

изотропные и анизотропные. Вместе с тем полученные и приведённые на рис. 4, σ данные демонстрируют, что даже в масштабе нескольких сантиметров степень анизотропии может существенно изменяться.

Как и в случае с регистрацией распределения коэффициента пористости, информация о пространственных вариациях коэффициента анизотропии обеспечивает более обоснованный выбор области образцов полноразмерного керна для отбора малых образцов для последующих различных специальных петрофизических исследований.

Выводы

Применение метода оптического сканирования обеспечивает бесконтактные неразрушающие исследования пространственных вариаций тепловых свойств образцов полноразмерного керна, включая

регистрацию пространственных вариаций главных значений теплопроводности и коэффициента тепловой анизотропии.

При наличии установленных связей между теплопроводностью и коэффициентом пористостью данные о пространственных вариациях теплопроводности обеспечивают регистрацию $2D$ распределения пористости для изучаемых образцов.

Данные о неоднородности образцов пород и распределении коэффициента пористости и коэффициента анизотропии в пределах образца полноразмерного керна, получаемые в результате теплофизических исследований полноразмерного керна, позволяют осуществлять более обоснованный выбор области образца полноразмерного керна для последующего изготовления малых образцов для специальных исследований (стандартные петрофизические исследования, томография, измерения при пластовых термобарических условиях, пиролиз и др.).

ЛИТЕРАТУРА

1. Попов Ю.А., Мандель А.М. Геотермические исследования анизотропных горных массивов. Известия РАН // Физика Земли. 1998. № 34 (11). С. 30–43.
2. Попов Ю.А., Чехонин Е.М., Паршин А.В., Попов Е.Ю., Миклашевский Д.Е. Новая аппаратно-методическая база тепловой петрофизики как средство повышения эффективности добычи тяжелых нефтей // Нефть. Газ. Новации, 2013. №4. С.52–58.
3. Попов Е.Ю., Чехонин Е.М., Сафонов С.С., Попов Ю.А., Ромушкевич Р.А., Герасимов И.В., Урсегов С.О., Гурбатова И.П. Результаты доизучения геологического строения пермо-карбоновой залежи Усинского месторождения путем непрерывного теплофизического профилирования керна. [Электронный ресурс] // Сб. ст. конференции EAGE «Геомодель-2014», Геленджик, 2014, режим доступа: <http://earthdoc.eage.org>, дата обращения 30 августа 2015 г.
4. Chekhonin E., Parshin A., Pissarenko D., Popov Y., Romushkevich R., Safonov S., Spasennykh M., Chertentkov M., Stenin V. When rocks get hot: Thermal properties of reservoir rocks // Oilfield Review. 2012. N 24(3). P. 20–37.
5. Popov Yu., Parshin A., Chekhonin E.M., Popov E., Miklashevskiy D., Suarez-Rivera R., Green S. Continuous core thermal properties measurements and analysis. San Francisco, California, American Rock Mechanics Association, 2013, 47th U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, V.4. P. 2991–2999, ARMA. 2013–391.
6. Suarez-Rivera R., Hakami A., Edelman E., Handwerker D., Gathogo P. Improving Geologic Core Descriptions and Heterogeneous Rock Characterization Via Continuous Profiles of Core Properties. Cartagena, Colombia, 2012. Society of Petrophysicists and Well-Log Analysts, 53rd Annual Logging Symposium, SPWLA-2012-236.

УДК 550.831+550.348

СИНХРОННЫЕ ПУЛЬСАЦИИ В НЕПРИЛИВНЫХ ВАРИАЦИЯХ ГРАВИТАЦИОННОГО И СЕЙСМИЧЕСКОГО ПОЛЕЙ

Ю.В. АНТОНОВ, И.А. СИЗАСК

Воронежский государственный университет
394006, Россия, г. Воронеж, Университетская пл., 1; e-mail: office@main.vsu.ru

Приведены результаты синхронных наблюдений вертикальной составляющей сейсмического поля в г. Воронеж (Россия) и неприливных вариаций силы тяжести в г. Бишкек (Кыргызстан). В гравитационном и сейсмическом полях наблюдаются пульсации. Пульсации неприливных вариаций силы тяжести и сейсмического поля существуют синхронно в указанных пунктах. Частотные характеристики также синхронны и тождественны. Пульсации имеют периоды колебаний в пределах 0–20 мин. (преимущественно 8 мин.).

