

Г. П. Арнаутов, Е. Н. Калиш, Ю. Ф. Стусь, М. Г. Смирнов

*(Новосибирск)***ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
ВАРИАЦИЙ УСКОРЕНИЯ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ
АБСОЛЮТНЫМИ ЛАЗЕРНЫМИ ГРАВИМЕТРАМИ**

Проанализированы результаты многолетних (1976–2004 гг.) измерений вариаций ускорения силы тяжести g (как приливных, так и неприливных) в различных регионах Земли: в платформенной области (в средних широтах Евразии), в сейсмоактивных зонах (на Тянь-Шане, Алтае и в районе озера Байкал). В этих регионах обнаружены изменения g , достигающие $51 \cdot 10^{-8} \text{ м/с}^2$ и имеющие как глобальный, так и региональный характер; при этом среднеквадратическая погрешность в большинстве измерений g не превосходила $3 \cdot 10^{-8} \text{ м/с}^2$. (Некоторые данные наблюдений приводятся впервые.) Обсуждаются возможные причины обнаруженных вариаций ускорения силы тяжести g .

Введение. Решению задач глобальной геодинамики во многом способствует исследование вариаций гравитационного поля Земли на основе прецизионных повторных гравиметрических наблюдений. Наиболее точным и надежным инструментом для таких исследований является абсолютный лазерный баллистический гравиметр типа ГАБЛ. В отличие от относительных гравиметров абсолютные гравиметры ГАБЛ [1, 2] имеют наивысшую точность и стабильность схемы измерений абсолютного значения ускорения силы тяжести g , что очень важно при исследовании долговременных вариаций Δg . Различные модификации гравиметра ГАБЛ прошли неоднократные международные метрологические сравнения с аналогичными приборами США, Франции, Италии, Китая и других стран в Международном бюро мер и весов (МБМВ) в Париже [3–5]. В результате этих испытаний установлено, что среднеквадратическая погрешность измерения абсолютного значения g гравиметрами ГАБЛ в 1977 г. не превышала $1 \cdot 10^{-7} \text{ м/с}^2$, а в настоящее время снижена до $3,5 \cdot 10^{-8} \text{ м/с}^2$. При этом среднеквадратическая погрешность измерений вариаций g не превосходит $3 \cdot 10^{-8} \text{ м/с}^2$ и определяется в основном стабильностью измерительной схемы гравиметра и остаточной погрешностью усредненного значения микросейсмических и вибрационных помех (инструментальная погрешность таких измерений постоянна и исключается при исследовании вариаций g). При сверке гравиметров в МБМВ, проведенной в 1997 г., расхождение результатов измерений гравиметром США FG-5 и гравиметром России ГАБЛ-Э не превышало $\pm 1 \cdot 10^{-8} \text{ м/с}^2$. Расхожде-

ние результатов измерений абсолютными гравиметрами других стран было почти на порядок выше [5].

Целью данной работы является обобщение результатов многолетних измерений неприливных вариаций силы тяжести в различных регионах Земли и анализ возможных причин возникновения этих вариаций.

1. Глобальные изменения ускорения силы тяжести. Теоретическому анализу возможных причин и значений изменений силы тяжести глобально-го характера посвящены работы [6–13]. Большинство предполагаемых вариаций g оценивается значениями, не превышающими погрешность современных гравиметров. Наибольшие глобальные изменения g предполагались из-за возможного перемещения ядра Земли относительно ее оболочек. В частности, согласно гипотезе Барты – Фогеля [7, 8] в средних широтах Евразии (например, в районе Новосибирска) возможное изменение g могло достигать $1 \cdot 10^{-6}$ м/с² в год.

По расчетам, проведенным в [9], вариации g , вызванные процессами, изменяющими скорость вращения Земли, могут достигать $1 \cdot 10^{-7}$ м/с². Предполагаемые вариации g , обусловленные перестройкой земной коры, не превышают $5 \cdot 10^{-11}$ м/с² в год [10]. Сезонные колебания уровня Мирового океана могут вызвать смещение центра тяжести Земли и привести к изменениям g на земной поверхности порядка $6 \cdot 10^{-9}$ м/с² [11]. Глобальные перемещения атмосферных масс могут вызвать изменения g до $1,3 \cdot 10^{-8}$ м/с² [12]. Движение полюса Земли (изменение ее оси вращения и, следовательно, широты точки наблюдения) может привести к изменениям g более чем на 10^{-8} м/с² [13]. Все эти расчеты в большинстве своем приближенные и требуют экспериментального уточнения.

Наибольшее число повторных гравиметрических наблюдений с целью обнаружения глобальных изменений g проведено с помощью гравиметров ГАБЛ в средних широтах Евразии на линии Новосибирск–Москва–Потсдам. В Москве наблюдения проводились на международном гравиметрическом пункте «Ледово», в Новосибирске – на пункте «ИАЭ», в Потсдаме (Германия) – на пунктах «Потсдам S-13» и «Потсдам S-14». Результаты этих измерений (1976–2004 гг.) приведены на рис. 1 (отмечены знаком «◇»). К сожалению, наблюдения вариаций Δg на пункте «Ледово» не проводятся с 1995 г., а в Потсдаме – с 1987 г. Результаты измерений в Потсдаме дополнены данными, полученными в 1988 и 1990 гг. немецкими коллегами [14] с помощью американского лазерного гравиметра JLAG-3 (рис. 1, *с*, отмечено знаком «×»). Результаты измерений в Новосибирске представлены на рис. 1, *а*, в Москве – на рис. 1, *б*, в Потсдаме – на рис. 1, *с*. Для удобства сравнения вариации Δg отсчитываются от условного среднего абсолютного значения g , совмещенного с осью абсцисс и равного среднему значению всех результатов измерений. В соответствии с рекомендациями Международной гравиметрической комиссии [15] в результаты измерений внесены поправки, учитывающие положение полюса Земли в моменты измерений и притяжение атмосферных масс. Из рис. 1, *а*, *б* видно, что вариации Δg в Новосибирске и в Москве (если они были) до 1981 г. не превышали погрешность измерений. В 1981–1983 гг. в Новосибирске и в 1983 г. в Москве обнаружены изменения Δg , существенно превосходящие возможные ошибки измерений. В Новосибирске они достигли 51 ± 4 мкГал, а в Москве – 29 ± 4 мкГал.

