8} \text{ м/с}^2$) определения абсолютного значения ускорения силы тяжести g . Приводятся новые результаты наблюдений неприливных вариаций g .

Определение абсолютного значения ускорения силы тяжести (УСТ) g на основе интерферометрического измерения пути и времени свободного падения пробной массы [1, 2] остается в настоящее время наиболее точным гравиметрическим методом. Совершенствование методики и схемы измерений, применение современной элементной базы быстродействующей электроники позволили резко повысить число отсчетов N , производимых за время свободного падения. Немногом более 10 лет назад по классической схеме измерялись два интервала пути и времени свободного падения, а в гравиметре ГАБЛ-М, описание которого приведено в данной статье, $N = 500$ и более. Получаемая при этом дополнительная информация расширяет возможности исследования и уменьшения инструментальных (систематических) и случайных погрешностей измерений.

Кинематическая схема гравиметра ГАБЛ-М. Принцип действия гравиметра основан на измерении интервалов времени T_i , за которые свободно падающее тело (СПТ) проходит заданные интервалы пути S_i ($i = 1, \dots, N$). Кинематическая схема измерений лазерным гравиметром представлена на рис. 1. Здесь точка O_1 характеризует исходное (стартовое) положение центра масс (ЦМ) СПТ, точка O — репер положения ЦМ в момент начала измерений S_i и T_i . Задержка начала отсчета интервалов S_i и T_i задается для того, чтобы уменьшить влияние на результат измерения переходных процессов в СПТ и в системе, удерживавшей СПТ в стартовой позиции. Положение начала и конца измеряемых интервалов определяют высоты h_n и h_k . При $h_k > 0,4$ м изменение ускорения силы тяжести с высотой можно считать с достаточной степенью точности линейным [3]: $g(z) = g_0 + \gamma z$. Здесь g_0 — значение ускорения силы тяжести на высоте h_n , γ — абсолютное значение вертикального градиента ускорения силы тяжести на интервале $h_n - h_k$. Тогда уравнение

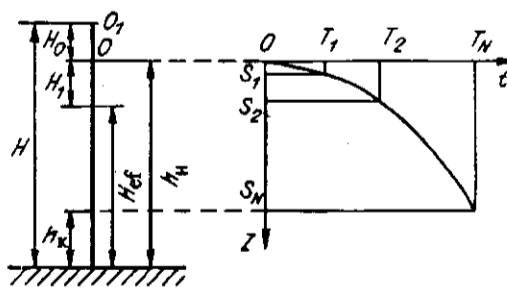


Рис. 1

движения СПТ можно записать в следующем виде [3]:

$$z(t) = V_0 t + \frac{1}{2} g_0 t^2 + \frac{1}{6} \gamma \left(V_1 t^3 + \frac{1}{4} g_1 t^4 \right). \quad (1)$$

Здесь $V_0 = \dot{z}(0)$, а V_1 и g_1 определяются по результатам любых двух (например, k -го и N -го) измерений $S_k = z(T_k)$ и $S_N = z(T_N)$:

$$V_1 = \frac{S_k T_N^2 - S_N T_k^2}{T_k T_N (T_N - T_k)}, \quad g_1 = \frac{2}{T_N - T_k} \left(\frac{S_N}{T_N} - \frac{S_k}{T_k} \right). \quad (2)$$

Если за время падения СПТ произведено N измерений интервалов пути и времени, отсчитываемых от одного момента времени, то получим набор из N функционально связанных зависимостей, подобных (1):

$$S_i = h + V_0 T_i + \frac{1}{2} g_0 T_i^2 + \frac{1}{6} \gamma \left(V_1 T_i^3 + \frac{1}{4} g_1 T_i^4 \right) + \xi_i. \quad (3)$$

Здесь h и ξ_i — погрешности измерений, сведенные к погрешности определения интервалов S_i .