Ключевые слова: лунно-солнечные вариации силы тяжести; неприливные вариации силы тяжести; корональные выбросы масс; метеорные потоки; пульсации; вертикальная составляющая сейсмического поля.

SYNCHRONOUS RIPPLES IN NON-TIDAL VARIATIONS OF GRAVITY AND SEISMIC FIELDS

YU.V. ANTONOV, I.A. SIZASK

Voronezh State University
394006, Russia, Voronezh, University pl., 1; e-mail: office@main.vsu.ru

The results of simultaneous observations of the vertical component of the seismic field in Voronezh (Russia) and non-tidal variations of gravity in Bishkek (Kyrgyzstan) are considered in the paper. Pulsations are observed in gravity and seismic fields. Ripples of non-tidal variations of gravity and seismic fields exist simultaneously in the mentioned sites. The frequency characteristics are also synchronous and identical. Pulsations have periods of oscillations in the range 0–20 min (preferably — 8 minutes).

Key words: lunar-solar variations of gravity; non-tidal variations of gravity; coronal mass; meteor showers; pulsations; the vertical component of the seismic field.

Под неприливыми (остаточными) вариациями силы тяжести и сейсмического поля будем понимать все изменения этих полей, исключая лунно-солнечные вариации силы тяжести, вне зависимости от источника их происхождения. Такие остаточные вариации получают с помощью гравиметра и сейсмографа при мониторинговых измерениях, когда из показаний приборов вычитаются рассчитанные по формулам значения притяжений Луны и Солнца. Сами приливные вариации изменяются плавно во времени и для них характерны высокочастотные колебания в пределах $\pm(0,01-0,02)$ мГал, хотя техническая возможность измерения силы тяжести приборами составляет $\pm 0,01$ мГал. В отдельные промежутки времени (до нескольких суток) высокочастотные колебания вдруг начинают увеличиваться по амплитуде в несколько раз. Примерно то же самое происходит с сейсмическими измерениями. Таким образом, имеем дело с новым явлением в гравиметрии и сейсмометрии, которое требует изучения. Внешне на графиках эти увеличения амплитуды колебаний выглядят, как пульсации [1].

При наблюдении вариаций силы тяжести дело с исключением влияния Луны и Солнца обстоит 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-солнечной части содержит в себе эффекты влияния от внешних и внутренних источников геодинамической системы Земля — Луна — Солнце.

На рис. 1, а зафиксирована кривая вариаций силы тяжести за период с 24 января по 5 февраля 2015 г. На кривой видно изменение силы тяжести под действием Луны и Солнца, представляющее

собой квазикосинусоидальные колебания с периодом от полусуточных до суточных, имеющие характерную модуляцию амплитуды в виде отдельных волновых пакетов, создающих сложную картину биений. На рис. 1, а также отражена пульсация гравитационного поля в виде утолщения наблюдаемой кривой силы тяжести [1].

После исключения лунно-солнечной вариации остаточная аномалия силы тяжести (рис. 1, б) представляет собой практически наклонную прямую, осложненную пульсацией. Считается, что изменение остаточной аномалии силы тяжести по линейному закону обусловлено смещением нуля-пункта гравиметра. Гравиметр находится в штольне с постоянной температурой. Объяснить такое изменение силы тяжести только смещением нуля-пункта все-таки трудно. Дело в том, что смещение в 2009 г. было положительным [6], в течение 2010 г. оно постепенно сменилось на отрицательное, оставаясь минимальным по амплитуде. Далее по сегодняшний день смещение остается отрицательным и увеличивается по амплитуде. Вероятно, линейное изменение фона зависит не только от смещения нуля-пункта гравиметра, но также от изменения силы тяжести в результате прецессионного движения оси Земли при вращении вокруг Солнца (период 18,6 лет). Само исключение линейного изменения силы тяжести не представляет трудностей [6].