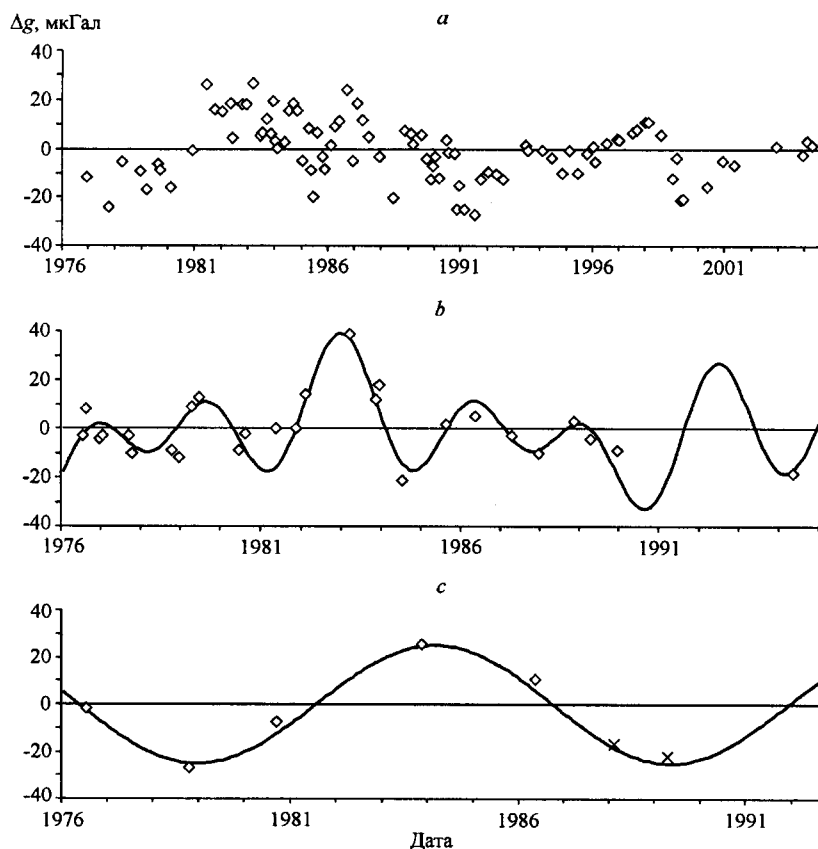


Рис. 1

Была оценена связь результатов измерений в Москве и Новосибирске. До 1980 г. вариации их значений не коррелируются. Наиболее коррелированы результаты 1980–1983 гг., причем максимальный коэффициент корреляции ($k(\tau) = 0,97$) достигается при сдвиге во времени московских результатов в сторону новосибирских на 1,375 года [16]. Учитывая разность географических координат Москвы и Новосибирска, можно предположить, что обнаруженные вариации силы тяжести «перемещались» с востока на запад со средней скоростью $33,5^\circ$ в год. Эти оценки весьма приблизительные (по техническим причинам не удалось провести непрерывные и одновременные наблюдения на обоих гравиметрических пунктах). Если предположить, что максимальное значение g в Новосибирске было в октябре 1981 г., то при указанной выше скорости перемещения гравитационного возмущения существенное увеличение гравитационного ускорения в Потсдаме следовало ожидать в ноябре 1983 года. Результаты измерений, проведенных нами в это время в Потсдаме (значение g увеличилось на 35 мкГал по сравнению с 1980 г.), свидетельствуют в пользу предположения о глобальном характере обнаруженных вариаций и о перемещении вызывающего их воздействия с востока на запад. Сплошной линией на рис. 1, *b*, *c* показаны результаты аппроксимации измеренных значений Δg суммой гармоник. Для Новосибирска (на рис. 1, *a*

не показаны) преобладающими гармониками были составляющие с периодами 10,4; 8,2; 1,8 года и амплитудами 26, 19 и 5 мкГал; для Москвы – с периодами 13,4; 4,8; 3,2 года и амплитудами 10, 13 и 16 мкГал; для Потсдама период составлял 10,6 года, а амплитуда около 25 мкГал. Общей и наиболее значимой для этих вариаций является составляющая со средним периодом 11 лет. Учитывая сравнительно низкую частоту измерений в Москве и Потсдаме (до 1 раза в два года), разброс значений этих периодов можно считать удовлетворительным.

Аналізу причин обнаруженных нами вариаций Δg посвящено несколько работ. В частности, в [17] предполагается, что приливные поправки, вносимые в результаты измерений абсолютных значений g по классической теории приливов, являются неполными и могут быть причиной зарегистрированных нами вариаций. Подробное экспериментальное исследование этой причины приведено в разд. 3.

В работе [18] выдвинута гипотеза о возможности возникновения в 1978–1979 гг. глобальной волны тектонических напряжений вследствие поддвига Тихоокеанской плиты под Евроазиатскую. Распространение такой обособленной волны сжатия длительностью до 3 лет может проявляться в вариациях различных геофизических параметров, в частности в виде вариаций силы тяжести. По данным пьезометрических, геодезических, тензометрических и гравиметрических наблюдений (учтены результаты измерений авторов) средняя скорость распространения этой волны равна $29,5^\circ$ в год и двигалась она с востока на запад [18]. Причиной возникновения поддвига плит согласно [18] явилось резкое изменение угловой скорости вращения Земли (на $8 \cdot 10^{-9} \text{ с}^{-1}$) в 1978–1980 гг. Вступление волны сжатия в соответствии с этой гипотезой могло быть причиной увеличения g в Новосибирске в 1981–1983 гг., а прохождение ее могло вызвать уменьшение g в последующие годы.

