

УДК 550.831.015

**НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ГРАВИМЕТРИЧЕСКОГО  
МОНИТОРИНГА В ЗДАНИИ ИНСТИТУТА  
ГЕОЛОГИИ И НЕФТЕГАЗОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ  
КАЗАНСКОГО ФЕДЕРАЛЬНОГО УНИВЕРСИТЕТА**

*А.Г. Харисов, Э.В. Утёмов*

**Аннотация**

В работе обсуждаются результаты гравиметрического мониторинга, проведенного в апреле 2012 г. в здании Института геологии и нефтегазовых технологий Казанского федерального университета. Было показано, что результаты гравиметрического приливного мониторинга в лабораторных условиях могут быть использованы для простой и недорогой оценки цены деления гравиметров. Остаточные аномалии, наблюдаемые в разных частях здания, могут быть связаны с суточными вертикальными движениями здания с амплитудой около 5–10 мм. Было обнаружено, что в остаточных приливных аномалиях ярко выражена 24-периодическая синусоидальная компонента. Данную аномалию можно объяснить различием между коэффициентами Лява для 12- и 24-часовых компонент приливных гравитационных вариаций.

**Ключевые слова:** лунно-солнечные приливы, гравиметрический мониторинг, коэффициент Лява.

**Введение**

Современное поколение гравиметров производства компании Scintrex Ltd. (Канада) имеют высокую точность измерений, малый дрейф, обеспечивают непрерывную цифровую запись и могут быть использованы для выявления чрезвычайно «тонких» аномалий; в частности, приборы позволяют наблюдать отклонения наблюдаемых вариаций силы тяжести от вариаций теоретических, вызванных приливными силами Луны и Солнца. Такие аномалии чрезвычайно малы, сопоставимы с точностью приборов, и их диагностика требует деликатного отношения к обработке данных. Причинами подобных аномалий могут быть как глобальные факторы (коэффициент жесткости, реологические свойства пород земной коры и верхней мантии данного региона), так и локальные, например вызванные нелинейным откликом отдельных блоков земной коры на приливное гравитационное возмущение.

В период с 20 по 25 апреля 2012 г. внутри здания Института геологии и нефтегазовых технологий (ИГиНТ) Казанского федерального университета (КФУ) были установлены на непрерывное измерение четыре гравиметра CG-5 Autograv. По результатам наблюдений предполагалось изучить целый ряд вопросов:

- сравнение фактических вариаций силы тяжести, вызванных твердотельными лунно-солнечными приливами, с теоретически рассчитанными поправками за лунно-солнечное притяжение, выявление возможных отклонений (аномалий);

- выявление возможных вертикальных движений здания института на основании сопоставления остаточных вариаций силы тяжести по данным измерений в разных концах здания;
- оценка параметра жесткости земли;
- оценка уровня помех, вызванных измерениями в городских условиях;
- определение времени, необходимого для вхождения приборов в рабочий режим.

### 1. Методика наблюдений

В пунктах, расположенных на разных концах здания ИГиНТ КФУ (база между точками наблюдений составила 130 м), были установлены по два гравиметра CG5 Autograv (см. рис. 1), с которыми были проведены непрерывные измерения в течение 5 сут с 20 по 25 апреля 2012 г.

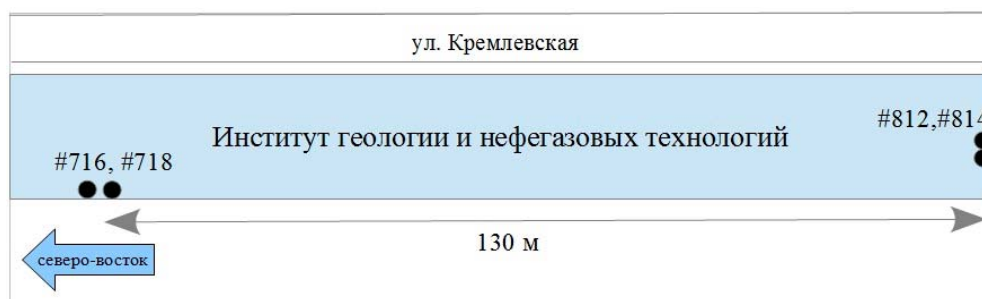


Рис. 1. Схема расположения приборов в здании ИГиНТ КФУ во время эксперимента

В настройках приборов использовались следующие параметры.