Кроме того, программным обеспечением гравиметра CG-5 Autograv предусмотрено вычисление среднеквадратической погрешности измерения () силы тяжести. Правда, указанная погрешность носит несколько специфический характер и определяется дискретностью измерений [2]. Тем не менее погрешность достаточно объективно оценивает характер изменения пульсаций (рис. 1, в). Поведение амплитуд пульсаций гравитационного и сейсмического полей (рис. 1, в) полностью совпадает с изменением амплитуды погрешности. Значения силы тяжести даны в миллигалах (мГал), а сейсми-

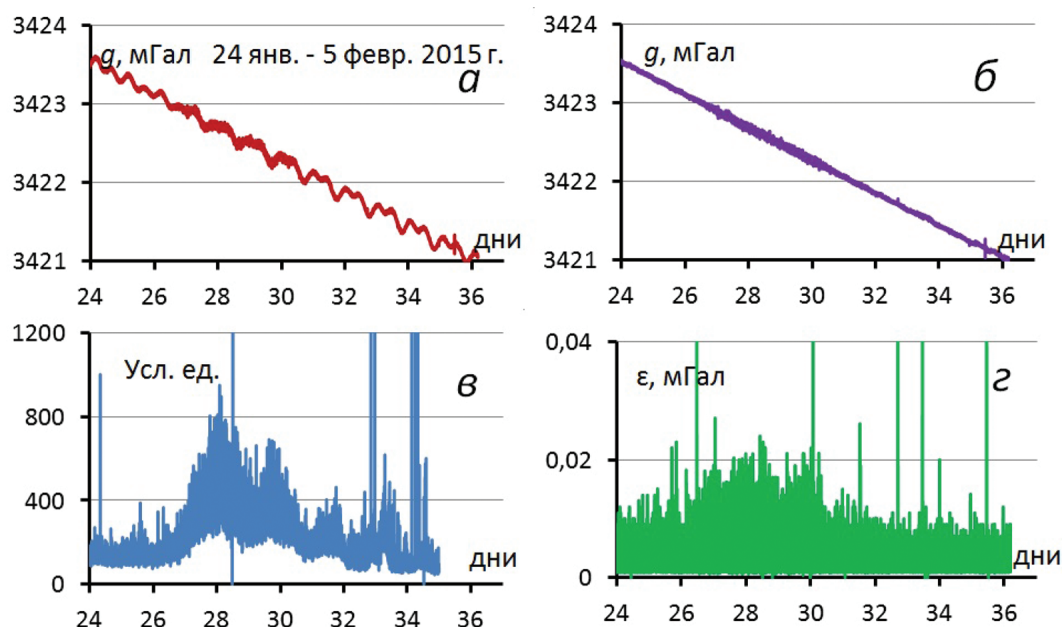


Рис. 1. Морфология записей гравиметрического и сейсмического полей: а — запись наблюдаемых лунно-солнечных вариаций силы тяжести; б — непривлинные вариации после исключения лунно-солнечных вариаций силы тяжести; в — запись сейсмических колебаний; г — среднеквадратическая погрешность гравиметрических наблюдений

ческого поля — в делениях (1 тыс. делений соответствует примерно 2 мкм).

Хотя для измерения сейсмического и гравитационного полей в качестве датчика служит вертикальный сейсмограф Б.Б. Голицина, путь для исправления измерений сейсмографа за счёт влияния Луны и Солнца более сложен. Частично этот вопрос изложен в [3]. Суть разницы между измерениями гравиметром и сейсмографом заключается в следующем. Для измерения силы тяжести фиксируем длину растяжения пружины вертикального сейсмографа, так как величина деформации пружины (при небольших деформациях) прямо пропорциональна изменению силы тяжести. Для измерения сейсмического поля мы используем скорость растяжения пружины. В этом случае нельзя напрямую использовать расчёты притяжения Луны и Солнца. Допустим, что сейсмических событий нет. В этом случае пружина сейсмографа будет растягиваться или сжиматься под действием Луны и Солнца, а сейсмический прибор будет регистрировать скорость перемещения пружины. Если для гравиметра максимум притяжения Луны и Солнца соответствует наличию этих объектов в зените, то для сейсмического поля это минимальное значение, а максимальное значение будет при минимальном значении приливной силы тяжести, когда есть наибольший градиент изменения вариации силы тяжести. Таким образом, за счёт изменения приливной силы тяжести возникает дополнительное «сейсмическое» поле, которое сдвинуто по фазе относительно приливной волны на 90° и складывается с реальным полем. Условно говоря, для

гравиметра поправка на притяжение Луны и Солнца имеет косинусоидальный вид, а для сейсмографа — синусоидальный. Чтобы исключить влияние Луны и Солнца, необходимо продифференцировать вариацию силы тяжести и полученную кривую сравнить с сейсмическим полем на участках, где нет пульсаций и других сейсмических событий. Найдя калибровочный коэффициент между дифференцированной кривой вариаций силы тяжести и сейсмическим полем, внесём соответствующие поправки в исходное сейсмическое поле [3]. Можно поступить и наоборот [3]. Для этого необходимо проинтегрировать кривую сейсмического поля и вычесть из результата интегрирования расчётные значения лунно-солнечных вариаций силы тяжести. Остаточная аномалия после вычитания будет некоторой трансформантой сейсмического поля. Но для сравнения с гравитационным полем лучше использовать сейсмическое поле, поэтому мы остановились на первом варианте.