Исследованы также и возможные причины изменения Δg , обусловленные местными (локальными) возмущающими факторами. Особенно большое внимание было уделено анализу влияния на Δg изменяющегося уровня подземных вод H .

2. Влияние изменения уровня подземных вод на вариации силы тяжести. Наиболее полные данные об изменениях уровня подземных вод мы имеем для пункта «ИАЭ». Особенностью этого гравиметрического пункта является его сравнительно небольшая (менее 3 км) удаленность от берега Новосибирского водохранилища. Между водохранилищем и пунктом «ИАЭ» находится скважина № 55, на которой Новосибирская геолого-поисковая экспедиция (НГПЭ) с 1979 г. проводит регулярные наблюдения за режимом подземных и поверхностных вод. Средние месячные результаты наблюдений приведены на рис. 2 (кривая 1). Здесь же представлены данные измерений уровня воды в водохранилище в 1984–1992 гг. (кривая 2). Отсчет приведенных на рис. 2 уровней производится относительно уровня поверхности Земли вблизи скважины № 55. Из графиков рис. 2 можно выделить два преобладающих типа вариаций.

Первый тип – это монотонное изменение уровня, аналогичное (по данным НГПЭ) режиму уровня подземных вод (УПВ) долины реки Обь, который в соответствии с геолого-климатическими условиями характеризуется следующим образом: в 1960–1961 гг. долина реки Обь имела максимальный УПВ, в 1991 г. – минимальный, а в настоящее время вновь наблюдается под-

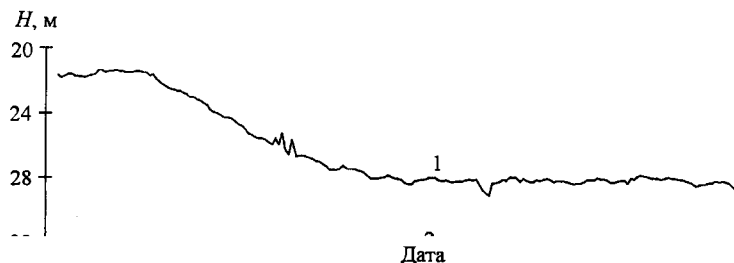


Рис. 2

ем этого уровня. Вследствие удаленности скважины относительно основного русла Оби и из-за ограниченной гидравлической проницаемости геологических пород возможно запаздывание УПВ в районе скважины относительно УПВ основного русла [19].

Второй тип вариаций водного уровня в скважине имеет период около одного года и обусловлен в основном колебаниями уровня воды в водохранилище. Из-за большой инерционности подземной гидросферы в этих вариациях также наблюдается запаздывание фазы и уменьшение амплитуды колебаний УПВ по мере удаления от берега водохранилища. По этим причинам в скважине № 55 вариации УПВ более сглажены и слабее коррелированы с изменениями уровня воды в водохранилище, чем в скважинах, близлежащих к берегу водохранилища. Можно предполагать, что вблизи пункта «ИАЭ» (в 2 раза более удаленного от берега водохранилища, чем скважина № 55) колебания подземных вод не превосходят вариации, фиксируемые на пункте № 55. Допустимость этого предположения подтверждает структура пород в данном районе. Вблизи скважины № 55 (по данным НГПЭ) структура пород следующая: от поверхности Земли и до глубины 12 м находится песок, до 14 м – суглинки, затем до 36,5 м – песок, от 36,5 до 40,2 м – супеси, а далее до 70 м – глинистые сланцы. Уровень постаumenta гравиметрического пункта «ИАЭ» на 25 м выше уровня земной поверхности в районе скважины № 55. В соответствии с этим можно предположить, что баланс (уровень) подземных вод в районе пункта «ИАЭ» определяется в основном количеством воды, поступившей в водоносный пласт в виде инфильтрации, т. е. зависит от метеорологической обстановки (количества осадков и испарений), а влияние колебаний уровня водохранилища пренебрежимо меньше.

Таким образом, при количественной оценке (по максимально возможной величине) степени влияния гидрологической обстановки в районе гравиметрического пункта «ИАЭ» на результаты гравитационных измерений за исходные будем брать в основном данные, полученные в скважине № 55:

1) с ноября 1981 г. в течение 12 лет наблюдалось монотонное уменьшение (почти на 6 м) УПВ, на пункте «ИАЭ» возможно запаздывание этого изменения и уменьшение его величины и длительности;

2) максимальная амплитуда сезонных колебаний УПВ не превышает 1,4 м;

3) при характерных для исследуемого района глубинах залегания подземных вод (более 20 м) дождевые осадки практически не сказываются на их уровнях: влага расходуется на испарение и транспирацию с поверхности земли и из зоны аэрации [19].

Оценим ожидаемое влияние уровня воды в водохранилище и уровня подземных вод в районе гравиметрического пункта на значение g . Наибольшие вариации силы тяжести Δg может вызвать гравитационное притяжение водного слоя в районе гравиметрического пункта, изменяющееся в зависимости от колебаний уровня этого слоя. Для оценки порядка величины Δg , следуя [20], воспользуемся формулой притяжения бесконечного плоскопараллельного слоя $\Delta g = 2\pi\gamma\sigma\Delta H$, где γ – гравитационная постоянная, σ – изменение плотности горных пород в данном районе в связи с водонасыщением, ΔH – изменение уровня подземных вод. Если $\Delta H = 1$ м, то вариации Δg могут достигать 18 мкГал при $\sigma = 0,42$ г/см³ (песок), 15 мкГал при $\sigma = 0,36$ г/см³ (супеси) и 10 мкГал при $\sigma = 0,23$ г/см³ (суглинки) [20].

