

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ОЦЕНКЕ НЕПРИЛИВНЫХ ВАРИАЦИЙ УСКОРЕНИЯ СВОБОДНОГО ПАДЕНИЯ

Д.С. Бобров, В.П. Лопатин

*ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл.
bobrov@vniiftri.ru, lopatin@vniiftri.ru*

В статье приведены результаты экспериментальных исследований, направленных на оценку влияния неприливных вариаций ускорения свободного падения. Исследовалось изменение ускорения свободного падения за счет изменения влагонасыщенности пород, изменения атмосферного давления и температуры окружающего воздуха. Установлено, что наибольшее влияние на УСП оказывает изменение атмосферного давления и температуры окружающего воздуха (30 – 35 мкГал).

Ключевые слова: ускорение свободного падения, вариации ускорения свободного падения

RESULTS OF EXPERIMENTAL STUDIES EVALUATING CONTINUOUS ROTATION OF FREE FALL ACCELERATION

D.S. Bobrov, V.P. Lopatin

*FSUE «VNIIFTRI», Mendeleevo, Moscow region.
bobrov@vniiftri.ru, lopatin@vniiftri.ru*

The article presents the results of experimental studies aimed at evaluating the effect of non-tidal variations in the free-fall acceleration. The change in the free-fall acceleration due to changes in the moisture saturation of rocks, changes in atmospheric pressure and ambient temperature was studied. It was found that the greatest influence on the FFA is exerted by changes in atmospheric pressure and ambient temperature (30 - 35 mcGal).

Keywords: free-fall acceleration, variations in free-fall acceleration.

Введение

Для систем навигации по ускорению свободного падения Земли необходимо наличие опорного навигационного сигнала – навигационных баз данных параметров ускорения свободного падения. В общем виде слагаемые, входящие в модель значений ускорения свободного падения (УСП), представлены формулой:

$$g = \gamma_0 + \delta g_h + \Delta g_{\Delta H} + \Delta g_{\Delta \rho} + \delta g_t, \quad (1)$$

где γ_0 - нормальное поле Земли, $\delta g_h = 0.3086 \cdot h$, h – высота пункта наблюдения, $\Delta g_{\Delta H}$ - изменение УСП за счет влияния промежуточного слоя пород литосферы, заключенных между физической поверхностью Земли и поверх-

ностью относимости (например, поверхность общеземного эллипсоида), $\Delta g_{\Delta\rho}$ - изменение УСП за счет плотностных неоднородностей в строении Земли, δg_t - изменение УСП во времени.

Погрешность значений УСП таких баз данных должна быть не хуже первых мГал [1]. Первые три слагаемые формулы (1) вычисляются с погрешностью не более 0,01 мГал [2]. Четвертое слагаемое формируется либо путем реальных измерений, либо вычисляется по глобальным моделям ГПЗ. Пятое слагаемое изменчиво во времени и делится на приливное влияние, вызванное влиянием неравномерности вращения Земли и лунно-солнечными приливами, и неприливное, вызванное изменением атмосферного давления, гидрологической обстановки и др. [2]. Погрешность вычислений приливных вариаций УСП достигает 0,005 мГал, оценку погрешности неприливных вариаций УСП необходимо выполнить дополнительно.

Задача исследований состояла в выполнении экспериментальных работ, направленных на оценку величины неприливных вариаций УСП, вызванных изменением атмосферного давления, температуры окружающего воздуха и количества выпавших осадков.

Результаты экспериментальной оценки вариации УСП за счет изменения влагонасыщенности пород

Наибольший вклад на величину неприливных вариаций УСП вносит изменение гидрологической обстановки в районе измерений УСП. Начиная с февраля 2018 г., авторами проводились исследования по оценке стабильности УСП во времени путем непрерывной регистрации вариаций УСП в подвальном помещении технического здания.

Условие наблюдений: вокруг пункта наблюдений в области с радиусом R выпало h мм осадков. Влияние слоя воды можно вычислить по влиянию на УСП материального горизонтального диска с осью, проходящей через пункт наблюдений. Влияние понижения уровня грунтовых вод на величину УСП можно оценить по формуле [3]:

$$\Delta g_{\Delta\rho} = 0,0419 \cdot \delta \cdot h \left[\frac{Z}{\sqrt{R^2 + Z^2}} \right], \quad (2)$$

где h – толщина диска, Z – глубина его залегания, δ – плотность, R – радиус диска. Возьмем h равным 1 м, Z – 0 м и R – 50 м. При таких исходных данных изменение уровня грунтовых вод на 1 метр непосредственно под гравиметрическим пунктом вызывает изменение значения УСП на 42 мкГал.