После соответствующей обработки [4, 6] представим пульсации вариаций силы тяжести (рис. 2, а) и вертикальной составляющей сейсмического поля (рис. 2, б) за временной отрезок с 25 января по 5 февраля 2015 г. Впервые пульсации гравитационного поля, как упоминалось выше, выделены в [1]. Естественно, наличие пульсаций в сейсмическом поле следовало ожидать, так как сейсмическое и гравитационное поля Земли связаны между собой. Но главная суть представленных пульсаций заключается в том, что значения силы тяжести записаны в Киргизстане (Геодинамический полигон Научной станции РАН в г. Бишкеке), а сейс-

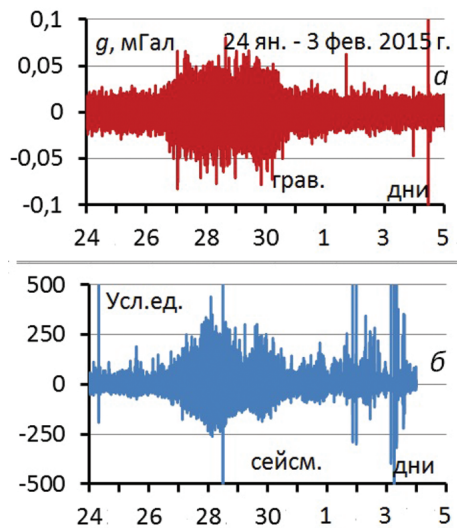


Рис. 2. Графики пульсаций гравитационного (г. Бишкек, Киргизия) и сейсмического (г. Воронеж, Россия) полей за январь 2015 г.

мическая запись проведена в г. Воронеж (пункт Сторожевое ГС РАН в Центрально-Черноземном районе).

Сравнение этих записей объясняется тем, что в Воронеже нет гравиметрических стационарных наблюдений. Гравиметры достаточно дорогая аппаратура. Но зато сейсмические наблюдения проводятся в платформенных условиях, где землетрясений практически не бывает, поэтому пульсации нельзя объяснить сейсмичностью региона. Ведь получив синхронные гравиметрические и сейсмические пульсации на территории Северного Тянь-Шаня, появление самих пульсаций и их синхронность можно объяснить активной геодинамической обстановкой в

альпийской складчатой зоне. Таким образом, можно заключить, что гравиметрические и сейсмические пульсации имеют нелокальное происхождение и одну и ту же природу.

На рис. 3 представлены амплитудно-частотные характеристики для гравиметрических и сейсмических пульсаций (рис. 2). Интервал пульсаций составил чуть более четырех суток (6000 измерений с шагом дискретизации 1 мин.). В правой части (рис. 3, а, в) даны частотные характеристики гравиметрической и сейсмической пульсаций в целом для всей оси OX , а в левой — (рис. 3, б, г) приведены периодограммы для интервала 2—100 мин. За пределами от 100 до 6000 мин. амплитуда практически равна нулю. Несмотря на то, что мы сравниваем приборы разного назначения и различной разрешающей способности, расположенные на расстоянии более 3000 км, частотные спектры пульсаций совпадают достаточно хорошо, но сейсмический спектр более чёткий и смещён в сторону высоких частот. Возможно, это связано с более высокой чувствительностью сейсмографа и меньшим шагом дискретизации наблюдений. На графике для сейсмического спектра (рис. 3, г) наиболее чётко выделяются два пакета частот с периодами 8 и 3,5 мин. По гравитационным пульсациям эти периоды тоже подчеркиваются, но несколько хуже. Кроме того, с учётом пульсаций в других реализациях выделяется ещё один период в 15 мин. Не исключено, что такие периоды связаны с внутренними гравитационными волнами, которые возникают в атмосфере в результате её взаимодействия с космическими лучами, корональными выбросами масс Солнцем, метеорными потоками и т. д. [8].