Определим значение g_0 методом наименьших квадратов, потребовав минимума суммы квадратов ошибок ξ_i :

$$F(g_0, V_0, h) = \sum_{i=1}^N \left[h + V_0 T_i + \frac{1}{2} g_0 T_i^2 + \frac{1}{6} \gamma \left(V_1 T_i^3 + \frac{1}{4} g_1 T_i^4 \right) - S_i \right]^2 = \min.$$

При этом будем считать, что градиент γ известен (на основе измерений изменений g по высоте, проведенных с помощью относительных гравиметров).

Приравняв нулю производные $\frac{\partial F}{\partial g_0}$, $\frac{\partial F}{\partial V_0}$ и $\frac{\partial F}{\partial h}$, получим систему трех линейных относительно g_0 , V_0 и h уравнений. Решая эту систему, находим

$$g = \frac{2}{\Delta} \begin{vmatrix} N & \sum_{i=1}^N T_i & \sum_{i=1}^N S_i - \frac{1}{6} \gamma \left(V_1 T_i^3 + \frac{1}{4} g_1 T_i^4 \right) \\ \sum_{i=1}^N T_i & \sum_{i=1}^N T_i^2 & \sum_{i=1}^N S_i - \frac{1}{6} \gamma \left(V_1 T_i^3 + \frac{1}{4} g_1 T_i^4 \right) T_i \\ \sum_{i=1}^N T_i^2 & \sum_{i=1}^N T_i^3 & \sum_{i=1}^N S_i - \frac{1}{6} \gamma \left(V_1 T_i^3 + \frac{1}{4} g_1 T_i^4 \right) T_i^2 \end{vmatrix} = g_e - \gamma H_1, \quad (4)$$

здесь

$$\Delta = \begin{vmatrix} N & \sum_{i=1}^N T_i & \sum_{i=1}^N T_i^2 \\ \sum_{i=1}^N T_i & \sum_{i=1}^N T_i^2 & \sum_{i=1}^N T_i^3 \\ \sum_{i=1}^N T_i^2 & \sum_{i=1}^N T_i^3 & \sum_{i=1}^N T_i^4 \end{vmatrix}; \quad g_e = \frac{2}{\Delta} \begin{vmatrix} N & \sum_{i=1}^N T_i & \sum_{i=1}^N S_i \\ \sum_{i=1}^N T_i & \sum_{i=1}^N T_i^2 & \sum_{i=1}^N S_i T_i \\ \sum_{i=1}^N T_i^2 & \sum_{i=1}^N T_i^3 & \sum_{i=1}^N S_i T_i^2 \end{vmatrix}, \quad (5)$$

$$H_1 = \frac{1}{3\Delta} \begin{vmatrix} N & \sum_{i=1}^N T_i & \sum_{i=1}^N \left(V_1 T_i^3 + \frac{1}{4} g_i T_i^4 \right) \\ \sum_{i=1}^N T_i & \sum_{i=1}^N T_i^2 & \sum_{i=1}^N \left(V_1 T_i^3 + \frac{1}{4} g_i T_i^4 \right) T_i \\ \sum_{i=1}^N T_i^2 & \sum_{i=1}^N T_i^3 & \sum_{i=1}^N \left(V_1 T_i^3 + \frac{1}{4} g_i T_i^4 \right) T_i^2 \end{vmatrix}$$

Вычисляемое по результатам измерений интервалов S_i и T_i значение g_e определяет величину ускорения силы тяжести в точке, находящейся внутри интервала измерений (на расстоянии H_1 от начала отсчета), которую принято называть эффективной высотой H_{ef} гравиметра. Второе слагаемое в (4) редуцирует измеренное значение g_e в точку 0. Из рис. 1 $H_{ef} = H - H_0 - H_1$, при этом $H_1 \approx V_1^2 / 2g_1$.

Измерительно-вычислительная система гравиметра. Оптико-механическая схема гравиметра ГАБЛ-М мало отличается от схемы ГАБЛ [1, 2] и имеет в то же время ряд особенностей. Путем оптимизации конструкции увеличен (до 10 с) период собственных колебаний сейсмической виброзащитной системы интерферометра. Это в 2 раза (по сравнению с ГАБЛ) повысило эффективность подавления вибросейсмических помех и в 4 раза сократило время измерений. Кроме того, привод каретки-подъемника СПТ переведен на программное управление шаговым двигателем, что в 1,5 раза сократило цикл одного измерения. Усовершенствована конструкция электромагнитной системы, удерживающей СПТ в стартовой позиции, что снизило влияние электромагнитных сил на движение СПТ и упростило систему регулировок, устраняющих вращение СПТ после его отпускания.

