



## Об одном источнике аномалий вариаций силы тяжести<sup>1</sup>

**А.Г. Харисов,  
Э.В. Утёмов, К.Г.-М.Н.,  
Н.А. Матвеева**

(Казанский (Приволжский)  
федеральный университет)

Адреса для связи: Ayrat.Kharisov@kpfu.ru,  
limonich@mail.ru,  
eutemov69@gmail.com

**Ключевые слова:** лунно-солнечные приливы, гравиметрический мониторинг, вейвлет-преобразование.

Современные высокоточные гравиметры позволяют наблюдать изменения силы тяжести с точностью, достаточной не только для отслеживания деформаций земной коры при разработке крупных нефтегазовых месторождений, но и для контроля разработки залежей, а также их выявления. При проведении высокоточных гравиметрических съемок влияние приливов является помехой, и его исключают путем ввода соответствующих поправок. Однако в приливных вариациях содержится уникальная информация о недрах Земли [1-6].

Исследования, выполненные авторами, показали существование значимых отклонений наблюдаемых твердотельных приливных вариаций силы тяжести от спрогнозированных по статической теории приливов. Такие вариационные аномалии наблюдались как во времени, так и в пространстве. В работах [7, 8] было выявлено, что наблюдаемое соотношение суточной и полусуточной компонент приливов существенно отличается от теоретически рассчитанной. Такая информация очень важна для корректной интерпретации результатов мониторинга вариаций гравитационного поля в пределах нефтегазовых залежей. В данной статье представлены результаты измерений приливных вариаций, которые выполнены в институте геологии и нефтегазовых технологий КФУ с сентября 2012 г. по март 2013 г. Для корректного вычисления отношения полусуточной компоненты к суточной предлагается использовать вейвлет-преобразование фактического и рассчитанного сигналов.

### Элементы статической теории приливов

В настоящее время в большинстве случаев, например, в применяемых авторами гравиметрах Scintrex CG-5 Autograv, при расчете поправок на лунно-солнечные приливы используется алгоритм, предложенный Лонгманом [9]. Он основывается на статической теории приливов, созданной Ньюто-

### About one cause of abnormal variations of gravity

A.G. Kharisov, E.V. Utemov, N.A. Matveeva  
(Kazan (Volga Region) Federal University, RF, Kazan)

E-mail: Ayrat.Kharisov@kpfu.ru, limonich@mail.ru,  
eutemov69@gmail.com

**Key words:** lunar & solar tides, gravimetric monitoring, wavelet transform.

The article presents the results of measurements of tidal variations in the building of the Institute of Geology and Petroleum Technology of Kazan Federal University from September 2012 - March 2013, demonstrating the presence of a new type of sources of variations of the gravitational field that need to be considered when conducting high-precision field monitoring for the purposes of oil and gas geology, as well as providing results of the calculation of the parameter  $K$ , and showing its change over time.

ном [10]. В первом приближении при вычислении гравитационного влияния Луны и Солнца на Землю используется модель твердой Земли

$$Z_0 = 3G \frac{m}{s^3} R (\cos^2 \Psi - \frac{1}{3}), \quad (1)$$

где  $Z_0$  – поправка на гравитационное влияние Солнца и Луны на Землю;  $G$  – гравитационная постоянная;  $m$  – масса Солнца/Луны;  $s$  – среднее расстояние от центра Земли до центра Солнца/Луны;  $R$  – радиус Земли;  $\Psi$  – зенитное расстояние (угол, образованный дугой на небесной сфере проекциями точки наблюдений и Солнца/Луны).

Модель твердой Земли не учитывает гравитационное воздействие приливного горба и смещение точки наблюдений, поэтому статическая теория предполагает, что и смещение поверхности, и возникающий из-за деформации Земли потенциал пропорциональны приливному потенциалу. В рамках модели эластичной Земли учитываются ее приливные деформации и влияние перераспределения масс

$$Z = Z_0 + Z_1 + Z_2 = Z_0(1 - (3/2)k + q), \quad (2)$$

где  $Z_1, Z_2$  – поправки, учитывающие соответственно влияние перераспределения масс в теле Земли и смещение точки наблюдений;  $k, q$  – числа Лява, зависящие от твердости Земли (если бы Земля была абсолютно твердой, то  $k$  и  $q$  равнялись нулю).