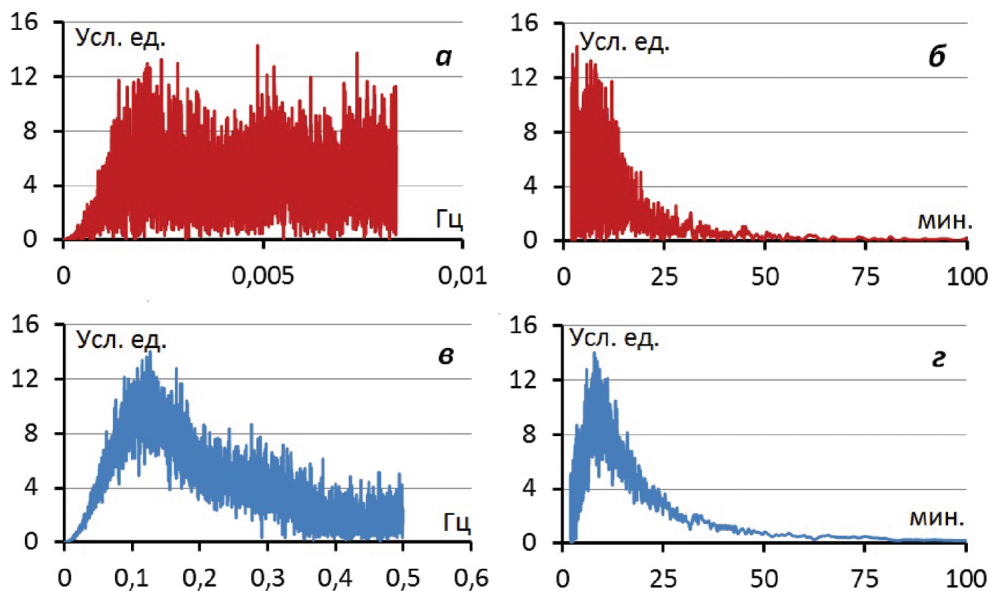


Рис. 3. Спектры пульсаций гравитационного (г. Бишкек, Киргизия) и сейсмического (г. Воронеж, Россия) полей за январь 2015 г.: а — амплитудно-частотный спектр гравиметрической пульсации; б — периодограмма гравиметрической пульсации в интервале 2—100 мин.; в — амплитудно-частотный спектр гравиметрической пульсации; г — периодограмма гравиметрической пульсации в интервале 2—100 мин.

После январской пульсации в феврале зарегистрированы еще три пульсации (рис. 4). Февраль месяц обычно богат на пульсации. На рис. 4 представлены пульсации за период с 3 по 20 февраля 2015 г. 8 февраля отмечен чёткий интенсивный максимум пульсации силы тяжести (амплитуда около 0,25 мГал). Далее появляются меньшие по амплитуде и более длительные во времени два максимума пульсаций: с 10 по 14 и с 16 по 20 фев.