#### Экран Options

read time	(продолжительность одиночного наблюдения):	1 мин
# of cycles	(число повторных измерений):	8640
start delay	(задержка начала наблюдений):	1 с

#### Экран AutoGrav

tide correction	(поправка за за лунно-солнечные приливы):	не исп-ся
cont. tilt. corr.	(авт. компенсация угла наклона прибора):	да
auto reject	(подавление высокочастотных помех):	да
terrain corr	(поправка за рельеф местности):	не исп-ся
seismic filter	(подавление низкочастотных помех):	нет
save raw data	(сохранение данных с частотой 6 гц):	нет

Сроки проведения измерений были приурочены к периоду максимальных приливов (новолуние 21 апреля). Приборы не были заранее прогреты, что было сделано с целью оценки влияния данного фактора на скорость дрейфа нуля-пункта приборов и длительности вхождения приборов в рабочий режим. В каждом пункте наблюдений устанавливались по два прибора, что позволяло оценить сходимость результатов наблюдений.

## 2. Методика обработки

Обработка наблюдаемых данных включала в себя определение времени вхождения приборов в рабочий режим, учёт дрейфа нуля-пункта приборов, выбор коэффициента Лява и вычисление поправок к цене деления приборов.

### 2.1. Расчет теоретических поправок за притяжение Луны и Солнца.

Программное обеспечение гравиметров Scintrex CG5 Autograv позволяет определять поправки за лунно-солнечное притяжение (ЕТС) по формулам Лонгмана [1], являющимися уточнёнными вариантами формул Лява [2] с коэффициентом жёсткости, равным 1.16. Однако точность прошитого в гравиметр алгоритма составляет  $\pm 1 \div 2$  мкГал, а сам график поправок представляет собой ступенчатую функцию. Кроме того, величина постоянной Лява в действительности непостоянна и зависит от жёсткости Земли в регионе исследований. Например, согласно оценкам Такеучи [3], для модели Земли с жидким ядром  $K = 1 - 3/2k + q = 1.184$ , что близко к значению, полученному данным исследователем с помощью натуральных измерений. В случае статичных наблюдений точность штатного алгоритма вполне достаточна, однако для «тонких» задач приливного мониторинга на основе формул Лонгмана [1] была написана специальная программа, позволяющая вычислять поправку с большей точностью и вносить её в выходной файл гравиметра.

**2.2. Определение коэффициента Лява.** Определение коэффициента Лява производилось на основе сопоставления амплитуд приливных наблюдаемых и теоретических вариаций силы тяжести по формуле

$$K = 1.16 A / A_0,$$

где  $A_0$  – амплитуда теоретических приливных вариаций силы тяжести,  $A$  – амплитуда приливных вариаций силы тяжести по данным натуральных наблюдений.

По результатам сравнения этих данных было получено значение  $K = 1.17 \pm \pm 0.015$ , что в предположении корректной калибровки гравиметров несколько выше значения данного параметра в настройках гравиметра ( $K = 1.16$ ). Отметим, что данный параметр не является постоянным и зависит от реологических свойств горных пород региона наблюдений.

**2.3. Введение поправок за смещение нуля-пункта и оценка времени вхождения приборов в рабочий режим.** Учёт дрейфа нуля-пункта производился с помощью аппроксимации остаточных аномалий силы тяжести (за вычетом теоретических приливных поправок) полиномом 4-го порядка.

Дрейф нуля-пункта приборов в течение времени наблюдений близок к линейному; его скорость составила величину порядка 0.06 мГал/ч.

На рис. 2 представлены графики наблюдаемых значений силы тяжести с учетом поправок за дрейф приборов (цветные линии) и график теоретических лунно-солнечных вариаций (серая широкая линия). Как видно из рисунка, после вхождения приборов в рабочий режим графики наблюдаемых вариаций силы тяжести находятся в хорошем согласии с графиком теоретических приливных вариаций. Видно также что, приборы входят в рабочий режим приблизительно

около двух суток; соответственно, данные первых двух суток измерений далее не учитывались.

### 3. Результаты и их обсуждение

**3.1. Уровень городского шума.** Измерения в здании института показали низкую шумовую компоненту, существенно более низкую, чем в полевых условиях. Этот факт можно объяснить рядом причин: во-первых, устойчивым температурным режимом в здании (колебания комнатной температуры составили менее градуса в сутки), во-вторых, отсутствием фактора ветра (что в полевых условиях является главным источником помех, даже с использованием защитных чехлов) и в третьих, установка прибора на бетонном основании исключила возможность значительных неприливных дрейфов углов наклона прибора. Несмотря на то что здание института располагается вдоль проезжей улицы Кремлевской, влияние движения транспорта на показания приборов оказались незначительными, порядка точности самого прибора (в среднем порядка  $\pm 2$  мкГал).