Оценка влияния влагонасыщенности пород на УСП исследовалась с помощью экспериментальной установки (рис. 1), включающей гравиметры CG-5 Autograv (№438 и №543), размещаемые на специальном штативе на высоте 1 м друг над другом. Гравиметры одновременно включались на непрерывную запись. При этом оба гравиметра синхронно реагируют на при-

ливные лунно-солнечные вариации УСП, а также на неприливные вариации, вызванные изменением атмосферного давления.

Что касается воздействия уровня и объема грунтовых вод, разница в показаниях гравиметров возникает при выпадении осадков, когда они достигают плоского промежуточного слоя грунта, заключенного между гравиметрами. В этом случае увеличение массы слоя грунта за счет повышения влагонасыщенности приводит к изменению показаний гравиметров: показания верхнего гравиметра № 438 увеличиваются на величину, нижнего № 543 – уменьшаются на величину. Таким образом, при взаимном вычитании измерений гравиметров достигается удвоенная амплитуда измеренного сигнала.

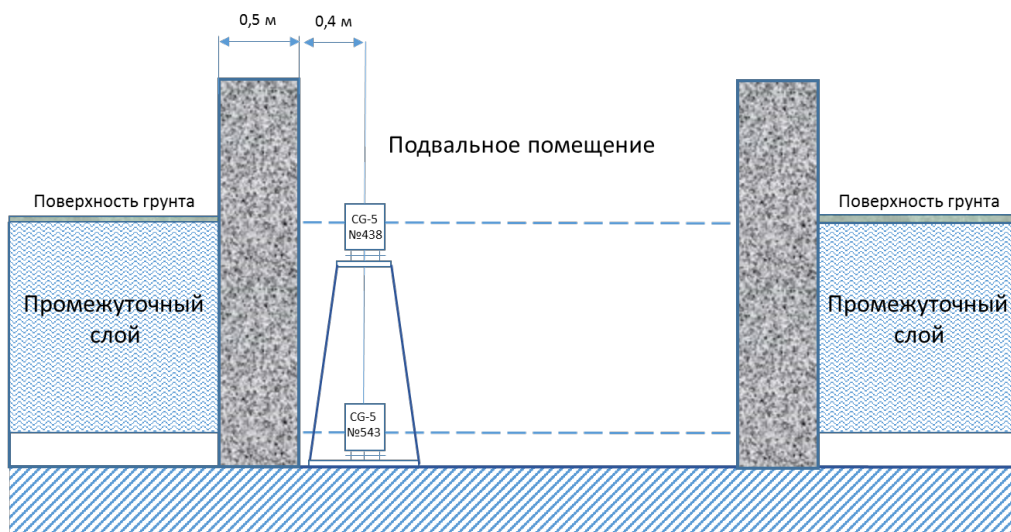


Рис. 1. Экспериментальная установка для контроля вариаций вертикального градиента УСП

На рисунке 2 представлены результаты экспериментальных измерений вариаций УСП. Длительность измерений составила 6 дней: с 31 августа по 5 сентября 2018 г. На графике оранжевая кривая соответствует разности результатов измерений между гравиметром № 438 (вверху) и № 543 (внизу).