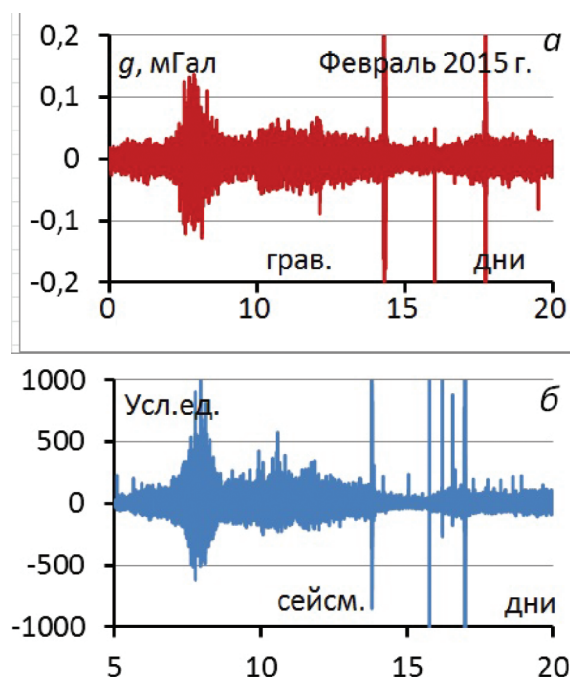


Рис. 4. Распределение пульсаций в феврале 2015 г.; усл. обознач. см. рис. 2

За это время отмечалась космическая штилевая погода. Практически вспышек на Солнце с 3 по 20 фев. не было. И только в конце 9 фев. была рентгеновская вспышка среднего класса M2, 4, после которой отмечена пульсация (10—14 фев.). Дело в том, что рентгеновские вспышки предваряют корональные выбросы масс Солнцем [2, 5, 7], которые могут вызвать пульсации. Правда, такие корональные выбросы могут воздействовать непосредственно на магнитосферу Земли, а могут благополучно миновать Землю. Далее имеется еще одна пульсация (16—20 фев.), но вспышек на Солнце не было, хотя в это время была магнитная буря. Наличие магнитной бури не может быть без выброса солнечной плазмы. Скорее всего, в данном случае произошел корональный выброс масс Солнцем без предварительной рентгеновской вспышки, что отмечается исследователями [7, 9].

На рис. 5 приведены частотные характеристики сейсмического и гравитационного полей за период с 3 по 20 фев. Графики на рис. 3, 5 удивительно хорошо совпадают между собой, показывая, что преобладающая частота пульсаций находится в интервале 1—20 мин. Некоторое незначительное расхождение спектров можно объяснить тем, что спектральный анализ проводился для интервала с 3 по 20 фев. для всех наблюдений, не исключая отрезки наблюдений, когда не было пульсаций. А в первом случае (рис. 3) анализировался отрезок, принадлежащий полностью пульсации.

Между тем отмечаются случаи, когда землетрясения и пульсации совпадают во времени (рис. 6, 7). Данные по вариациям силы тяжести приведены

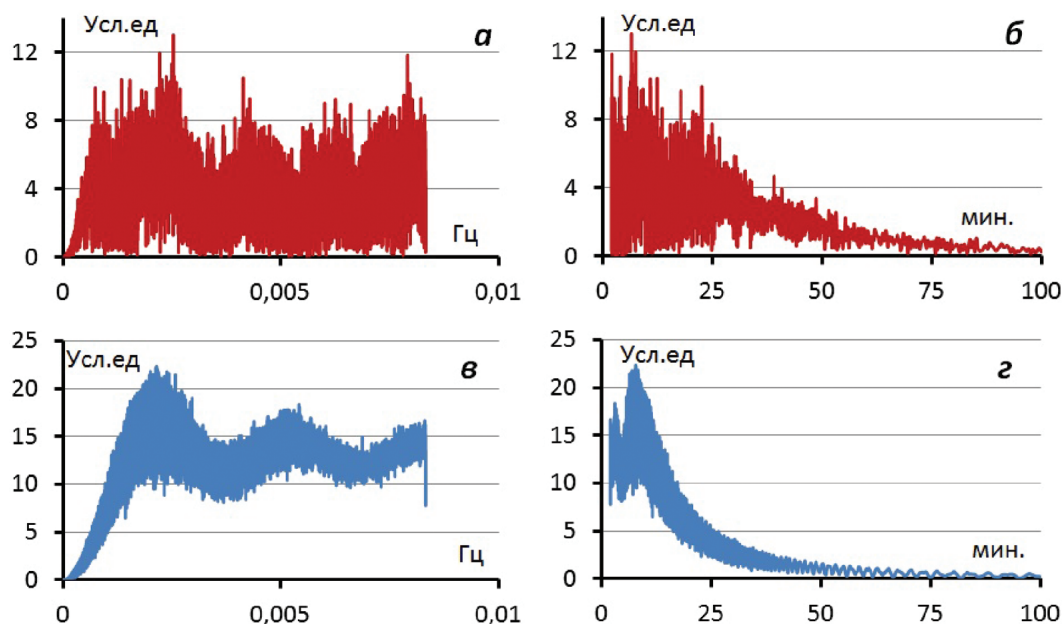


Рис. 5. Спектры пульсаций гравитационного (г. Бишкек, Киргизия) и сейсмического (г. Воронеж, Россия) полей за февраль 2015 г.; усл. обознач. см. рис. 3

