

**МЕТОДИКА ВЫДЕЛЕНИЯ
НЕПРИЛИВНЫХ ВАРИАЦИЙ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ****Ю. В. Антонов***Воронежский государственный университет*

Поступила в редакцию 5 сентября 2016 г.

Аннотация: *приведены результаты учета лунно-солнечных вариаций силы тяжести при обработке мониторинговых наблюдений в г. Бишкек (Кыргызстан). Для учета вариаций предлагается использование программы Тиммена–Венцеля вместо программы по формуле Лонгмана в GC–5 AUTOGRAV. Рассмотрен вопрос учета добавочных вариаций за счет разности скорости гравитационного поля и распространения деформационных волн в земной коре.*

Ключевые слова: *лунно-солнечные вариации силы тяжести; неприливные вариации силы тяжести; формулы Тиммена – Венцеля и Лонгмана.*

IDENTIFICATION METHODS OF THE NON-TIDAL VARIATIONS OF GRAVITY

Abstract: *given the results of the lunar-solar gravity variations in the processing of monitoring observations in Bishkek (Kyrgyzstan). It is recommended to account for luni-solar variations of use of the program of Timmen –Wenzel is a program by the formula of Longman in GC–5 AUTOGRAV. Also consider integrating additional variations due to the difference of the speed of the gravitational field and propagation of deformation waves in the earth's crust.*

Keywords: *lunar-solar variations of gravity; non-tidal variations of gravity; program Timme –Wenzel, formula Longman.*

Введение

Наблюдаемые изменения силы тяжести во времени имеют достаточно сложную структуру и обусловлены различными причинами. Вариации силы тяжести могут быть обусловлены геодинамическими процессами, происходящими в земной коре, землетрясениями, ударами корональных выбросов масс по магнитосфере и метеорных потоков по атмосфере Земли и т.д. Это так называемые неприливные вариации силы тяжести, которые наиболее трудно поддаются расшифровке. Чтобы оценить причины образования различных вариаций силы тяжести необходимо как-то образом провести их разделение на составные части дать им физическое истолкование. Частично этот вопрос рассматривался в [1].

Исходные данные

В статье, как и в предыдущих работах автора [1–7], анализируются мониторинговые наблюдения изменения силы тяжести во времени, выполненные на Бишкекском геодинамическом полигоне РАН (г. Бишкек, Кыргызстан). Измерения силы тяжести проводились гравиметром GC–5 AUTOGRAV, который расположен в штольне в 30 км за городом. Прибор позволяет измерять силу тяжести и наклоны по двум горизонтальным ортогональным осям. Одновременно

программное обеспечение прибора позволяет вычислять теоретические значения силы тяжести от Луны и Солнца, которые вычитаются из наблюдаемых значений. Оставшаяся часть измерений после исключения притяжений Луны и Солнца условно называется неприливной вариацией. Таким образом, под неприливыми вариациями силы тяжести будем понимать все изменения силы тяжести, исключая лунно-солнечные вариации силы тяжести, вне зависимости от источника их происхождения. Так что неприливанная вариация может служить источником для изучения, как внутреннего строения Земли, так и космического пространства вокруг Земли.

Методика обработки гравиметрических измерений

Наблюдение вариаций силы тяжести дело без учета влияния Луны и Солнца выполняется достаточно просто. Современные гравиметры оснащены программным продуктом, который позволяет рассчитывать притяжение Луны и Солнца и исключать притяжение из общего наблюдаемого поля. Поэтому полученные вариации силы тяжести в мониторинговых наблюдениях не содержат в себе какой-то неучтенной значимой части лунно-солнечных вариаций. Оставшаяся часть вариаций, после исключения лунно-солнечного притяжения, содержит в себе эффекты

влияния от внешних и внутренних источников геодинимической системы Земля–Луна–Солнце.