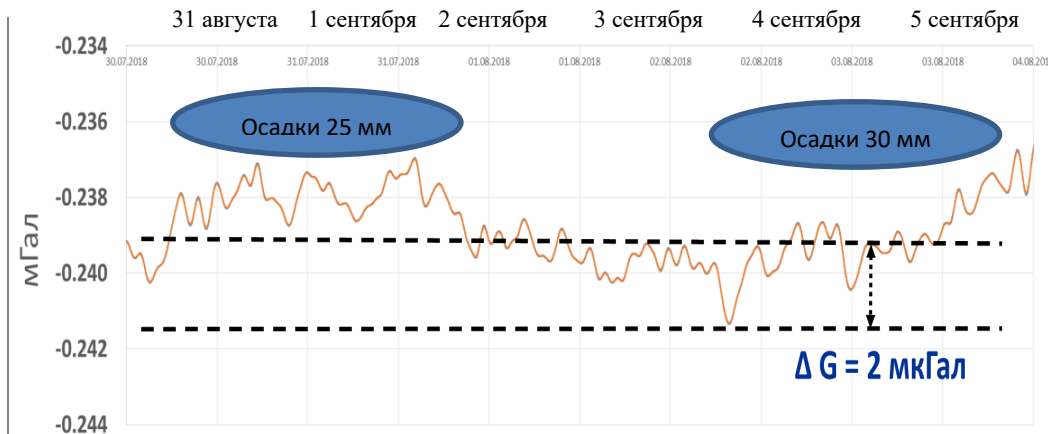


Рис. 2. Результаты экспериментальных измерений

Как видно из рисунка, на графике разности в период с 1 по 3 сентября наблюдается увеличение значений разности показаний гравиметров на величину до 2 мкГал. Учитывая, что это удвоенное значение амплитуды измеренного сигнала, истинное значение изменения УСП составит 1 мкГал. Изменение притяжения слоя грунта мощностью 1 м на величину 1 мкГал равносильно изменению его плотности на 0,025 г/см³, что, в свою очередь, соизмеримо с фильтрацией 25 мм осадков в этот слой грунта. По данным архива погоды [4, 5], в период с 31 августа по 2 сентября 2018 г. в районе г. Зеленоград наблюдался мелкий дождь, местами грозы, за этот период выпало около 30 мм осадков. Дальнейшее уменьшение разности измерений между гравиметром 438 и 543 в период с 1 по 4 сентября свидетельствует о фильтрации выпавших осадков вниз, увеличивая тем самым значение УСП, регистрируемое нижним гравиметром. Увеличение разности измерений между гравиметром 438 и 543 в период с 4 по 5 сентября вызвано очередным выпадением осадков схожей интенсивности.

Таким образом, результаты экспериментальных измерений вариаций УСП подтвердили теоретическое воздействие изменения влагонасыщенности пород за счет выпадения осадков на уровне 1 мкГал/25 мм осадков. В общем виде зависимость изменения УСП от выпадения осадков определяется формулой:

$$\delta g_{\text{влаг}} = \frac{1}{25} h_{\text{осадков}},$$

Где $h_{\text{осадков}}$ — количество выпавших осадков в мм.

Влияние вариаций атмосферных масс на гравиметрические измерения

Влияние атмосферных масс на гравиметрические наблюдения проявляется не только как влияние притягивающего промежуточного слоя, но и как влияние нагрузки, деформирующей земную кору. Возможное изменение УСП за счет изменения атмосферных масс может достигать 50 мкГал и более.

В настоящий момент в отечественной и зарубежной литературе, посвященной обработке гравиметрических данных, говорится о необходимости учета гравитационного эффекта атмосферы, зависящего от высоты пункта наблюдения. Масса всей атмосферы Земли вместе с массой твердой Земли включена в значение силы тяжести на поверхности эллипсоида. Согласно ПЗ-90.11 поправка в значение нормальной силы тяжести за притяжение атмосферы на высоте h вычисляется по формуле [6]:

$$\delta\gamma_a = -0.87e^{-0.116h^{1.047}} [\text{мГал}] . \quad (3)$$

Формула (3) не учитывает вариации атмосферных масс. Изменение массы атмосферы вызывает значительный эффект при измерениях УСП (до 20 % от приливного воздействия) с коэффициентом пропорциональности примерно равным 0,3 мкГал/мбар для континентального расположения пункта наблюдения. Эффект представляет собой комбинацию гравитационного притяжения аномалии масс атмосферы и вертикальной деформации земной коры. Для положительной аномалии массы атмосферы гравитационное влияние составляет около -0,4 мГал/мбар и +0,1 мГал/мбар при прогибе коры.

Вычисление поправки в значение силы тяжести δg_p , выведенной по формуле бесконечного плоскопараллельного слоя, предлагается вычислять по формуле:

$$\delta g_p = -0,426 \cdot \Delta P, \quad (4)$$

где ΔP изменение атмосферного давления в мбар. Аналогичная формула выведена зарубежными исследователями:

$$\delta g_p = -0,356 \cdot \Delta P, \quad (5)$$

Сравнение формул (4) и (5) показывает, что единого подхода к уменьшению влияния вариаций атмосферных масс на гравиметрические измерения пока нет. Поправка, связанная с изменением атмосферного давления, совершенно необходима при изучении неприливых изменений силы тяжести, при проведении площадных съемок и долговременных стационарных измерений [7,8].