Более существенные изменения претерпела измерительно-вычислительная система ГАБЛ-М. На рис. 2 представлена схема временных соотношений измеряемых сигналов баллистического лазерного гравиметра. В предыдущих моделях гравиметров (например, ГАБЛ) измерительно-вычислительная система (ИВС) основывалась на методе прямого счета, т. е. сформированный из меток пути измеряемый интервал времени управлял поступлением меток времени, подаваемых на счетчик. В этом случае ошибка измерения Δt_i , обусловленная квантованием, непосредственно определяется частотой следования счетных импульсов, представляющих метки времени, и при $f = 100$ МГц Δt_i составляет 10 нс.

Используемый в ГАБЛ-М способ измерения основан на том, что интервалы времени определяются в два этапа: прямой счет меток времени и учет ошибок

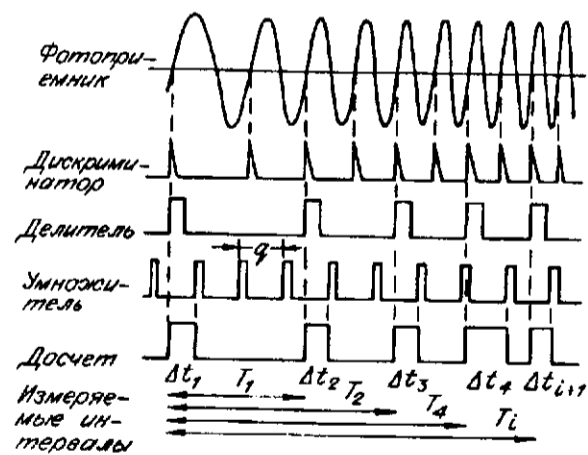


Рис. 2

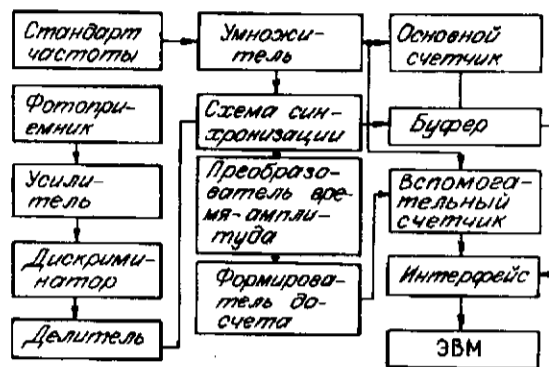


Рис. 3

квантования Δt_i путем их дополнительного измерения в соответствии с формулой

$$T_i = qK_i + \Delta t_i - \Delta t_{i+1} \quad (i = 1, \dots, N), \quad (6)$$

где q — интервал квантования, представляющий период следования счетных импульсов; K_i — целое число импульсов, поступивших на основной счетчик при измерении i -го интервала; Δt_i — сформированные остаточные интервалы (интервалы досчета), представляющие интервал времени между меткой пути и приходом ближайшей метки времени.

На рис. 3 представлена блок-схема измерительно-вычислительной системы гравиметра ГАБЛ-М. Сигнал, детектируемый фотоприемником интерферометра, усиливается до 2 В и далее поступает на дискриминатор нуля и делитель, пропускающий на выход только каждый 3200-й импульс, что соответствует приблизительно 1 мм пути, проходимому свободно падающим телом. Сигнал с выхода делителя (метки пути) поступает на схему синхронизации. Формирование меток времени производится умножением сигнала рубидиевого стандарта до частоты $f = 40$ МГц. Этот сигнал также поступает на схему синхронизации и, кроме того, непосредственно на основной счетчик. При этом основной счетчик, представляющий собой синхронный 24-разрядный двоичный счетчик, работает в непрерывном режиме счета. Его переполнение (каждые 0,4 с) учитывается программой вычисления g на ЭВМ.