Амплитудный фактор, определяемый по формуле

$$\delta = 1 + q - (3/2)k, \quad (3)$$

характеризует увеличение приливных вариаций силы тяжести вследствие деформации Земли. При этом существует различие амплитудного фактора для приливных компонент с

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2013 годы» (государственный контракт № 11.519.11.6048).

разным периодом (H. Jeffreys, R.O. Vicente, 1957; C.L. Pekeris, H. Jarosch, Z. Alterman, 1959).

**Методика наблюдений**

С 15 по 25 сентября 2012 г., с 4 по 18 декабря 2012 г., с 12 по 25 января 2013 г., с 26 января по 10 февраля 2013 г. и с 12 февраля по 7 марта 2013 г. на территории института был установлен для непрерывного измерения гравиметр Scintrex CG-5 Autograv. В настройках прибора использовались следующие параметры.

*Экран Options*

Продолжительность одиночного наблюдения (read time), с.....180  
 Число повторных измерений (number of cycles) .....8640  
 Задержка начала наблюдений (start delay), с.....1

*Экран AutoGrav*

Поправка на лунно-солнечные приливы (tide correction) ..... Не используется  
 Автоматическая компенсация угла наклона прибора (cont. tilt. corr.) ..... Да  
 Подавление высокочастотных помех (auto reject) ..... Да  
 Поправка на рельеф местности (terrain correction) ..... Не используется  
 Подавление низкочастотных помех (seismic filter) .... Нет  
 Сохранение данных с частотой 6 Гц (save raw data) ... Нет  
 Несмотря на размещение прибора в здании, расположенном в центре города, качество записи сигнала очень высокое (среднее значение статистического параметра SD, характеризующего качество съемки, в разные периоды изменяется от 0,011 до 0,013). Это можно объяснить тем, что в лабораторных условиях отсутствуют такие негативные факторы, как ветер, неустойчивый грунт, температура помещения постоянна.

**Методика обработки**

*Результаты предыдущих наблюдений.* Мониторинговые наблюдения, проведенные в 2011 и 2012 г. на юго-востоке и северо-востоке Республики Татарстан, в г. Казани и его пригороде, показали интересные результаты. Построенные по результатам мониторинга спектры Фурье фактических и рассчитанных по методике Лонгмана [9] вариаций показали, в частности, отличие суточных и полусуточных компонент фактических вариаций силы тяжести от рассчитанных (рис. 1). Из рис. 1 видно, что 12-ч компонента фактического сигнала несколько выше, чем соответствующая компонента теоретического, для 24-ч компоненты ситуация противоположная. Сходная картина наблюдалась как в одно и то же время, но в разных пунктах, так и в одном пункте, но в разные месяцы измерения. При этом параметр *K* всегда меньше единицы и изменяется в зависимости от места и времени наблюдения

$$K = \left( \frac{A_{N24}}{A_{N12}} \right) : \left( \frac{A_{T24}}{A_{T12}} \right), \tag{4}$$

где  $A_{N24}$ ,  $A_{T24}$  – амплитуда 24-ч компонент соответственно фактического и теоретического сигналов;  $A_{N12}$ ,  $A_{T12}$  – амплитуда 12-ч компонент соответственно фактического и теоретического сигналов.