**3.2. Определение градуировочных коэффициентов гравиметров по данным лабораторных измерений приливных вариаций силы тяжести.** Поскольку изучение приливных аномалий является чрезвычайно «тонкой» микрометрической задачей, при которой значения аномалий сопоставимы с предельной точностью прибора, то даже незначительная неточность градуировки прибора может существенно исказить результаты.

В силу конструктивных особенностей в приборах CG5 Autograv не существует цены деления в том виде, в котором этот параметр присутствует в отечественных приборах типа ГНУ-КВ. Аналогом является величина GCAL1, определяющая диапазон измерений. Нижний край диапазона измерений  $SU_{\min}$  определяется формулой

$$SU_{\min} = 0.1G_{\text{CAL1}},$$

а верхний  $SU_{\max}$  – по формуле

$$SU_{\max} = 1.457G_{\text{CAL1}}.$$

В настоящий момент времени в России методика градуировки (определение цены деления) гравиметра регламентируется приложением № 13 к «Инструкции по гравиразведке» 1980 г. Согласно данной инструкции одним из условий проведения измерений является перепад высот между пунктами наблюдений, обеспечивающий разность силы тяжести в 80–100 мГал, что соответствует перепаду высот в 260 м и более [4].

Как показали наблюдения приборами CG5 Autograv в лабораторных условиях, приемлемую точность градуировки приборов можно достигнуть за счет наблюдений приливных вариаций силы тяжести. Точность достигается длительностью (несколько суток), кратностью измерений (тысячи или десятки тысяч измерений в течение нескольких суток непрерывных наблюдений), стабильным температурным режимом, малым дрейфом нуля-пункта и в целом отсутствием помех, характерных для полевых условий.

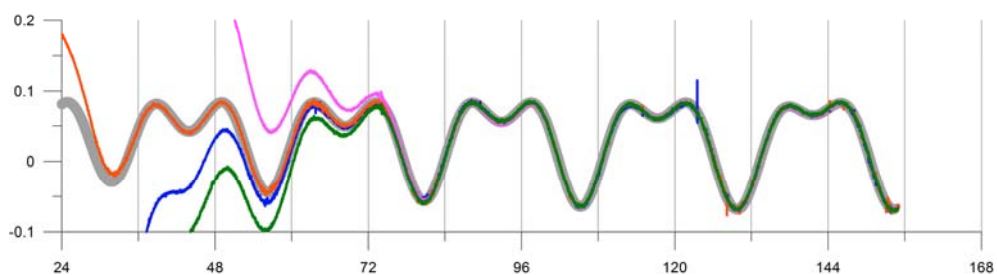


Рис. 2. Результаты обработки данных гравиметрического мониторинга 20–25 апреля 2012 г.

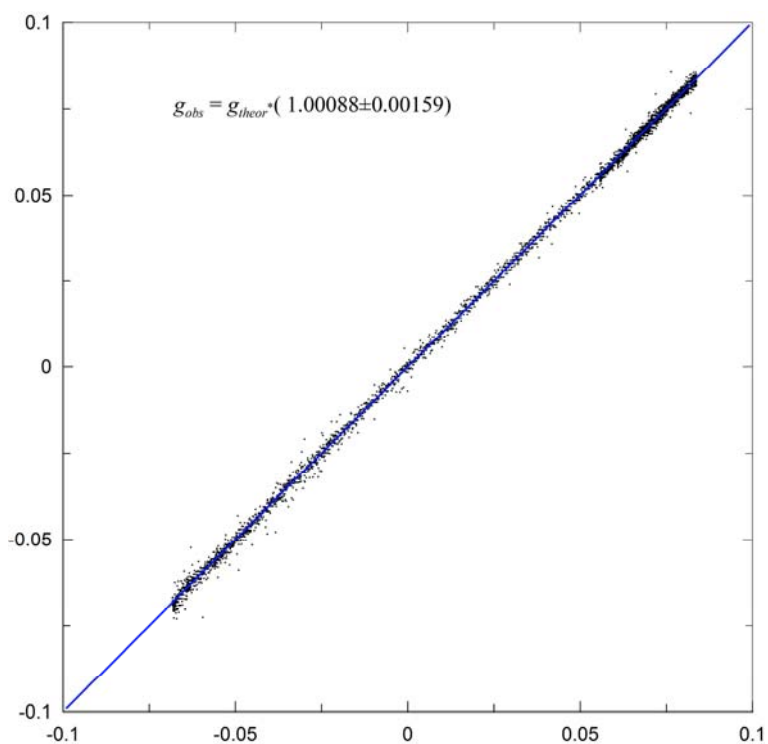


Рис. 3. Зависимость натуральных приливных вариаций силы тяжести (прибор № 844) от теоретических приливных вариаций силы тяжести, параметр жесткости Земли равен 1.17