Поправка в УСП напрямую связана с плотностью притягивающих масс, заключенных в объеме. Плотность атмосферы непостоянна во времени [8]. В общем случае гравитационную поправку за влияние атмосферы можно

представить соотношением:

$$\delta g_{am} = \delta g_{am0} + \delta g_{am_t} - \delta g_{am_p} \quad (6)$$

где δg_{am0} - гравитационная поправка за влияние стационарной атмосферы (соотношение 3); δg_{am_t} - гравитационная поправка при изменении температуры воздуха; δg_{am_p} - гравитационная поправка при изменении атмосферного давления.

$$\delta g_{am_t} = 0.0016dt$$

$$\delta g_{am_p} = (0.8105 \cdot 10^{-3} - 0.2157 \cdot 10^{-6} p_0) dp, \quad (7)$$

где dt - изменение температуры; p_0 - начальное атмосферное давление в мбар; dp - изменение атмосферного давления в мбар.

Во ФГУП «ВНИИФТРИ» на гравиметрическом пункте № 2, который оборудован с учетом рекомендации Международного бюро мер и весов, были проведены долговременные измерения УСП с помощью относительного гравиметра Sintrex CG5 № 438. Параметры окружающей среды измерялись метеостанцией, установленной на крыше здания. Для анализа были взяты измерения Sintrex CG5 за 24 дня (рис. 3). Гармонические составляющие хорошо согласуются с моделью приливных воздействий.

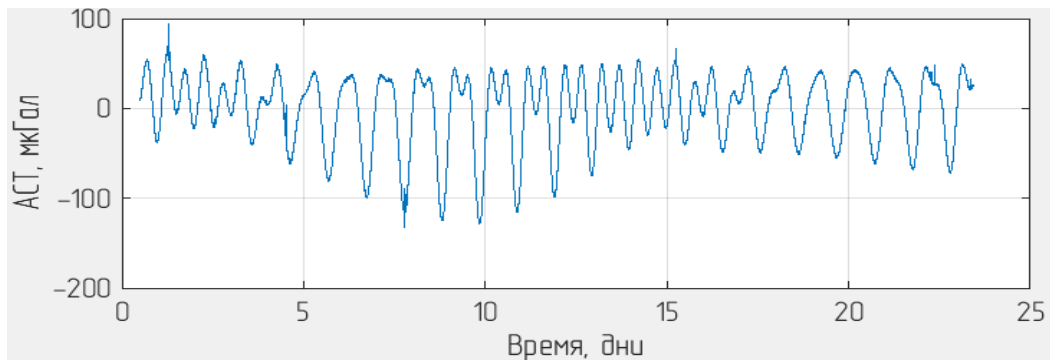


Рис. 3. Изменение УСП

Приливные составляющие УСП были удалены с помощью метода физического моделирования, для этого использовался программный пакет Atlantida, разработанный в ИФЗ РАН, модели упругой Земли IASP91 и океанических приливов FES2012. По результатам измерений представлены зависимости изменения УСП от изменения атмосферного давления и температуры (рис. 4). Как следует из рисунка, наблюдается корреляция между поправками и реальным изменением УСП.

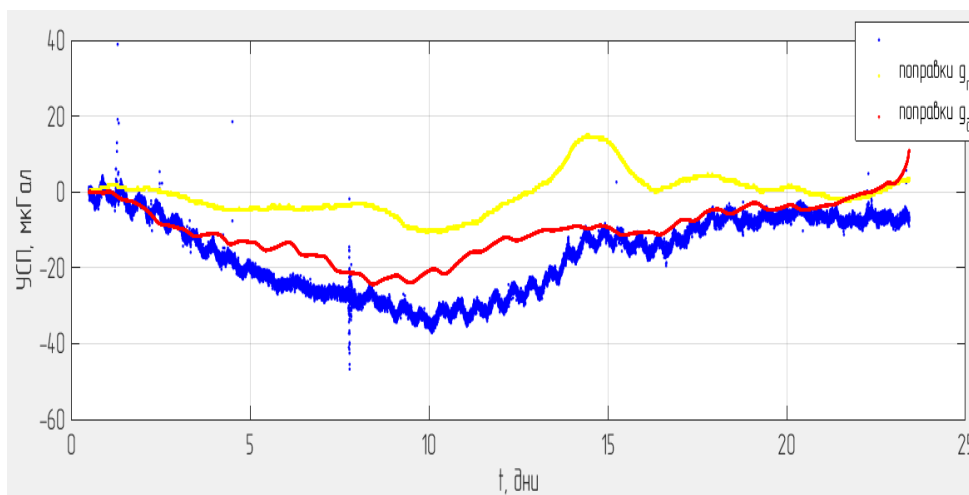


Рис. 4. Измеренные УСП (синяя), поправки при изменении давления (желтая), поправки при изменении температуры (красная)