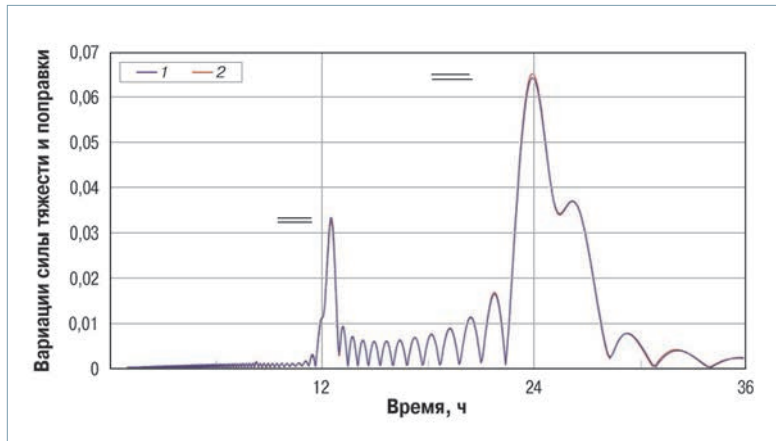


Рис. 1. Спектры Фурье фактических вариаций силы тяжести (1) и теоретически рассчитанной поправки на лунно-солнечное притяжение (2) в Альметьевске в декабре 2012 г.

*Преимущество использования вейвлет-преобразования для анализа аномалий спектральных характеристик лунно-солнечных приливов.* Для адекватного сравнения параметра *K* сигналов, полученных в одной точке, но в разное время, необходимо исключить случаи, когда на него особенно сильно влияют погрешности измерений и вычислений. Так, в периоды полнолуния и новолуния полусуточная компонента максимальна, а суточная – минимальна (рис. 2). После первой и третьей недели лунного цикла, наоборот, суточная компонента максимальна, полусуточная – минимальна. В связи с этим для корректного определения параметра *K* необходимо вычислять его для 1/8, 3/8, 5/8 и 7/8 периодов лунного цикла.

Преобразование Фурье дает среднее за весь период наблюдения значение амплитуды заданной частоты, но для привязки к конкретной фазе Луны необходимо отслеживать непрерывное изменение амплитуды нужной частоты, поэтому для анализа было решено использовать вейвлет-преобразование, основанное на вейвлете Morlet, позволяющем хорошо выделять 24-ч и 12-ч частоты и отслеживать изменение спектральных характеристик во времени,

$$\varphi(t) = e^{-\frac{t^2}{2}} \cos 5t. \tag{5}$$

*Определение параметра K.* Таким образом, для корректного определения параметра *K* сначала необходимо построить вейвлет-спектр для фактического и теоретического сигналов. Пример спектра представлен на рис. 3. Полученный спектр позволяет непрерывно выделять амплитудный фактор для основных частот приливного сигнала (полусуточный и суточный факторы) и соответственно непрерывно вычислять изменение во времени параметра *K*. Для измерений, выполненных в здании института с сентября 2012 г. по март 2013 г., был вычислен параметр *K* в необходимые фазы Луны (рис. 4).

Исключив «геометрическое» влияние взаиморасположения Земли, Луны и Солнца на амплитуды суточных и полусуточных компонент сигнала, можно предположить, что изменение отношения компонент может быть связано с сезонностью. Так, в течение года меняется температура верхнего слоя земной коры. Это может привести к изменению реологических свойств, причем различному для 12-ч и 24-ч компонент.