Возможно непосредственное влияние притяжения изменяющегося уровня воды водохранилища. Но это влияние существенно (до десятков микрогал) на расстояниях менее 100 м [21] и убывает по квадратичному закону с удалением гравиметрического пункта от берега.

Прогиб поверхности прибрежной зоны водохранилища при колебаниях его уровня на 10 м по расчетным данным и результатам измерений [22] не превышает 3 мм даже в непосредственной (до десятков метров) близости к берегу. При нормальном вертикальном градиенте силы тяжести, равном 309 мкГал/м, этот прогиб вызовет увеличение g не более чем на 1 мкГал.

Исходя из приведенных выше оценок, можно заключить, что оба основных вида изменений УПВ, зарегистрированных в районе гравиметрического пункта «ИАЭ» (см. рис. 2, кривая 1), могут вызвать вариации Δg , превосходящие погрешность измерений. Монотонное снижение УПВ на 6 м может уменьшить g на 108 мкГал, а сезонные колебания УПВ с амплитудой до 1,4 м могут быть причиной вариаций $\Delta g = 25$ мкГал. Эти оценки выражают максимально возможные значения Δg . Сравним их с результатами измерений.

При анализе экспериментальных данных (см. рис. 1, а и рис. 2) выявлена корреляция сглаженных вариаций Δg и ΔH , соответствующих в основном монотонному изменению ΔH на 6 м в 1981–1988 гг. Максимальный коэффициент корреляции между Δg и ΔH , равный 0,74, достигается при сдвиге ΔH в сторону запаздывания относительно Δg на время $\Delta t = 810$ суток. Этот факт можно объяснить запаздыванием изменений уровня подземных вод в районе пункта «ИАЭ» относительно ΔH в районе скважины № 55 вследствие ограниченной водопроницаемости горных пород. Учитывая, что пункт «ИАЭ» находится на расстоянии $S = 1500$ м от скважины, можно определить среднюю скорость фильтрации подземных вод в данном районе: $V = S/\Delta t = 1,85$ м/сутки. Это значение входит в диапазон скоростей, определенных для полунепроницаемых пород [19]. Проведенная оценка взаимосвязи Δg и ΔH имеет в основном качественный характер, так как измерения ΔH непосредственно вблизи пункта «ИАЭ» не проводились.

На рис. 3 представлено распределение измеренных на пункте «ИАЭ» в 1982–2004 гг. значений Δg в зависимости от времени года (по месяцам). Здесь знаком «x» обозначены средние месячные значения Δg в различные годы, а знаком «♦» отмечено среднее этих значений за весь период наблюдений (1982–2004 гг.). Отсчет Δg по оси ординат ведется относительно средне-

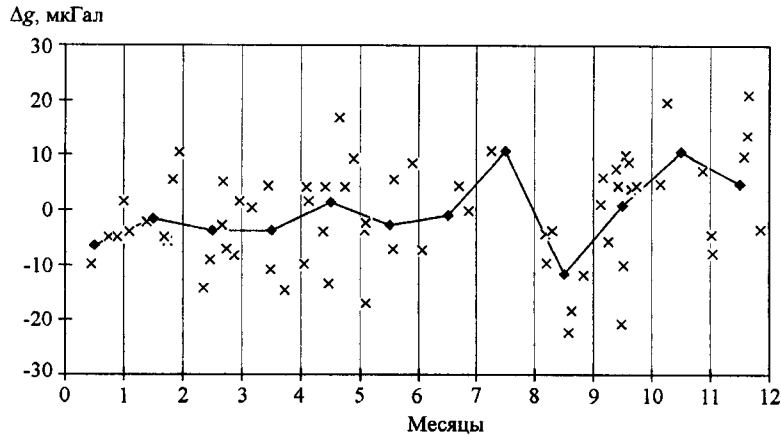


Рис. 3

го значения всех результатов измерений, приравненного к нулю. При этом из измеренных значений Δg исключена часть вариации, аппроксимированной параболой $\Delta g_m = -(a_1 t + a_2 t^2)$ ($a_1 = 5,48$ мкГал/год, $a_2 = 0,22$ мкГал/год²), характеризующая монотонное изменение Δg , которое может быть связано с изменением ΔH (см. рис. 2).

Из анализа данных, приведенных на рис. 3, установлено, что с декабря по июль, а также в октябре усредненные для каждого месяца по всему 22-летнему циклу наблюдений значения отличаются не более чем на ± 5 мкГал. Этот разброс средних значений сравним с погрешностью каждого из измерений. Лишь в августе, сентябре и ноябре разброс средних значений Δg достигал ± 10 мкГал. Но эти данные слабо представлены: за весь 22-летний цикл наблюдений в августе было проведено всего одно измерение в 1987 г., а в ноябре из восьми измерений шесть проведены в 1984 г. и по одному – в 1985 и 1993 гг. Таким образом, результаты, приведенные на рис. 3, свидетельствуют об отсутствии значимых сезонных вариаций в измеренных значениях Δg .

3. Приливные вариации ускорения силы тяжести по результатам измерений лазерными гравиметрами. Одной из причин возникновения вариаций Δg (см. разд. 1) может быть недостаточно точное вычисление приливных поправок [17, 23].