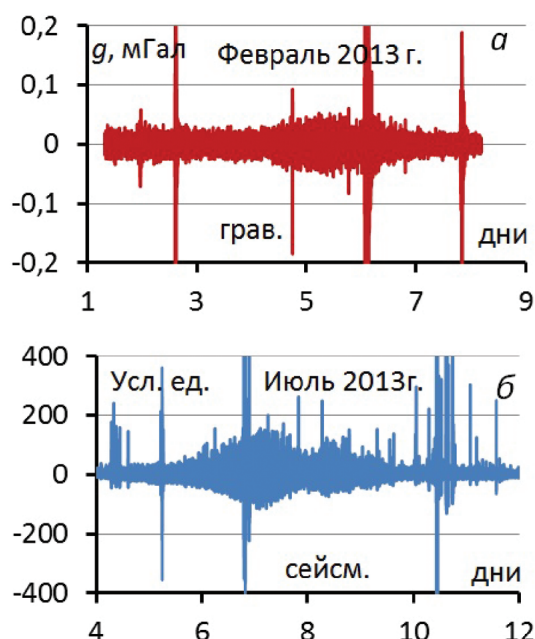


Рис. 6. Взаимоотношение пульсаций и землетрясений в 2013 г.; усл. обознач. см. рис. 2

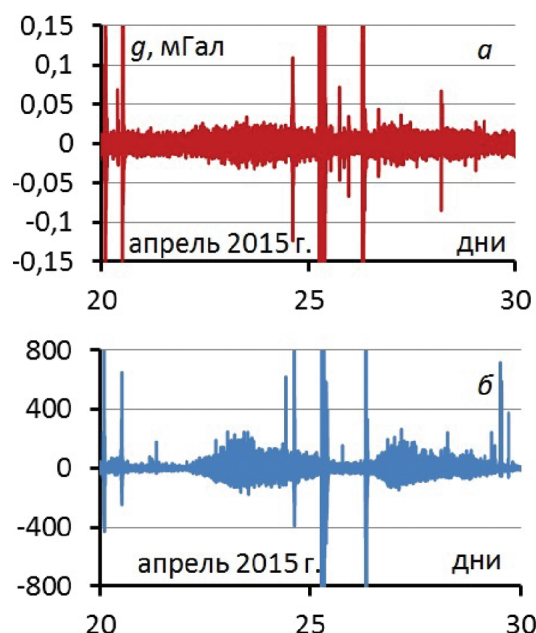


Рис. 7. Взаимоотношение пульсаций и землетрясений во время Непальского землетрясения 25 апреля 2015 г.; усл. обознач. см. рис. 2

за февраль 2013 г., а по сейсмическому полю за июль 2013 г. К сожалению, по техническим причинам в одном случае нет сейсмических данных, а в другом — гравиметрических. В первом случае (рис. 6) гравитационная пульсация возникла 4 фев. 2013 г., а 6 фев. 2013 г. в 1 ч. 12 мин. по мировому времени (UT) произошло катастрофическое землетрясение в Индонезии (8 баллов по шкале Рихтера) с повторным толчком в 5 ч. 12 мин. (UT) с амплитудой 6,3 балла. Во втором случае сейсмическая пульсация началась 5 июля, закончилась 9 июля 2013 г. Землетрясение ориентировочно произошло 6 июля в Габале (Азербайджан) магнитудой 3,8 балла по шкале Рихтера примерно в 23 ч 20 мин. (UT). И в том и другом случаях землетрясения вроде бы не связаны с пульсациями.

На рис. 7 приведены совместные данные пульсаций гравиметрического и сейсмического полей, которые по времени совпадают с Непальским землетрясением, произошедшим 25 апреля 2015 г. в 12 ч. 15 мин. (UT). Гравиметрическая пульсация выглядит почти единой, хотя в середине заметно уменьшается. А пульсация сейсмического поля разделена чётко на две части, и землетрясение попадает между ними. Причина расхождения в морфологии гравитационной и сейсмической пульсаций наверняка объясняется чувствительностью аппаратуры. Кроме того, 21—23 апреля 2015 г. отмечались рентгеновские вспышки класса M0—M2, которые могли быть предшественниками корональных выбросов и пульсаций соответственно. Тем не менее, в данном случае тоже не видим прямой связи землетрясений и пульсаций.