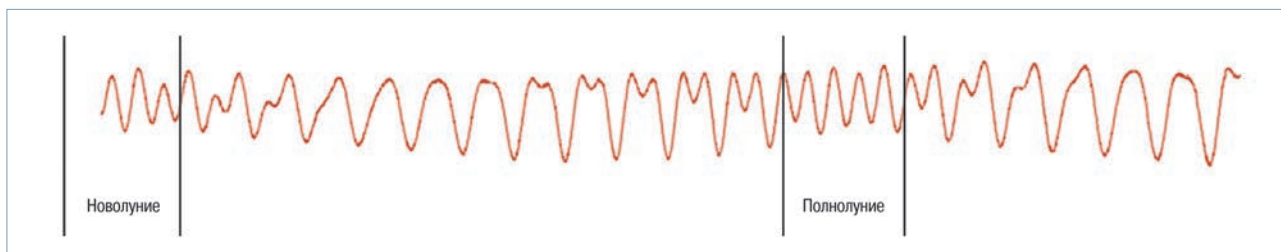


Рис. 2. Вариации ускорения силы тяжести, вызванные лунно-солнечными приливами

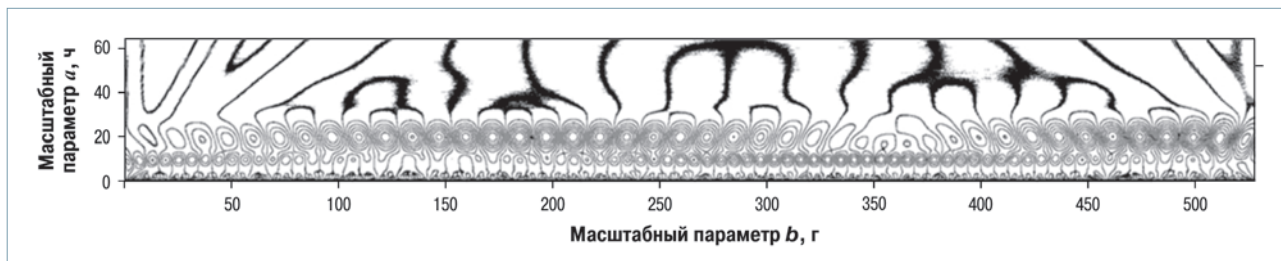


Рис. 3. Вейвлет-спектр фактических вариаций силы тяжести в период 12.02.13 – 7.03.13 г.

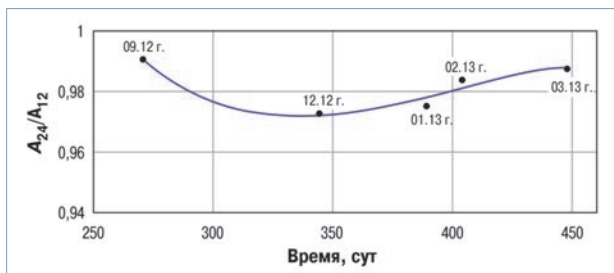


Рис. 4. Изменение параметра  $K$  во времени

### Выводы

1. По результатам измерений наблюдаются аномалии отношения суточных компонент сигнала к полусуточным, причем оно изменяется как во времени, так и в пространстве.

2. Параметр  $K$ , возможно, имеет геологическую природу и связан с термоупругими свойствами коры и верхней мантии для данного региона.

3. Результаты мониторинга параметра  $K$ , выполненные с сентября 2012 г. по март 2013 г., показывают, что параметр, вероятно, подвергается влиянию сезонных изменений температуры коры северного полушария. При этом его минимальные значения отмечаются в декабре и январе.

4. При высокоточном мониторинге необходимо учитывать, что отношение амплитуд полусуточных и суточных компонент может отличаться от прогнозируемого на 5 %.

### Список литературы

1. Dehant V., Defraigne P., Wahr J.M. Tides for a convective Earth // J. Geophys. Res. – 1999. – V. 104. – N B1. – P. 1035-1058.
2. Молоденский С.М. Влияние неоднородностей упругих модулей, топографии и термоупругих деформаций среды на амплитуды и фазы приливных волн. В кн. Изменение окружающей среды и климата: природные и связанные с ними техногенные катастрофы: в 8 т. Т. 1. Сейсмические процессы и катастрофы. – М.: ИФЗ РАН, 2008. – С. 262-282.
3. Body tides on a 3-D elastic Earth: Toward a tidal tomography/ K. Latychev, J.X. Mitrovica, M. Ishib (et al) // Earth and Planet. Sci. Lett. – 2009. – V. 277. – N 1-2. – С. 86-90.
4. Лубков М.В. О влиянии крупномасштабных неоднородностей мантии на суточные числа Лява // Геофизический журнал. – 2011. – Вып. 33. – N 2. – С. 129-134
5. Молоденский С.М. Резонанс жидкого ядра по данным приливных гравиметрических наблюдений в Талгаре // Физика Земли. – 2009. – N 10. – С. 3-8.