Для проверки этой гипотезы гравиметрами типа ГАБЛ-М [2] в 1991–1995 гг. проводились наблюдения приливных вариаций силы тяжести g . На первом этапе (в 1991–1992 гг.) эти исследования велись одним гравиметром на гравиметрическом пункте Института автоматизации и электрометрии (ИАиЭ) СО РАН «Боровое» в Новосибирской области. Вследствие удаленности от источников промышленных и транспортных возмущений этот пункт характеризуется низким уровнем вибрационных и сейсмических помех. По сравнению с пунктом «ИАЭ» их уровень почти в 10 раз меньше. Это позволило проводить измерения g практически с одинаковой точностью не только ночью (как на пункте «ИАЭ»), но и днем, что особенно важно при наблюдении приливных вариаций. Среднеквадратическая погрешность определения значения g по результату одного броска пробной массы (ПМ) в гравиметре ГАБЛ-М в основном не превышала на этом пункте 20 мкГал. Поскольку распределение погрешности по массиву повторных бросков ПМ было близко к

нормальному закону распределения [24], для ее уменьшения использовался метод накопления. В течение 5 мин производилось 30 бросков ПМ и проводилось 30 единичных измерений. Вычислялись среднее значение этой серии измерений и среднеквадратическая погрешность этого значения, контролировался закон распределения погрешности. После контроля юстировки гравиметра (через 5 мин) запускалась следующая серия измерений. Среднеквадратическая погрешность каждой из серий в основном не превышала 3 мкГал, при сильном ветре она достигала 6 мкГал. В экспериментах 1991 г. осуществлялись три серии измерений вблизи экстремальных значений теоретического прилива. Средние значения этих серий по времени располагались симметрично относительно моментов достижения экстремумов: одна серия измерений проводилась до достижения экстремума, среднее значение второй серии соответствовало моменту достижения экстремального значения, а среднее значение третьей серии было симметрично времени достижения среднего отсчета в первой серии измерений. Для более надежного нахождения экстремумов приливной вариации в 1992 г. выполнялись пять определений абсолютного значения силы тяжести: по два измерения до и после экстремума и одно измерение в момент экстремума. В 1991 г. наблюдения велись с 24 июня по 24 июля, в 1992 г. – с 1 по 29 июля. Рис. 4 иллюстрирует результаты измерений 1992 г. Всего с 1 по 29 июля было измерено 476 значений силы тяжести, каждое из которых определялось по 30 броскам ПМ. Знаком «о» на рисунке отмечены средние значения пяти серий измерений вблизи экстремумов приливных вариаций. Среднеквадратическая погрешность средних значений в основном не превышала 3 мкГал. Сплошной линией обозначены значения теоретического прилива, вычисленного по классической теории.

В результате наблюдений приливных вариаций в 1991–1992 гг. констатируется:

1. В 1991 г. выявлена возмущенная часть приливной вариации с размахом более 10 мкГал.

2. В 1992 г. в период с 1 по 3 июля зарегистрировано аномальное уменьшение силы тяжести на 22 мкГал и увеличение δ -фактора, характеризующее приливную деформацию Земли, на 7 %.

3. Выделены отличающиеся от рассчитанных по классической теории приливов возмущения с периодами 14 и 28 суток, имеющие амплитуды 5,2 и 5,8 мкГал соответственно, связанные с фазами полнолуния и новолуния. Подбором различных значений δ -фактора не удалось скомпенсировать эти возмущения.

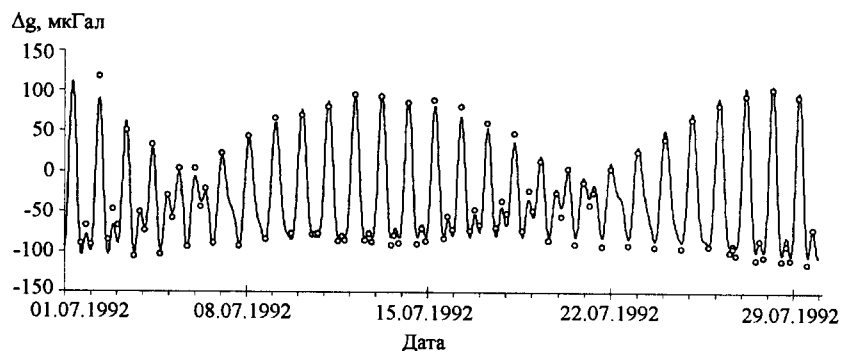


Рис. 4

Для повышения надежности измерений земных приливов в 1995 г. были проведены синхронные измерения двумя лазерными гравиметрами, разработанными и изготовленными в ИАиЭ СО РАН. Один из этих гравиметров был передан Объединенному институту физики Земли (ОИФЗ) РАН. Измерения теоретические приливные поправки, посчитанные по традиционной программе, принимали одинаковое значение на восходящей и нисходящей ветвях приливной кривой. Измерения проводились в период с 26 июня по 12 июля 1995 г. Намеченные программой моменты измерений гравиметрами состояли из трех серий с общей продолжительностью наблюдений 40 мин. На пункте «Ключи» в обработку были приняты результаты 138 серий измерений, на пункте «Боровое» – результаты 126 серий. Каждая серия состояла из 56–57 бросков ПМ (единичных измерений). Среднее значение силы тяжести за 40-минутный интервал измерений (три серии измерений) определялось с погрешностью $\pm 2,7$ мкГал («Ключи») и $\pm 5,6$ мкГал («Боровое»). При обработке результатов измерений обнаружен временной ход изменения среднего значения g , амплитуда которого составила около 10–15 мкГал. Периодичность этой вариации достоверно установить не удалось [25].

Таким образом, в результате длительных наблюдений приливных вариаций силы тяжести установлено, что в этот период возмущения приливных вариаций не превышали 15 мкГал. Данный факт подтвержден и более длительными (в течение полугода) наблюдениями, проведенными на пункте «Ключи».

4. Вариации ускорения силы тяжести в сейсмоактивных районах. Наибольшее число повторных наблюдений вариаций Δg проведено с помощью лазерного гравиметра ГАБЛ-М в Байкальской рифтовой зоне (на сеймостанции «Талая» и в обсерватории «Листвянка» в Иркутской области). Для контроля результатов этих измерений практически одновременно (с перерывом не более недели) проводились наблюдения гравиметром ГАБЛ-М в платформенной области в Новосибирске и Иркутске.