Проведенные экспериментальные исследования показывают, что поправка за изменение атмосферных масс составляет около 0,3 мкГал/мбар, поправка за изменение температуры окружающего воздуха составляет 1,6 мкГал/1°C. Остаточные осцилляции УСП могут быть связаны с остаточным нелинейным дрейфом гравиметра, погрешностью приливной модели. Приведенные формулы (7) более строго отражают атмосферные эффекты, чем выражения, приведенные в работах [7, 8] Несмотря на малость величины, поправки за изменение атмосферных масс (до 20 % от приливного воздействия), на уровне развития современных гравиметрических приборов на практике ее необходимо учитывать.

Результаты экспериментальной оценки долговременной стабильности значений УПС

Долговременная стабильность значений УСП оценивалась на гравиметрическом пункте на территории г. Москвы. Средством оценки являлся абсолютный баллистический гравиметр (АБГ), входящий в состав государственного вторичного эталона единицы ускорения свободного падения в диапазоне значений от 9,77 до 9,85 м/с². Предел погрешности измерений эталона – 10 мкГал.

На рисунке 5 представлен график изменений УСП на исследуемом пункте с 2012 г. по 2017 г.



Рис. 5. Изменение УСП на длительном интервале времени на исследуемом пункте

Для исследуемого пункта за период времени с 2012 по 2017 год значение УСП изменилось на +18 мкГал, в 2015 году резкое изменение УСП на -40 мкГал вызвано активными строительными работами на Московском метрополитене, повлиявшими на работу АБГ. Среднее значение скорости изменения УСП составляет $18/5 = 3,6$ мкГал/год.

Заключение

Выполненные экспериментальные исследования оценки стабильности значений УСП во времени показали, что погрешность навигационных баз данных УСП за счет неучета непривливых вариаций УСП составляет величину до 40 мкГал и в общем виде вычисляется по формуле:

$$\sigma_{\text{базы_данных}} = \frac{1}{25} \cdot h_{\text{осадков}} - 0.0016dt + (0.8105 \cdot 10^{-3} - 0.2157 \cdot 10^{-6} p_0)dp,$$

где, $h_{\text{осадков}}$ - количество выпавших осадков в мм, dt - изменение температуры; dp - изменение атмосферного давления в мбар. Наибольшее влияние на вариации УСП оказывает изменение атмосферного давления и температуры окружающего воздуха (до 30 – 35 мкГал). Изменения УСП, вызванные изменением влагонасыщенности пород, достигают 6 мкГал при 140 мм [9] выпавших осадков. Среднегодовые изменения УСП достигают 3,6 мкГал в год.

Литература

1. Денисенко О.В., Фатеев В.Ф., Рыбаков Е.А. Ассистирующая технология глобальной навигации на основе геофизических полей Земли и оценка ее точности // Мир измерений. 2018. №1. С. 24-27.
2. Бобров Д.С. Классификация гравиметрических поправок за различные геодинамические явления по степени значимости при проведении высокоточных исследований. Материалы 71-ой научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых МИИГАиК, посвященной Международному году карт. 5-6 апреля 2016 г. –М.
3. Серкерев С.А. Гравиразведка и магниторазведка. Основные понятия, термины, определения. Учеб. пособие для вузов. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр». 2006. 479 с.
4. <http://o-pogode.ru/dnem-31-august-2018/zelenograd;>
5. <http://russia.pogoda360.ru/-532977/august>
6. Параметры Земли 1990 года (ПЗ-90.11). Справочный документ. – Москва. 2014. 52 с.
7. Valencio A., Grebogi C., Baptista M. Methods for removal of unwanted signals from gravity time-series: comparison using linear techniques complemented with analysis of system dynamics // Chaos. V. 27. № 10. P. 1-12
8. Дементьев Ю.В., Каленицкий А.И., Мареев А.В. Влияние атмосферного давления и температуры воздуха на значение силы тяжести // Вестник СГУГиТ. 2016. № 1. С. 62-69.
9. <http://www.pogodaiklimat.ru/monitor.php?id=27612>