В настоящее время для расчета лунно-солнечных вариаций используются программы по формуле Лонгмана в гравиметре GC-5 AUTOGRAV [7], а также программа Тиммена–Венцеля [8, 9]. На рис. 1 приведены лунно-солнечные вариации силы тяжести, вычисленные по формуле Лонгмана (рис. 1а) и формуле Тиммена–Венцеля (рис. 1в). Внешне кривые лунно-солнечных вариаций похожи друг на друга, но численно они различаются между собой до $\pm 0,006$ мГал (рис. 1б) при изменении амплитуды лунно-солнечных вариаций в пределах $\pm 0,12$ мГал. Сама разность пропорциональна амплитуде изменений лунно-солнечных вариаций. Учитывая, что погрешность измерений в гравиметре GC-5 AUTOGRAV составляет $\pm 0,001$ мГал, то разность по отмеченным формулам должна как-то учитываться. Какая из программ более предпочтительна? Детальный анализ расчетных лунно-солнечных вариаций по упомянутым программам показал, что программа Тиммена–Венцеля имеет преимущество. На рис. 2 приведены кривые лунно-солнечных вариаций по программам Лонгмана и Тиммена–Венцеля в момент перехода от обычного (2015 г.) к високосному году (2016). На кривой вариаций силы тяжести по Лонгману отмечается скачок в 0,02 мГал. Значит в формуле Лонгмана, а точнее в программе, составленной по этой формуле, что-то не предусмотрено. Кроме того, гладкость кривых вариаций лучше у программы Тиммена–Венцеля, а это один из критериев точности расчетов. Поэтому из наблюдений, измеренных гравиметром GC-5 AUTOGRAV, для получения неприливных вариаций необходимо исключать лунно-солнечные вариации по программе Тиммена–Венцеля.

Само исключение лунно-солнечных вариаций имеет свои особенности. Дело в том, что распространение гравитационного поля Луны и Солнца и упругой деформации в Земле имеют разные скорости. При выводе формул притяжения Луны и Солнца принимается, что Земля представляет собой абсолютно твердое тело. Однако, земной шар, хоть и обладает значительной твердостью, тем не менее деформируется, и подъем приливной волны на суше составляет около полуметра. Образующийся приливной «горб» в земной коре за счет притяжения Луны и Солнца несколько отстает от расчетного «горба» силы тяжести. Причиной служит то, что скорость распространения гравитационного поля опережает скорость распространения деформационных процессов земной коре. Для широты, где расположен г. Бишкек, это отставание составляет почти 4 мин [3]. Время отставания определяется или путем вычисления корреляционной функции между наблюдаемыми и расчетными значениями вариаций силы тяжести, или путем определения наименьшей среднеквадратической погрешности расхождения между указанными величинами, при их сдвиге во времени. Подробно этот вопрос рассмотрен в [3].