На рис. 5 показаны результаты измерений вариаций Δg ускорения силы тяжести g в Иркутской области. Знаком «♦» обозначены результаты измерений на пункте «Талая», знаками «○» и «Δ» – результаты измерений на пунктах «Иркутск» и «Листвянка» соответственно. За нулевой отсчет вариаций Δg приняты значения g , измеренные на пунктах в начальный период наблюдений. Их среднеквадратическая погрешность не превышает 1–3 мкГал. Такая точность измерений достигается усреднением суточной серии наблюдений. Важной характеристикой точности и надежности измерений на пункте «Талая» являются результаты измерений, проведенных 27.09.2001 г. и 05.10.2001 г. В промежутке между этими измерениями гравиметр был демонтирован и перевезен для работы на другие пункты. По окончании измерений на этих пунктах гравиметр был доставлен на пункт «Талая». После сборки и юстировки гравиметра на пункте «Талая» было проведено очередное измерение. Результаты измерений 27.09.2001 г. и 05.10.2001 г. отличаются на 0,2 мкГал. Аналогичная серия измерений была проведена 29.09.2002 г. и 09.10.2002 г. (также с перевозкой аппаратуры на другие пункты в промежутке

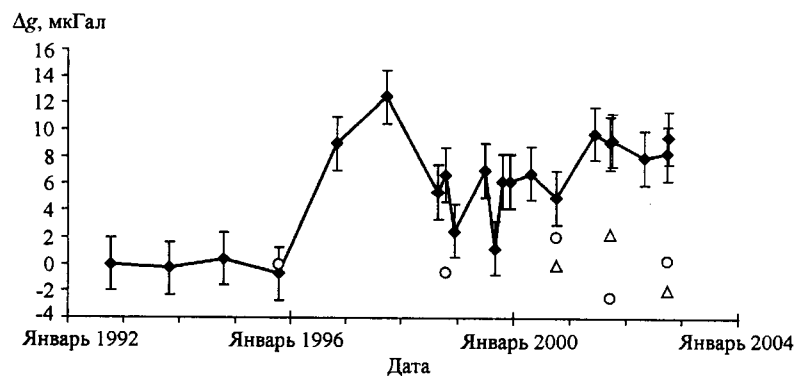


Рис. 5

между этими измерениями). Измеренные значения совпали с точностью до 1 мкГал.

Из рис. 5 видно, что на пункте «Талая» в 1992–1995 гг. вариации Δg не превышали $\pm 0,5$ мкГал (с учетом приливной поправки и поправки на движение полюса Земли) и совпадали с такой же погрешностью с вариациями, обусловленными движением полюса Земли. В 1996–1997 гг. значение g на пункте «Талая» выросло на 12 мкГал, а в 1998–1999 гг. оно уменьшилось (по сравнению с максимальным значением, достигнутым в 1997 г.) на 9 мкГал, сопровождаясь колебаниями в виде переходного процесса с размахом до 5 мкГал. В октябре 1999 г. значение g установилось на уровне, который сохраняется до настоящего времени с погрешностью ~ 2 мкГал. Это новое значение на 7 мкГал больше значения, наблюдавшегося в 1992–1995 гг. Контрольные измерения в платформенной области не зарегистрировали вариаций g , превышающих погрешности измерений. В частности, на пункте «Иркутск» (см. рис. 5) изменения Δg не превышали ± 1 мкГал, что свидетельствует о локальном характере вариаций Δg на пункте «Талая». Наблюдения, начатые на пункте «Листвянка» в 2001 г., не зарегистрировали вариаций g , превышающих погрешность измерений.

Обнаруженные на пункте «Талая» вариации Δg не коррелируются с результатами измерений на этом пункте вариаций наклонов, деформаций и уровня подземных вод: в периоды сильных годовых изменений наклонов и деформаций (1992–1995 гг.) вариаций Δg не зарегистрировано, а в периоды слабого хода наклонов и деформаций отмечены значимые вариации в поле силы тяжести (1996–1999 гг.) [26]. Теоретически увеличение Δg на пункте «Талая» в 1996–1997 гг. на 12 мкГал может быть вызвано снижением уровня точки наблюдения на $h = 4$ см. При нормальном вертикальном градиенте ускорения силы тяжести $\gamma = 309$ мкГал/м изменение высоты точки наблюдения на $h = 4 \cdot 10^{-2}$ м приводит к изменению $\Delta g = \gamma h \approx 12$ мкГал. По аналогии с этим можно предположить, что в 1998–1999 гг. высота пункта наблюдений увеличилась по сравнению с 1997 г. на 3 см. Вертикальные движения земной коры в районе пункта «Талая» являются в настоящее время единственным объяснением изменений гравитационного поля Земли на этом пункте. Возможна связь этих вариаций с землетрясениями 29.06.95 г. (магнитуда $M = 5,3$, расстояние до эпицентра 50 км) и 25.02.99 г. ($M = 5,9$, расстояние до эпицентра 80 км). Для проверки этой гипотезы необходимы дополнительные исследования.

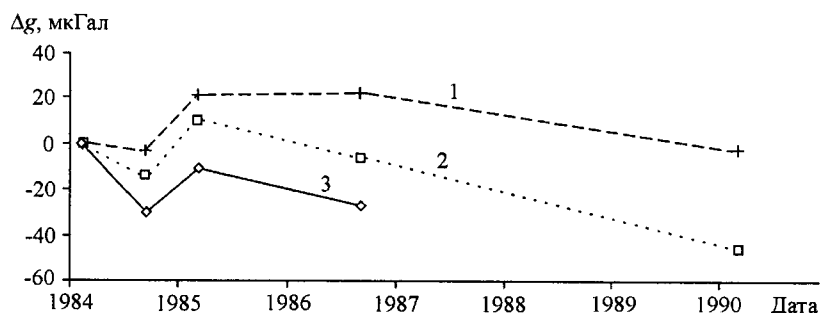


Рис. 6

Для контроля вертикальных движений земной коры на пункте «Иркутск» с 1995 г. сотрудниками Восточно-Сибирского НИИ физико-технических и радиотехнических измерений ведутся наблюдения с помощью спутниковых глобальных позиционных систем, а с 2000 г. измерения с их помощью начаты на пункте «Талая» сотрудниками Института геофизики СО РАН.