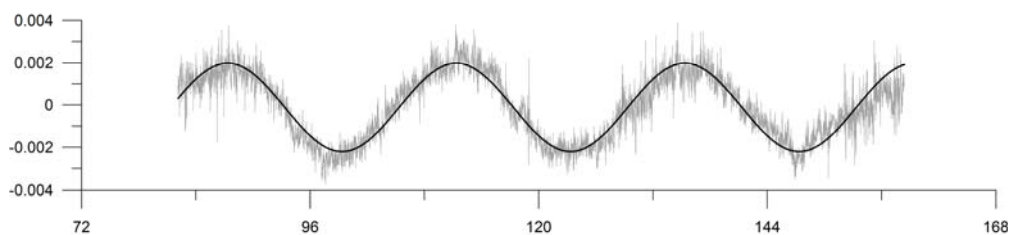


Рис. 4. Сводный график (по всем приборам) разности между наблюдаемыми и теоретической приливными вариациями силы тяжести

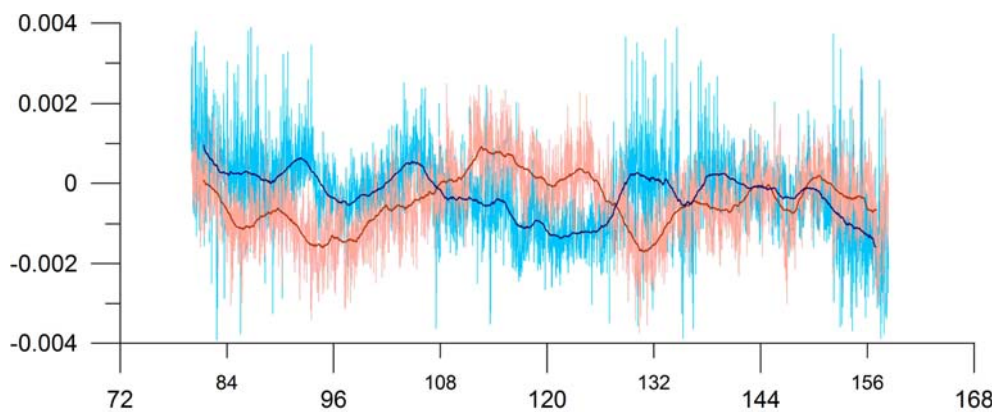


Рис. 5. Остаточные аномальные вариации на пунктах: «северо-запад» (красная линия) и «юго-восток» (синяя линия)

В качестве примера на рис. 3 представлена зависимость натуральных приливных вариаций силы тяжести от теоретических приливных вариаций силы тяжести. Как видно из рисунка, отношение теоретической и наблюдаемых величин приливных вариаций различается от единицы в четвертом знаке после запятой.

**3.3. Остаточные аномалии.** По результатам наблюдений приливных вариаций силы тяжести был построен сводный график средней по всем приборам разности между наблюдаемыми и теоретической приливными вариациями силы тяжести (рис. 4). Как видно из рисунка, разностный график представляет собой близкую к гармонической функцию с периодом 24 ч.

Профессор Джеффри Д. Маккуин (Jeffrey D. MacQueen), главный геофизик Microg LaCoste, высказал предположение, что данная периодическая аномалия может быть связана с влиянием океанических приливов, которые в формулам Лонгмана не учитываются. Однако данная гипотеза, на наш взгляд, не может объяснить очевидное отсутствие 12-часовой компоненты на сводном графике, хотя всем известно, что океанические приливы имеют очень мощную полусуточную компоненту.

Тот факт, что сводная разностная кривая содержит ярко выраженную 24-часовую компоненту и не содержит 12-часовую, может свидетельствовать в пользу реологической природы аномалии, когда коэффициент жесткости Земли зависит от периода возмущающей силы. Отметим, что предположение о различиях коэффициента жесткости Земли для 12- и 24-часовых компонент известно давно, и его можно встретить в достаточно ранних работах, например в [5].

На рис. 5 представлены остаточные аномальные вариации (после вычета теоретических приливных вариаций из наблюдаемых и вычета остаточной 24-часовой компоненты). Как видно из рисунка, остаточные вариации на двух пунктах демонстрируют сложный нерегулярный характер. Наблюдаются промежутки времени с синфазными колебаниями амплитуд (интервалы времен 86–108, 144–156 ч), так и с амплитудами, находящимися в противофазе (интервал времен 130–144 ч). Размах колебаний амплитуд остаточных вариаций составляет величину до 1–2 мкГал, что в пересчете на значения приращений высот

(на основании значения нормального вертикального градиента) составляет величину порядка 5–10 мм. Нужно отметить, что представленные вариационные аномалии сопоставимы с уровнем точности приборов, поэтому в этих данных содержится высокий процент шума. Тем не менее можно предположить, что возможным источником выявленных аномалий могут являться вертикальные движения самого здания института.