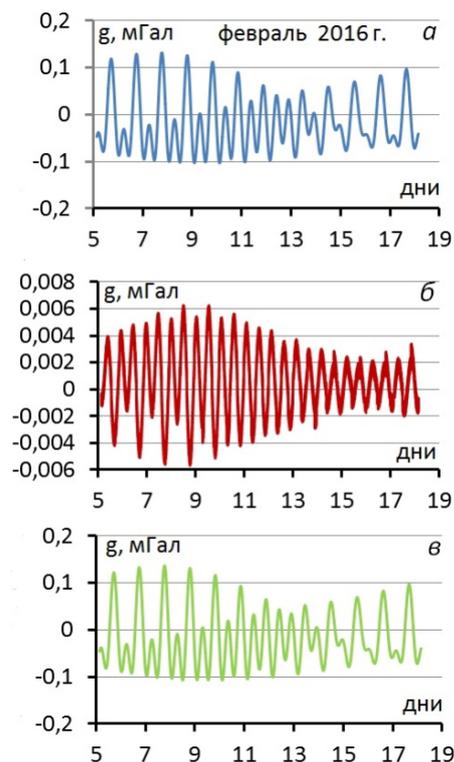


Рис. 1. Сравнение лунно-солнечных вариаций, рассчитанных по программе в гравиметре GC-5 AUTOGRAV и по программе Тиммена–Венцеля: а – рассчитанные лунно-солнечные вариации силы тяжести по программе в гравиметре GC-5 AUTOGRAV; б – разность лунно-солнечных вариаций силы тяжести, рассчитанных по программам в гравиметре GC-5 AUTOGRAV и Тиммена–Венцеля; в – рассчитанные лунно-солнечные вариации силы тяжести по программе Тиммена–Венцеля.

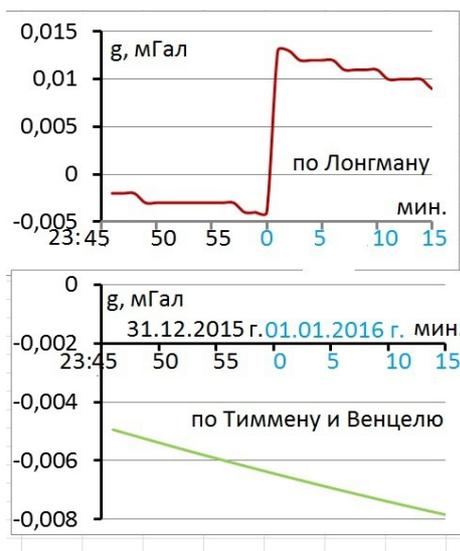


Рис. 2. Кривые расчетных лунно-солнечных вариаций силы тяжести по программам в гравиметре GC-5 AUTOGRAV и Тиммена–Венцеля при переходе от обычного к високосному году (31 декабря 2015 г. и 1 января 2016 г.).

После исключения лунно-солнечных вариаций силы тяжести из наблюдений гравиметра, оставшиеся неприливные вариации осложнены линейным фо-

ном (рис. 3). Линейный фон определяется упругими свойствами датчиков гравиметров, а также нутацией Земли. Считается, что изменение остаточной аномалии силы тяжести по линейному закону обусловлено смещением нуль-пункта гравиметра. Гравиметр находится в штольне с постоянной температурой. Объяснить такое изменение силы тяжести только за счет смещения нуль-пункта все-таки трудно. Дело в том, что смещение в 2009 г. было положительным [2], в течение 2010 г. оно постепенно сменилось отрицательным, оставаясь минимальным по амплитуде. На сегодняшний день смещение остается отрицательным, увеличиваясь по амплитуде. Вероятно, линейное изменение фона зависит не только от смещения нуль-пункта гравиметра, но также от изменения силы тяжести в результате нутационного движения оси Земли при вращении вокруг Солнца (период 18,6 лет).

Само исключение линейного изменения силы тяжести не представляет трудностей [2, 3]. Следует только отметить, что определение линейного фона практически не зависит от землетрясений. На рис. 3 приведены неприливные вариации с наличием и без землетрясений, а также линейные уравнения нуль-пункта. Амплитуда смещения нуль-пункта не превышает 0,18 мГал/сутки (1,5 мГал в неделю). Амплитуда изменения силы тяжести за счет землетрясений превышает 15 мГал. Но из-за того, что период этих колебаний ограничен первыми минутами, то это не сказывается при определении линейного члена уравнения смещения нуль-пункта. А вот при проведении спектрального анализа неприливных вариаций землетрясения сильно искажают форму спектра и их надо убирать [1].

Обсуждение неприливных вариаций силы тяжести

Ранее при разделении вариаций с помощью метода осреднения были выявлены [1] остаточные аномалии интенсивностью не более ±0,02 мГал, которые приурочены к максимальным градиентам лунно-солнечных вариаций силы тяжести. После проведения спектрального анализа был четко выявлен максимум с периодом 12 ч 29 мин. (749 мин.), который на несколько порядков превышал остальные максимумы. Поэтому причиной возникновения колебаний с указанным периодом и амплитудой, скорее всего, послужило различие в скоростях распространения гравитационного поля и упругой деформации в Земле.