Большой интерес представляют также результаты измерений с помощью гравиметра типа ГАБЛ вариаций g на Алма-Атинском прогностическом полигоне. По данным измерений относительными гравиметрами здесь наблюдались изменения g , достигающие 10 мкГал и более, [27]. Измерения гравиметром ГАБЛ проводились на трех пунктах: два пункта («Медео» и «Тургень») находились в зоне различных разломов, а третий («Курты») относился к платформенной области. В измерениях относительными гравиметрами значение g на пункте «Курты» считалось постоянным, поэтому он был принят за исходную точку отсчета вариаций Δg . Изменение разности Δg между этим пунктом и другими пунктами гравиметрического полигона, измеренное относительными гравиметрами, по результатам многолетних наблюдений считалось свидетельством обнаружения вариаций Δg в зонах тектонических разломов. Наблюдения проводились в 1984–1990 гг. весной (в конце февраля – марте) и осенью (в сентябре). Результаты наблюдений показаны на рис. 6 [28]. Здесь кривая 1 – результаты измерений на пункте «Курты», кривая 2 – на пункте «Тургень», кривая 3 – на пункте «Медео». За нулевой отсчет вариаций Δg принято значение g в начальный период измерений.

Анализ результатов показал:

1. В 1984–1986 гг. на всех трех пунктах наблюдались сезонные изменения Δg , вероятно, связанные с таянием в феврале–марте ледников и водонасыщением земной поверхности. Размах вариаций Δg достигал 30 ± 4 мкГал.

2. В 1990 г. на пункте «Тургень» зафиксировано уменьшение Δg (по сравнению с 1986 г.) более чем на 40 ± 3 мкГал. Объяснить причину этого изменения пока не удалось. Измерения на пункте «Медео» в 1990 г. не проводились. Значение g на пункте «Курты» в 1986–1990 гг. снизилось на 10 ± 3 мкГал.

В 1987 и 1991 гг. гравиметром ГАБЛ-М были проведены измерения абсолютного значения g в Петропавловске-Камчатском. Разница значений g , измеренных в эти годы, составила около 30 мкГал. По тенденции изменения значение Δg совпадает с результатами измерений, проведенных в Новосибирске.

На рис. 7 отражены результаты наблюдений в 2000–2004 гг. вариаций Δg на двух пунктах Горного Алтая: в геофизических обсерваториях «Кайтанак»

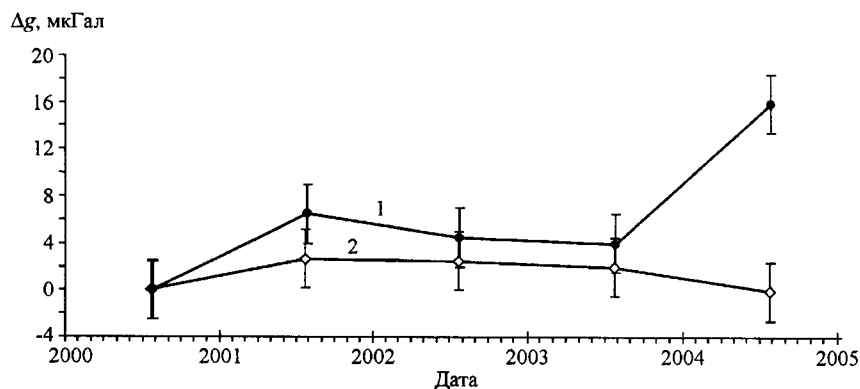


Рис. 7

(кривая 1) и «Усть-Кан» (кривая 2). Здесь за нулевое значение вариаций Δg приняты результаты первых наблюдений в 2000 г. Как видно из рис. 7, в течение трех лет вариации Δg не превышали погрешность измерений. Пункт «Кайтанак» находится в 230 км от эпицентра землетрясения, произошедшего в районе поселка Кош-Агач через 58 дней после серии измерений, проведенных 29–31 июля 2003 г. Следовательно, по данным гравиметрических наблюдений предвестников этого землетрясения не зарегистрировано. Однако изменение Δg , зарегистрированное в 2004 г., может быть следствием данного землетрясения.

ВЫВОДЫ

1. Установлено, что глобальные изменения ускорения силы тяжести Δg , измеренные гравиметрами ГАБЛ, достигали 51 мкГал.

2. В платформенной области (в средних широтах Евразии на линии Новосибирск–Москва–Потсдам) обнаружены вариации Δg , перемещающиеся с востока на запад со средней скоростью 33,5° в год и, возможно, связанные с прохождением волны сжатия, возникшей в литосфере в результате подвига Тихоокеанской плиты под Евроазиатскую в 1978–1979 гг. Этим эффектом можно объяснить увеличение Δg в 1981 г. в Новосибирске, в 1983 г. в Москве и в 1984 г. в Потсдаме и уменьшение Δg в последующие годы (после прохождения волны сжатия). Преобладающие составляющие вариаций Δg в Новосибирске, Москве и Потсдаме имеют периоды 10,4; 13,4 и 10,6 лет соответственно.

3. Монотонное уменьшение ускорения силы тяжести на пункте «ИАЭ» начиная с 1982 г. может быть обусловлено снижением уровня подземных вод долины реки Обь.

4. В рифтовых зонах вариации силы тяжести достигали 12–30 мкГал. Причиной этих вариаций могут быть вертикальные движения земной коры со скоростью до 4 см/год (в Байкальской рифтовой зоне) и сезонные изменения уровня подземных вод (на Алма-Атинском полигоне).