Схема синхронизации (рис. 4) выполнена на двух D -триггерах и двух вентилях. Эта схема выполняет две функции: формирует импульсы досчета и вырабатывает сигналы переписи информации из основного счетчика в буфер. Каждая метка пути перебрасывает триггер $T1$, подготавливая к работе триггер $T2$, который переключается по положительному фронту меток времени, поступающих на тактовый вход, и открывает вентиль, пропускающий (и инвертирующий) отрицательную полуволну меток времени. Выходной импульс с вентиля является сигналом переписи в буфер, таким образом, перепись осуще-

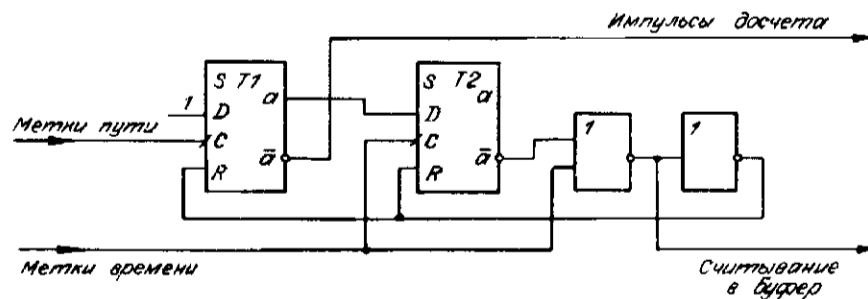


Рис. 4

ствляется в моменты времени, сдвинутые на полпериода относительно моментов срабатывания основного счетчика (счетчик срабатывает по положительным фронтам). Это гарантирует нахождение триггеров счетчика в статическом состоянии после окончания в них переходных процессов. Этот же импульс после инвертирования вентиля 2, выполняющим также функцию линии задержки, используется для сброса триггеров схемы синхронизации в исходное состояние. Формирование импульсов досчета производится на инверсном выходе сдвинутой на величину задержки распространения сигнала через триггер и два вентиля, что в сумме составило 10 нс, так что диапазон изменения длительности импульсов досчета оказался в пределах от 10 до 35 нс. Добавление постоянной составляющей в каждый интервал досчета не оказывает влияния на результат измерения интервалов T_i . Согласно выражению (6), в T_i интервалы Δt_i и Δt_{i+1} входят с противоположными знаками, поэтому их постоянные составляющие в результате взаимно уничтожаются.

Измерение интервалов досчета осуществляется преобразователем время — амплитуда — время, схема которого приведена на рис. 5. Импульсы досчета, вырабатываемые схемой синхронизации, поступают на дифференциальный токовый ключ, собранный на транзисторах $T1$ и $T2$. В исходном состоянии транзистор $T1$ закрыт. С приходом импульса досчета транзистор $T1$ открывается и на емкость C_x поступает ток заряда, вырабатываемый стабилизированным генератором тока ($T3$, $T4$ и $D1$). В момент окончания импульса досчета токовый ключ закрывается и происходит разряд емкости C_x . Разрядный ток задается вторым стабилизированным генератором тока ($T5$, $T6$ и $D2$). Германиевый диод $D3$ позволяет задать постоянное смещение порядка 0,2 В, ограничивающее величину, до которой разряжается емкость. Сигнал с емкости C_x поступает на компаратор $M1$, управляющий работой вспомогательного счетчика, представляющего собой 9-разрядный синхронный двоичный счетчик.

Время от включения до выключения компаратора определяется как $T_{пр} = k(\tau + \Delta t_i)$, где k равно отношению зарядного тока к разрядному. Для согласования шкалы вспомогательного счетчика с двоичной шкалой основного коэффициент k выбран равным 256.