Поскольку остаточные аномалии, полученные методом осреднения [1], приурочены к максимальным градиентам вариации, то можно вычислить градиент лунно-солнечных вариаций силы тяжести, сравнить с остаточными аномалиями и попытаться ввести соответствующие поправки. Назовем условно эту поправку деформационной. На рис. 4а (кривые 1 и 3) приведены осредненная неприливная вариация и градиент вариаций силы тяжести на двухсуточном интервале, где осредненная вариация меняется почти по косинусоиде. Действительно, к максимальным градиентам

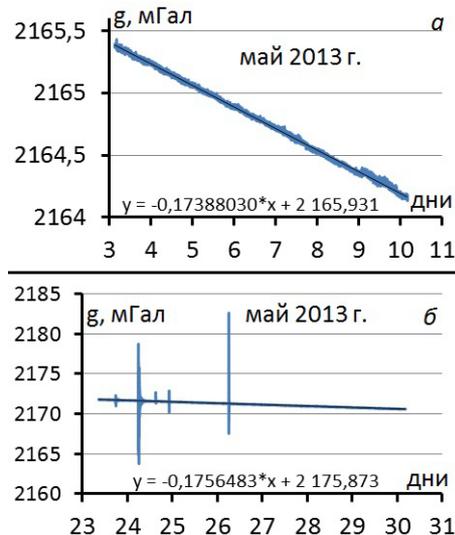


Рис. 3. Неприливные лунно-солнечные вариации силы тяжести: 1 – лунно-солнечная вариация; 2 – остаточная вариация силы тяжести; 3 – осредненная остаточная вариация силы тяжести.

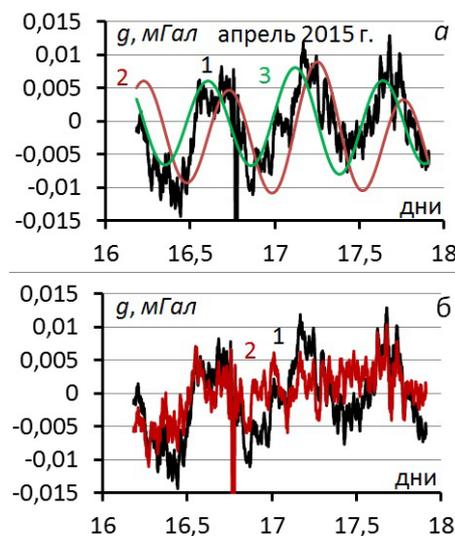


Рис. 4. Сравнение неприливных вариаций силы до и после учета поправок; а – осредненная неприливная вариация силы тяжести после исключения регионального фона: 1 – осредненная неприливная вариация силы тяжести с окном осреднения 21 мин; 2 – лунно-солнечная вариация силы тяжести; 3 – градиент лунно-солнечной вариации силы тяжести; б – осредненная неприливная вариация силы тяжести до и после учета поправки за деформацию: 1 – неприливная вариация силы тяжести до учета поправки за деформацию; 2 – осредненная неприливная вариация силы тяжести после учета поправки за деформацию.

приурочены изменения силы тяжести. Была найдена корреляционная связь между указанными величинами, как это сделано в [2, 3], и введена поправка за запаздывание за счет деформации земной коры. После всего этого заново был проведен спектральный анализ исправленной вариации. Обнаружилось, что выделенный ранее период 749 не исчез. Правда, период сократился до 720 мин. Но ведь при исключении лунно-солнечной вариаций полусуточная волна была ис-

ключена. Следовательно, используемые в программном комплексе гравиметров формулы или не обеспечивают полного учета лунно-солнечных вариаций силы тяжести, или причина кроется в чем-то другом. Вероятно, в данном случае не учтена полусуточная волна за счет давления солнечного света, величина которого колеблется в пределах 0,01–0,02 мГал. Была сделана попытка ввести поправку только за счет давления света. Спектральный анализ исправленной вариации за счет давления света показал, что полусуточная волна в этом случае не исчезает.