6. Молоденский С.М. О влиянии регионального рельефа на приливные деформации (на примере Эльбурского вулканического центра). В кн. Изменение окружающей среды и климата: природные и связанные с ними техногенные катастрофы: в 8 т. Т. 1. Сейсмические процессы и катастрофы. – М.: ИФЗ РАН, 2008. – С. 255-261.

7. О возможной связи амплитудных аномалий суточных и полусуточных компонент приливных вариаций силы тяжести с термоупругими свойствами земной коры (по данным наблюдений с гравиметрами CG-5 Autograv)/ Э.В. Утемов, Д.К. Нургалеев, А.Г. Харисов, Н.А. Матвеева // Ученые записки Казанского университета. Сер. Естественные науки. – 2012. – Т. 154. – Кн. 4. – С. 29-36.

8. Харисов А.Г., Утемов Э.В. Некоторые результаты гравиметрического мониторинга в здании института геологии и нефтегазовых технологий Казанского федерального университета // Ученые записки Казанского университета. Сер. Естественные науки. – 2012. – Т. 154. – Кн. 4. – С. 37-44.

9. Longman I.M. Formulas for Computing the Tidal Acceleration Due to the Moon and the Sun. // J. Geoph. Res. – 1959. – No. 64. – P. 2351-2355.

10. Маловичко А.К., Костицын В.И. Гравиразведка. – М.: Недра, 1992. – 357 с.

### References

1. Dehant V., Defraigne P., Wahr J.M., Tides for a convective Earth, J. Geophys. Res., 1999, V. 104, no. B1, pp. 1035-1058.
2. Molodenskiy S. M., *Izmenenie okruzhayushchey sredy i klimata: prirodnye i svyazannye s nimi tekhnogennye katastrofy* (The change of environment and climate: natural and related technological disaster), Part 1 "Seismicheskie protsessy i katastrofy" (Seismic processes and catastrophes), Moscow: Publ. of IPE RAS, 2008, pp. 262-282.
3. Latychev K., Mitrovica J.X., Ishib M. et al., *Body tides on a 3-D elastic earth: Toward a tidal tomography*, Earth and Planet. Sci. Lett., 2009, V. 277, no. 1-2, pp. 86-90.
4. Lubkov M.V., *Geofizicheskiy zhurnal*, 2011, V. 33, no. 2, pp. 129-134
5. Molodenskiy S.M., *Fizika Zemli – Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 2009, no. 10, pp. 3-8.
6. Molodenskiy S. M., *Izmenenie okruzhayushchey sredy i klimata: prirodnye i svyazannye s nimi tekhnogennye katastrofy* (The change of environment and climate: natural and related technological disaster), Part 1 "Seismicheskie protsessy i katastrofy" (Seismic processes and catastrophes), Moscow: Publ. of IPE RAS, 2008, pp.255-261.
7. Utemov E.V., Nurgaliev D.K., Kharisov A.G., Matveeva N.A., *Uchenye zapiski Kazanskogo universiteta. Ser. Estestvennyye nauki - Proceedings of Kazan University. Natural Sciences Series*, 2012, V. 154, no. 4, pp. 29-36.
8. Kharisov A.G., Utemov E.V., *Uchenye zapiski Kazanskogo universiteta. Ser. Estestvennyye nauki - Proceedings of Kazan University. Natural Sciences Series*, 2012, V. 154, no. 4, pp. 37-44.
9. Longman I.M., *Formulas for computing the tidal acceleration due to the Moon and the Sun*, J. Geoph. Res., 1959, no. 64, pp. 2351-2355.
10. Malovichko A.K., Kostitsyn V.I., *Gravirazvedka: Uchebnik dlya vuzov* (Gravimetric: A Textbook for high schools), Moscow: Nedra Publ., 1992.