Сравнительные результаты работы гравиметров ГАБЛ-М и ГАБЛ, приведенные на рис. 6 (a — ЭСС с разрешением 10 нс, b — с разрешением 98 нс),

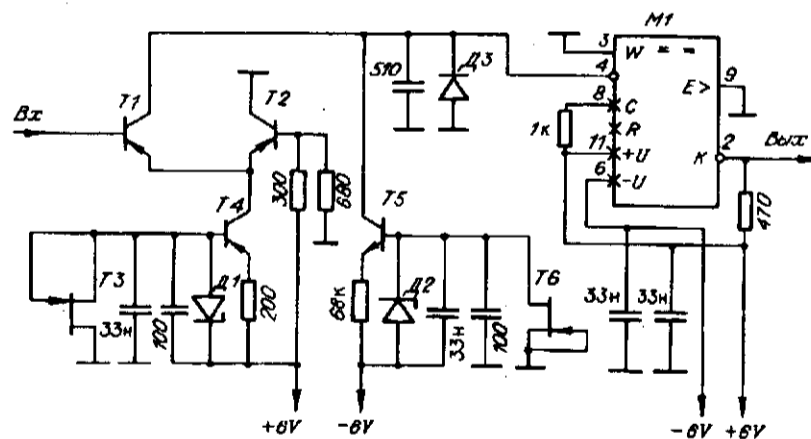


Рис. 5

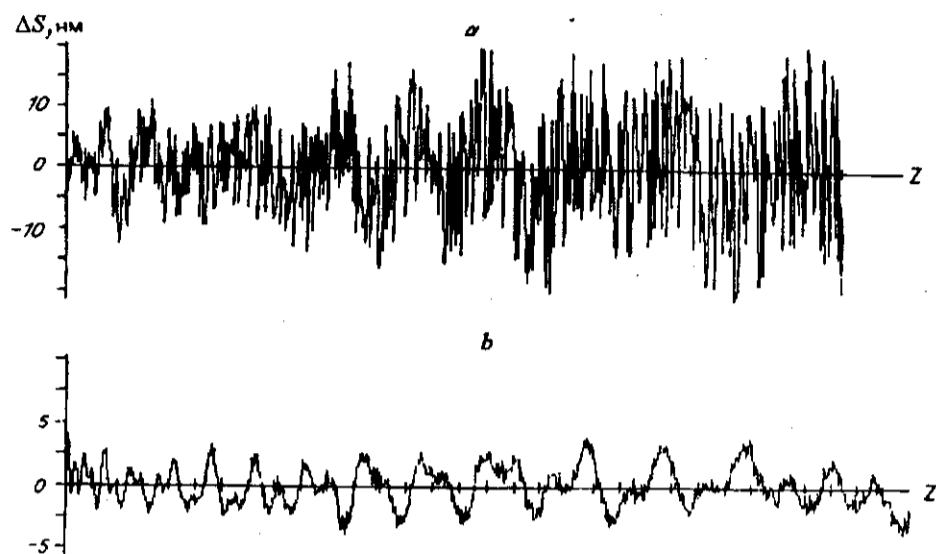


Рис. 6

представляют собой невязки, полученные следующим образом. За время падения СПТ измерялись интервалы времени T_i , соответствующие прохождению заданных интервалов пути $S_i = 3200i\lambda/2$. Основываясь на результатах измерений и соотношениях (3) — (6), методом наименьших квадратов вычислялись параметры свободного падения h , V_0 и g . Затем по вычисленным значениям h , V_0 , g и измеренным интервалам T_i вычислялись теоретические значения $S_{i\theta}$, а невязки определялись как разность $S_i - S_{i\theta}$.

На верхнем графике наблюдаются в основном погрешности из-за дискретности счета (ГАБЛ), на нижнем (ГАБЛ-М) — проявляется нескомпенсированная сейсмическая виброзащитной системой часть виброрейсмических помех с амплитудой порядка 2 нм.

Методика измерений лазерным баллистическим гравиметром. Значение g , вычисленное по результатам измерения параметров одного падения СПТ, содержит ошибку, обусловленную в основном влиянием инерционной помехи — вибрационными и микросейсмическими колебаниями постаментов, на котором установлен гравиметр. Специальная виброзащитная система уменьшает влияние этой помехи почти на порядок: среднеквадратическая ошибка единичного измерения равна $10 + 50$ мкГал ($1 \text{ мкГал} = 1 \cdot 10^{-8} \text{ м/с}^2$) в зависимости от интенсивности и удаленности источников вибрационных воздействий. Закон распределения ошибки близок к нормальному, поэтому дальнейшее уменьшение этой ошибки осуществляется статистической обработкой результатов повторных измерений g .