Какова не была бы природа этих колебаний, можно отметить, что они коррелируют и с лунно-солнечных вариаций силы тяжести, и с градиентом этих вариаций. Поэтому целесообразно искать поправки для учета полусуточных колебаний по формуле:

$$\delta g = a g(t) + b (dg(t)/dt),$$

где δg – поправка полусуточных колебаний; a и b – коэффициенты корреляции; $g(t)$ – лунно-солнечных вариации силы тяжести; $dg(t)/dt$ – градиент лунно-солнечных вариаций силы тяжести; t – время. Коэффициенты a и b , что и при определении интервала запаздывания приливной волны [2, 3]. Так как одна и другая поправки связаны с деформацией земной коры, то общую поправку назовем деформационной поправкой.

После введения деформационной поправки в осредненную неприливную вариацию силы тяжести (рис. 4а, кривая 1) были получены исправленные значения вариации, которые по сравнению с исходной вариацией имеют более плавную форму (рис. 4а, кривая 2). Конечно, нельзя добиться полного исключения мешающих помех, но, тем не менее, от части помех освободились. На рис. 4 приведен результат введения деформационной поправки на сравнительно коротком временном отрезке (2 суток), когда землетрясения не отмечались. Но наличие землетрясений, также как и при исключении линейного фона (выше отмечалось)

мало сказывается на определении деформационной поправки. На рис. 5 приводятся результаты введения деформационной поправки для более длительного интервала наблюдений (14 суток), когда произошло катастрофическое Непальское восьмибалльное землетрясение (по шкале Рихтера) 25 апреля 2015 г. с афтершоком через сутки почти той же силы. После введения деформационной поправки визуально наблюдается значительное сглаживание исходной неприливной вариации (рис. 5а, в).

Был проведен спектральный анализ исходной неприливной вариации (рис. 5а) и исправленной вариации за счет деформационной поправки (рис. 5в). На рис. 6 показаны периодограммы неприливных вариаций (рис. 5а,в) для колебаний в интервале 200 – 1000 мин. В спектре после введения поправки (рис. 6а, кривая 2) максимум полусуточной волны отсутствует. Остальные максимумы сохраняются, о чем свидетельствует разность спектров до и после введения поправки (рис. 6б).

На рис. 7 приведен еще практический пример введения поправки за деформацию земной коры и давления солнечного света. Сверху и снизу (рис. 7а,в) даны неприливные вариации силы тяжести до и после введения деформационной поправки, а между ними (рис. 7б) расположена кривая самой поправки. Форма кривой поправки определяется формой кривой лунно-солнечных вариаций силы тяжести на момент измерений. Амплитуда поправок колеблется в пределах $\pm(0,004 - 0,010)$ мГал. Но бывают случаи, когда деформационная поправка может достигать максимума $\pm 0,015$ мГал. Визуально видно, что кривые неприливных вариаций силы тяжести после введения поправок становятся менее изрезанными.

Кроме того, добавим, что косинусоидальная изменчивость графиков вариаций не связана с происходящими землетрясениями. На рис. 5 представлена неприливная вариация, когда произошло катастрофическое Непальское землетрясением. Еще более