### Заключение

Подводя итоги, можно сделать следующие выводы:

- время вхождения приборов в рабочий режим по результатам лабораторных наблюдений составляет около 48 ч;
- для интерпретации результатов приливного гравиметрического мониторинга необходимо априорно определять параметр жесткости Земли для данного региона и производить градуировку гравиметров (параметр  $G_{CAL1}$ ) независимым способом;
- результаты приливных наблюдений в лабораторных условиях могут быть использованы для градуировки гравиметров в качестве мало затратной и простой альтернативы традиционному выездному способу;
- результаты приливных наблюдений в лабораторных условиях свидетельствуют в пользу реологической гипотезы о различиях коэффициента жесткости Земли для 12- и 24-часовых компонент;
- остаточные аномалии, наблюдаемые в разных концах здания, могут быть связаны с суточными вертикальными движениями здания с амплитудой порядка 5–10 мм.
- повышение точности результатов приливного гравиметрического мониторинга в полевых условиях возможно с помощью принятия мер, направленных на понижение влияния температурного суточного дрейфа, фактора ветра и устойчивости приборов к угловым колебаниям.

Отметим, что существование чрезвычайно близкой к синусоидальной компоненты с периодом 24 ч и амплитудой  $\pm 2$  мкГал в наблюдаемых данных оказалось неожиданным результатом. К настоящему моменту для этого факта нет однозначного объяснения. Что касается остаточных аномалий в разных концах здания, то для подтверждения их интерпретации как следствия вертикальных движений здания, требуется проведение дополнительных наблюдений, включая независимые мониторинговые наблюдения за пределами здания института в пунктах с низким уровнем шума.

Авторы благодарят за доброжелательное и конструктивное обсуждение результатов эксперимента Александра Милановича (Aleksandar Milanovic), главного инженера компании LaCoste & Romberg – Scintrex и Криса Нинда (Chris Nind), президента и генерального директора компании LaCoste & Romberg – Scintrex.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (государственный контракт № 11.519.11.6048).

### Summary

*A.G. Kharisov, E.V. Utemov.* Some Results of a Gravimetric Monitoring of the Building of the Institute of Geology and Petroleum Technology, Kazan Federal University.

This article discusses the results of a gravimetric monitoring carried out in April 2012 in the building of the Institute of Geology and Petroleum Technology, Kazan Federal University. It is shown that the results of a gravimetric tidal monitoring in laboratory conditions can be used for simple and inexpensive calibration of gravimeters. The residual anomalies observed in different parts of the building may be associated with the diurnal vertical movements of the building with an amplitude of around 5–10 mm. A strongly pronounced 24-period sinusoidal component has been detected in the residual tidal anomalies. It is suggested that this anomaly is due to the difference between Love coefficients for 12- and 24-hour components of the tidal gravitational variations.

**Key words:** lunar-solar tides, gravimetric monitoring, Love coefficient.

### Литература

1. *Longman I.M.* Formulas for computing the tidal accelerations due to the Moon and the Sun // *J. Geophys. Res.* – 1959. – V. 64, No 12. – P. 2351–2355.
2. *Love A.E.H.* Some Problems of Geodynamics. – Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1911. – 180 p.
3. *Takeuchi H.* On the earth tide of the compressible earth of variable density and elasticity // *Trans. Am. Geophys. Union.* – 1950. – V. 31. – P. 651–689.
4. Инструкция по гравirazведке / Ред. А.С. Варламов, Е.М. Кастальский, П.П. Степанов. – М.: Недра, 1980. – 89 с.
5. *Гарленд Дж.Д.* Форма Земли и сила тяжести. – М.: Мир, 1967. – 196 с.

Поступила в редакцию  
05.09.12

---

**Харисов Айрат Гумерович** – аспирант кафедры геофизики и геоинформационных технологий Казанского (Приволжского) федерального университета.  
E-mail: [airat.x@gmail.com](mailto:airat.x@gmail.com)

**Утёмов Эдуард Валерьевич** – кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры геофизики и геоинформационных технологий Казанского (Приволжского) федерального университета.  
E-mail: [eutemov@mail.ru](mailto:eutemov@mail.ru)