Один цикл измерений, включающий установку СПТ в исходное положение, его ориентацию, отпускание, измерение параметров свободного падения, улавливание СПТ в конце падения и обработку на микроЭВМ результатов измерений, длится около 12 с. Циклы измерений повторяются автоматически заданное число раз, при этом сразу же производится статистическая обработка результатов: вычисляется среднее значение и его среднеквадратическая погрешность. Обычно одна серия измерений длится около 10 мин. За это время производится 57 циклов повторных измерений. После 10-минутной серии измерений делается перерыв на 5—10 мин для контроля юстировок гравиметра. Затем запускается новая серия измерений. Серии измерений повторяются до тех пор, пока погрешность средневзвешенного значения результатов этих измерений не снизится до 1—2 мкГал. Число этих серий зависит от уровня инерционных помех в точке наблюдений.

На пунктах, удаленных от промышленных объектов и автомобильных дорог, среднеквадратическая погрешность 10-минутной серии измерений равна 1—2 мкГал и увеличивается до 6 мкГал при сильных порывах ветра.

В каждую серию измерений вносится поправка, учитывающая влияние сопротивления остаточного воздуха в баллистической камере, и поправка за прилив, приводящая измеренное значение g к уровню невозмущенного геопотенциала [1]. Учитывается притяжение атмосферных масс и изменение широты, обусловленное движением полюса Земли. О других инструментальных поправках подробно изложено в [1].

Суммарная среднеквадратическая ошибка определения абсолютного значения g гравиметром ГАБЛ-М не превосходит 6 мкГал и определяется в основном инструментальными погрешностями.

При исследовании вариаций силы тяжести представляет интерес погрешность измерения относительных изменений g . Систематическая ошибка постоянна и в данном случае исключается. Величина этой ошибки определяется внутренней сходимостью результатов повторных измерений (степенью компенсации инерционной помехи) и в пределе зависит от долговременной стабильности параметров измерительной схемы гравиметра. Экспериментально, сравнением результатов измерений гравиметром ГАБЛ-М разностей Δg на различных постаментов в Потсдаме и в Севре с аналогичными результатами, полученными с помощью относительных гравиметров Ла Коста-Ромберга, установлено, что ошибка относительных измерений гравиметром ГАБЛ-М не превосходит 3 мкГал. При этом среднеквадратическая ошибка результатов по их внутренней сходимости равна 2 мкГал.

Результаты измерений вариаций силы тяжести. С 1976 г. авторами статьи ведутся с помощью лазерных гравиметров регулярные наблюдения за стабильностью гравитационного поля на обширной территории Земли. При этом приливные вариации g учитываются введением расчетных поправок.

Серией повторных измерений в экваториальной зоне (в Сингапуре), в средних широтах Евразии (в Потсдаме, Москве и Новосибирске) и в сейсмоактивных районах Тянь-Шаня и Камчатки обнаружены неприливные вариации УСТ (как глобальные, так и региональные), в десятки раз превосходящие погрешности измерения [4—6]. В частности, выявлены составляющие вариации с периодом около 12 лет [6] и гравитационная аномалия величиной +50 мкГал, перемещающаяся с востока на запад со средней скоростью $33,5^\circ$ в год [4], которая может быть связана с распространением глобальной волны тектонических напряжений [7].

На рис. 7 приведены вариации Δg , измеренные лазерными гравиметрами ИАиЭ СО РАН (гравиметром ГАБЛ до 1984 г. и ГАБЛ-М с 1985 г.) в Новосибирске и Москве, и данные измерений японским лазерным гравиметром на пункте Цукуба [8]. Здесь за нуль приняты средние значения вариаций на пунктах Новосибирск и Москва, а первый результат измерений в Цукубе в 1982 г. приравнен к близкому по времени результату измерений в Новосибирске. В результаты измерений в Новосибирске и Москве, согласно рекомендациям Международной ассоциации геодезии [9], внесены поправки, учитывающие положение полюса Земли в моменты измерений и притяжение атмосферных масс. Среднеквадратическая ошибка измерений в Москве и Новосибирске не превышает 4 мкГал, а в Цукубе достигает 10 мкГал.