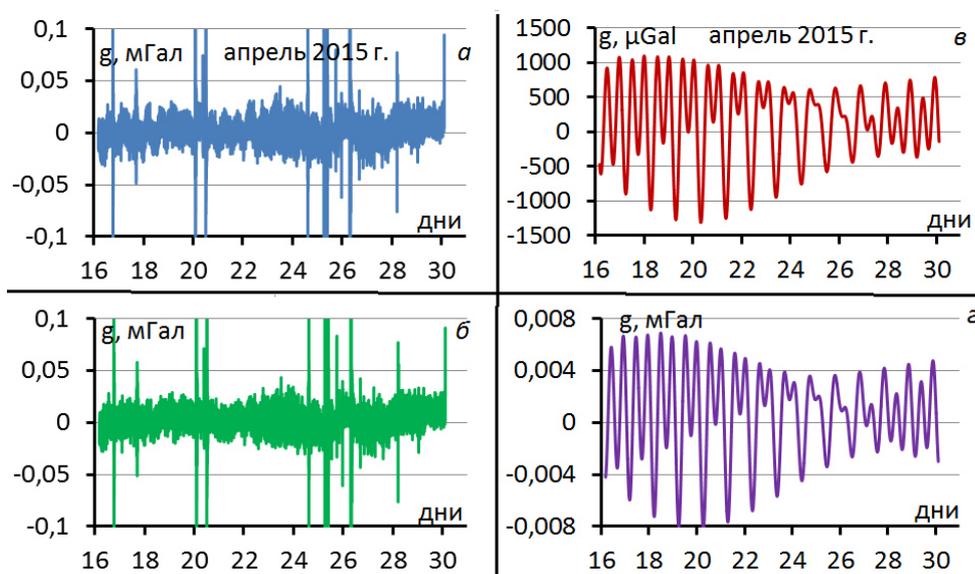


Рис. 5. Неприливная вариация силы тяжести до и после учета поправок за деформацию земной коры 16 – 30 апреля 2015 г.: а – неприливная вариация силы тяжести после исключения регионального фона; б – неприливная вариация силы тяжести после учета поправок за деформацию земной коры; в – расчетная лунно-солнечная вариация силы тяжести; г – деформационная поправка.

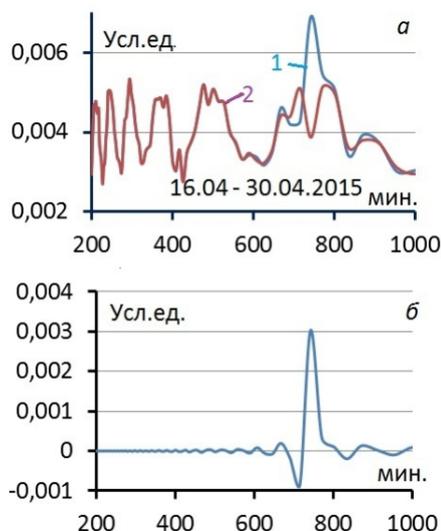


Рис. 6. Спектры неприливной вариации силы тяжести до и после учета поправок за деформацию земной коры: а – спектры неприливной вариации силы тяжести до (кривая 1) и после (кривая 2) учета поправок за деформацию земной коры; б – разность спектров неприливной вариации силы тяжести до и после учета поправок за деформацию земной коры.

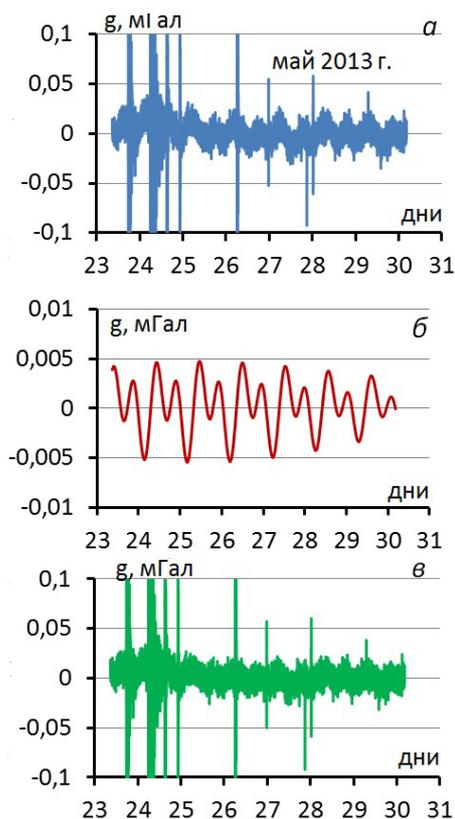


Рис. 7. Неприливная вариация силы тяжести до и после учета поправок за деформацию земной коры 23 – 31 мая 2013 г.: а – неприливная вариация силы тяжести после исключения регионального фона; б – деформационная поправка; в –