5. На Горном Алтае за 58 дней до землетрясения с $M = 7$ баллов по шкале Рихтера в 230 км от эпицентра не зарегистрировано гравитационных предвестников этого землетрясения, а изменение Δg , зафиксированное в 2004 г., может быть следствием данного землетрясения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Arnautov G. P., Boulanger Yu. D., Kalish E. N. et al.** "GABL", an absolute free-fall laser gravimeter // *Metrologia*. 1983. **19**, N 1.
2. **Арнаутов Г. П., Калиш Е. Н., Смирнов М. Г. и др.** Лазерный баллистический гравиметр ГАБЛ-М и результаты наблюдений вариаций силы тяжести // *Автометрия*. 1994. № 3. С. 3.
3. **Arnautov G., Boulanger Yu., Kalish E. et al.** The absolute value of gravity acceleration on the A_3 point at Sevres // *Bulletin d'Information BGI*. Toulouse, France, 1978. N 42.
4. **Boulanger Yu., Faller J., Groten E. et al.** Results of the second international comparison of absolute gravimeters in Sevres 1985 // *Bulletin d'Information BGI*. Toulouse, France, 1986. N 59.
5. **Robertson L., Francis O., Arnautov G. et al.** Results from the fifth international comparison of absolute gravimeters, ICAG'97 // *Metrologia*. 2001. **38**, N 1.
6. **Буланже Ю. Д.** Неприливные изменения силы тяжести // Повторные гравиметрические наблюдения: Сб. науч. тр. М.: Изд. ВНИИГеофизики, 1980.
7. **Barta G.** The secular variations in the geomagnetic field and other geophysical phenomena // *Ann. Univ. Sci. Budapest. Sec. Geol.* 1963. N 7.
8. **Vogel A.** The questions of secular variations in the earth's gravity field from mass displacements in the earth's deep interior // *Bull. Geod.* 1968. N 88.
9. **Pariisky N. N.** The earth's rotation and gravity variations // *Boll. Geofis. Teor. Appl.* 1978. **XX**, N 80.
10. **Тараканов Ю. А., Шулейников В. А.** Оценка предельных изменений гравитационного поля в плейстоцене // *ДАН СССР*. 1977. **234**, № 4.
11. **Stelz A.** Changes in position of the geocentre due to variation of sea level // *Bull. Geod.* 1976. **50**, N 2.
12. **Stelz A.** Changes in position of the geocentre due to seasonal variation in air mass and ground water // *Geophys. Journ. Roy. Astron. Soc.* 1976. **44**, N 1.
13. **Bursa M.** Variations of the earth's gravity field due to the free nutation // *Stud. Geophys. et Geod.* 1972. **16**, N 2.
14. **Elstner C.** On the results of absolute gravity measurements at Potsdam in the period 1976–1990 // *Cah. Cent. Eur. Geodynamique et Seismol.* 1991. **3**.
15. **Resolutions** international gravity commission. International absolute gravity basestation network // *Bull. Inform. BGI*. Toulouse, France, 1984. N 58.
16. **Арнаутов Г. П., Калиш Е. Н., Коронкевич В. П. и др.** Неприливные изменения гравитационного поля Земли в разнесенных по долготе точках // *ДАН СССР*. 1985. **280**, № 5.
17. **Авсюк Ю. Н., Щеглов С. Н.** Неприливная глобальная вариация и абсолютные гравиметрические измерения // *ДАН СССР*. 1986. **288**, № 1.
18. **Сергеев К. Ф., Василенко Н. Ф., Сапрыгин С. М.** Распространение глобальной волны тектонических напряжений в 1978–1983 гг. // *ДАН СССР*. 1989. **307**, № 5.
19. **Роговская Н. В.** Закономерности строения подземной гидросферы платформенных областей. М.: Наука, 1991.
20. **Вихирев Б. В.** Влияние изменения во времени гидрогеологических факторов на силу тяжести // Повторные гравиметрические измерения. М.: Изд. ВНИИГеофизики, 1976.
21. **Буланже Ю. Д., Демьянова Т. Е., Волгина А. И., Мараховская Л. А.** Взаимосвязь неприливых вариаций силы тяжести с современными движениями земной коры в различных тектонических зонах // Повторные гравиметрические наблюдения: Сб. науч. тр. М.: Изд. МГК, 1987.

22. Поляк Э. Б., Тучин Я. И. Интерпретация результатов повторных нивелировок в районе водохранилищ в рамках упругой модели // Там же.
23. Авсюк Ю. Н. Приливные силы и природные процессы. М.: Изд. ОИФЗ РАН, 1996.
24. Джунь И. В., Арнаутков Г. П., Калиш Е. Н. и др. Особенность закона распределения результатов баллистических измерений ускорения силы тяжести // Повторные гравиметрические наблюдения. Вопросы теории и результаты: Сб. науч. тр. М.: Изд. Нефтегеофизики, 1984.
25. Авсюк Ю. Н., Арнаутков Г. П., Афанасьева Л. В. и др. Исследование приливной вариации силы тяжести абсолютным гравиметром ГАБЛ-М // Физика Земли. 1997. № 9.
26. Арнаутков Г. П., Калиш Е. Н., Стусь Ю. Ф., Тимофеев В. Ю. Результаты 6-летнего цикла абсолютных гравиметрических измерений в Байкальской рифтовой зоне // Методы изучения, строение и мониторинг литосферы: Мат. междунар. конф. Новосибирск: НИЦ ОИГТМ, 1998.
27. Курскеев А. К., Арефьев В. Н., Гусаков В. В. Вариации поля силы тяжести и их связь с современными движениями земной поверхности на Алма-Атинском прогностическом полигоне // Повторные гравиметрические наблюдения: Сб. науч. тр. М.: Изд. Нефтегеофизики, 1982.
28. Арнаутков Г. П., Курскеев А. К., Гусаков В. В. Абсолютные изменения силы тяжести на территории Алма-Атинского полигона // Повторные гравиметрические наблюдения: Сб. науч. тр. М.: Изд. МГК, 1986.

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

*Поступила в редакцию
2 июля 2004 г.*