Измерения в Москве проводились на международном гравиметрическом пункте «Ледово» тем же гравиметром, что и в Новосибирске, и, как правило, не позже, чем через неделю после измерений в Новосибирске. Результаты этих проведен-

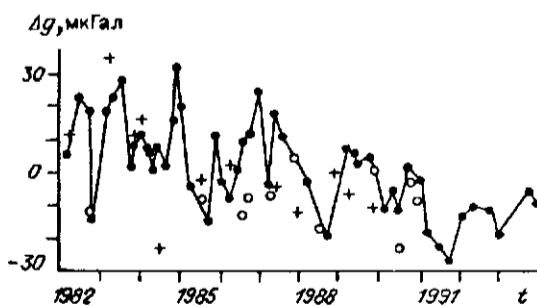


Рис. 7

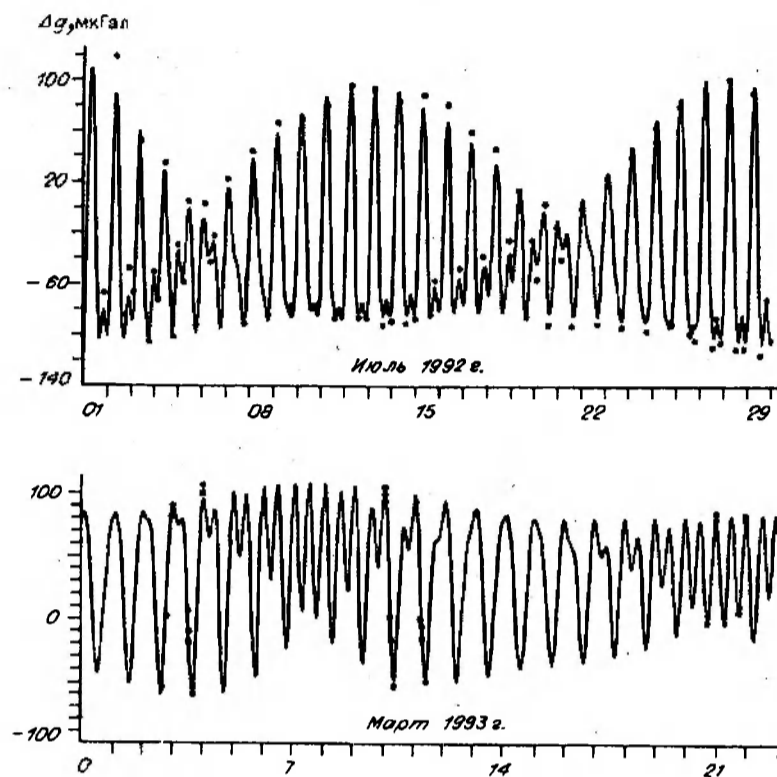


Рис. 8

ных в близкие моменты времени отсчетов совпадают с точностью до ± 6 мкГал. Такое же хорошее совпадение результатов наблюдается для большинства измерений, проведенных в близкие моменты времени в Новосибирске и Цукубе. Из анализа результатов выявлено уменьшение g со средней скоростью $2,5$ мкГал в год. Если принять, что этот эффект обусловлен увеличением высоты ΔR гравиметрического пункта по гипотезе о расширяющейся Земле [10], то при нормальном значении вертикального градиента силы тяжести $\gamma = 309$ мкГал/м средняя скорость изменения ΔR составит 8 мм в год. На основе межконтинентальных измерений, выполненных NASA [10], в 1988 г. $\Delta R = +(2,8 \pm 0,8)$ см, что согласуется с измеренным нами изменением g в этом году (см. рис. 7, где приведены результаты измерений вариаций Δg в Новосибирске (\bullet), Москве ($+$) и Цукубе (\circ)).