неприливная вариация силы тяжести после учета поправок за деформацию земной коры и давление свет.

мощным было землетрясение ($M = 8,2$) в Охотском море 24 мая 2013 г. (рис. 7), которое ощущалось даже в Москве. Спасло от разрушений только то, что очаг землетрясения находился в море на глубине 600 км. Но землетрясения создают собственные колебания Земли с периодом около часа, а поправки за деформацию земной коры и силу давления света имеют полу-суточный период колебаний. К сожалению, учесть поправки, вызванные землетрясением, вряд ли возможно.

Заключение

Таким образом, исходя из выше изложенного, можно однозначно утверждать, что использование при учете лунно-солнечных вариаций силы тяжести формулы Тиммен–Венцеля более предпочтительно перед формулой Лонгмана. К тому же при замене одной формулы на другую не требуется больших материальных затрат. Конечно, лучшим вариантом в данном случае была бы замена модуля расчета лунно-солнечных вариаций в гравиметре GC-5 AUTOGRAV.

ЛИТЕРАТУРА

1. Антонов, Ю. В. Разделение неприливных вариаций силы тяжести на основе спектрального анализа и метода осреднения / Ю. В. Антонов // Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Сер.: Геология. – 2016. – Вып. 2. – С. 100–106.
2. Антонов, Ю. В. Предварительная обработка наблюдений лунно-солнечных вариаций силы тяжести / Ю. В. Антонов, Е. В. Воронцова // Изв. вузов. Геология и разведка, 2012. – № 3 – С. 63–67.
3. Антонов, Ю. В. Запаздывание приливной волны на суше / Ю. В. Антонов, И. Ю. Антонова // Геофизика, 2013. – № 6 – С. 48–51.
4. Антонов, Ю. В. Сравнение приливных вариаций силы тяжести и вертикальной составляющей сейсмографа / Ю. В. Антонов, И. Ю. Антонова // Геофизика, 2013. – № 2. – С. 27–31.
5. Антонов, Ю. В. Особенности морфологии неприливных вариаций силы тяжести / Ю. В. Антонов, И. Ю. Антонова // Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Сер.: Геология. – 2014. – Вып. 4. – С. 129–133.
6. Антонов, Ю. В. Структура и морфология неприливных вариаций силы тяжести / Ю. В. Антонов // Геофизика, 2015. – № 1. – С. 67–71.
7. Longman, I. M. Formulas for Computing the Tidal Accelerations Due to the Moon and the Sun / I. M. Longman // Journal of Geophysical Research, 1959. – Vol. 64. – № 12. – P. 2351–2355.
8. Timmen, L. Worldwide synthetic gravity tide parameters available on Internet / L. Timmen, H.-G. Wenzel // Bulletin d'information-Bureau gravimétrique international, 1994. – V. 75. – S. 32–40.
9. Timmen, L. Worldwide synthetic gravity tide parameters / L. Timmen, H.-G. Wenzel // International Association of Geodesy symposia. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag. 1996. – Vol. 113. – S. 92–101.

Воронежский государственный университет
Антонов Юрий Васильевич, профессор кафедры геофизики
E-mail: yuriyantono@yandex.ru; Тел.: 8 (473) 220-83-85

Voronezh State University
Antonov Yu. V., professor of Geophysical Department
E-mail: yuriyantono@yandex.ru; Tel.: 8 (473) 220-83-85