Разрешающая способность гравиметра ГАБЛ-М позволяет проводить наблюдения и за приливными вариациями УСТ. В июне-июле 1992 г. и в это же время в 1993 г. такие наблюдения проведены в течение месяца, а с декабря 1992 г. по июнь 1993 г. наблюдения за земными приливами продолжались 6 мес. Каждая серия содержит 57 результатов единичных измерений g , продолжительность такой серии 10 мин. Средние значения этих серий имеют среднеквадратическую погрешность определения около 2 мкГал. Интервалы измерений были привязаны к моментам достижения экстремальных значений расчетных приливных возмущений. На рис. 8 представлены фрагменты результатов этих наблюдений (помечены точками). Здесь изображена переменная часть измеренных значений УСТ (вариации Δg), причем погрешность определения этих значений, если отложить ее на графике, меньше размеров точек. Сплошной линией изображено теоретическое приливное изменение $\Delta g_{\text{пр}}$.

В результате анализа данных наблюдений обнаружены два эффекта: резкое увеличение g на $22,5$ мкГал в период с 1 по 3 июля 1992 г. и аномальное уменьшение на 3% в марте 1993 г. приливного δ -фактора, характеризующего

упругопластические приливные деформации Земли. Такие сравнительно кратковременные изменения g так же, как и резкие изменения УСТ на рис. 7, могут быть вызваны возмущениями орбитального движения центра масс системы Земля — Луна [11], не учитываемыми классической теорией приливов. Еще более короткопериодические (минутные) вариации g возможны по теоретическим оценкам [12] от гравитационных воздействий малых черных дыр, движущихся вблизи поверхности Земли.

Для уточнения и объяснения регистрируемых вариаций УСТ необходима постановка экспериментов с синхронными измерениями g в различных точках Земли группой гравиметров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Arnautov G. P., Boulanger Yu. D., Kalish E. N. et al. "Gabl", an absolute free-fall laser gravimeter // *Metrologia*.—1983.—N 19.
2. Boulanger Yu., Faller J., Groten E. et al. Results of the second international comparison of absolute gravimeters in Sevres // *Bulletin d'Information, BGI*.—Toulouse, 1986.—N 59.
3. Арнаутов Г. П. Измерение ускорения свободного падения с учетом неравномерности его градиента // *Автометрия*.—1987.—№ 1.
4. Арнаутов Г. П., Калиш Е. И., Коронкевич В. П. и др. Неприливные изменения гравитационного поля Земли в разнесенных по долготе точках // *ДАН СССР*.—1985.—280, № 5.
5. Арнаутов Г. П., Курскеев А. К., Гусаков В. В. Абсолютные изменения силы тяжести на территории Алма-Атинского полигона // *Повторные гравиметрические наблюдения. Вопросы теории и результаты: Сб. науч. тр.*—М.: Изд. МГК, 1986.
6. Arnautov G. P., Boulanger Yu. D., Scheglov S. N., Elstner C. Absolute gravity measurements at Potsdam // *Gerlands Beiträge zur Geophys.*—1990.—99, N 4.
7. Сергеев Л. Ф., Василенко И. Ф., Сапрыгин С. М. Распространение глобальной волны тектонических напряжений в 1978—1983 гг. // *ДАН СССР*.—1989.—307, № 5.
8. Kuroishi Yu., Murakami M., Kaidzu M. Improvement of the gravity network with absolute gravity measurements // *Journ. Geodetic Soc. Jap.*—1992.—38, N 1.
9. Resolutions International Gravity Commission. International Absolute Gravity Basestation Network // *Bulletin d'Information, BGI*.—Toulouse, 1984.—N 58.
10. Vogel Klaus. Recent crustal movements in the light of Earth expansion theory // *Veröffentlichungen des Zentralinstitut für Physik der Erde*.—Potsdam.—1989.—N 102/3.
11. Авсюк Ю. Н., Щеглов С. Н. Неприливная глобальная вариация и ее исследования при абсолютных определениях силы тяжести // *ДАН*.—1986.—288, № 1.
12. Trofimenko A. P. Short-time variations of the gravitational potential first derivative // *Fizika B*.—1992.—1, N 2.

Поступила в редакцию 23 марта 1994 г.