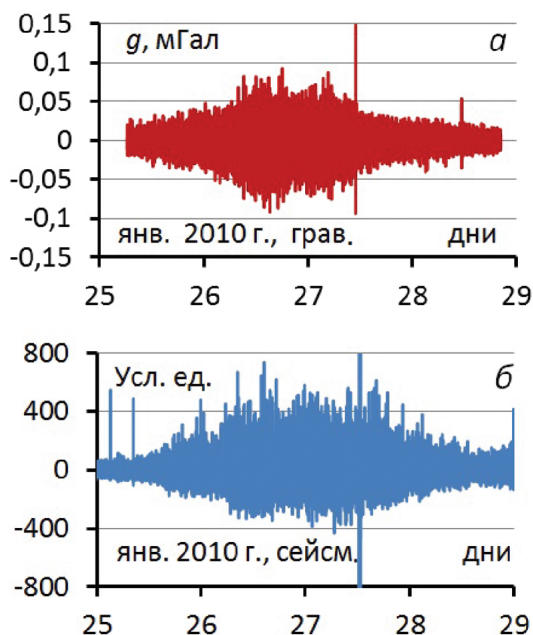


Рис. 8. Пульсации силы тяжести и сейсмического поля в январе 2010 г.; усл. обознач. см. рис. 2

Наконец рассмотрим еще одну пульсацию на конец января 2010 г. (рис. 8). Она в точности повторяет пульсацию (рис. 2) в конце января 2015 г. Не приводя других данных по годам, отметим, что эти пульсации в конце января повторяются в течение 6 лет. Это наводит на мысль, что пульсации периодически повторяются и, следовательно, связаны с процессами, происходящими в Солнечной системе. Наиболее вероятным источником появления пульсаций наряду с корональными выбросами

масс являются метеорные потоки. Данный вопрос будет рассмотрен дополнительно.

Заключение

Связь между пульсациями гравитационного и сейсмического полей однозначна и носит глобальный характер на земном шаре. Дальнейшее изучение пульсаций позволит установить более чётко их

физическую природу, чтобы использовать их для глубинного изучения Земли. В прикладном плане изучение пульсаций внесёт определенные коррективы в методику высокоточных измерений силы тяжести. Подобные гравиметрические (по аналогии с магнитными) «бури», которые произошли в январе — феврале 2015 г. (рис. 2, 4) могут в интервале в несколько суток свести на нет результаты высокоточных гравиметрических измерений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Антонов Ю.В. Пульсации неприливных вариаций силы тяжести // Изв. вузов. Геология и разведка. 2014. № 5. С. 54–57.
2. Антонов Ю.В. Структура и морфология неприливных вариаций силы тяжести // Геофизика. 2015. №1. С. 67–71.
3. Антонов Ю.В., Антонова И.Ю. Сравнение приливных вариаций силы тяжести и вертикальной составляющей сейсмографа // Геофизика. 2013. №2. С. 27–31.
4. Антонов Ю.В., Антонова И.Ю. Запаздывание приливной волны на суше // Геофизика, 2013., №6. С. 48–51.
5. Антонов Ю.В., Антонова И.Ю. Особенности морфологии неприливных вариаций силы тяжести // Вестник ВГУ. 2014. Серия Геология. Вып.4. С. 129–133.
6. Антонов Ю.В., Воронцова Е.В. Предварительная обработка наблюдений лунно-солнечных вариаций силы тяжести // Геология и разведка. Изв. вузов. 2012. № 3. С. 63–67.
7. Богачёв С.А., Кириченко А.С. Солнечные вспышки // Земля и Вселенная. 2013. № 5. С. 3–15.
8. Дикий Л.А. Теория колебаний земной атмосферы Л.: Гидрометеиздат, 1969. 195 с.
9. Howard, Timothy A.; Harrison, Richard A. Stealth Coronal Mass Ejections: A Perspective // Solar Physics. July 2013. Volume 285. Issue 1. pp 269–280.

УДК 550.832.2

АНАЛИЗ ПОЛЯРИЗАЦИИ ДИПОЛЬНЫХ ВОЛН В СКВАЖИНАХ НЕКРУГОВОГО СЕЧЕНИЯ В АНИЗОТРОПНОЙ ПОРОДЕ

Г.С. ЩЕЛИК

Московский физико-технический институт
141700, Россия, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

Московский научный центр Шлюмберже
119285, Россия, г. Москва, ул. Пудовкина, 13; e-mail: german.schelik@phystech.edu,

Исследован вопрос определения главных направлений анизотропной породы в скважинах с нарушением цилиндрической геометрии с помощью численного моделирования измерений акустического каротажа. Модель используемых на практике алгоритмов обработки предполагает распространение вдоль скважины двух ортогонально поляризованных волн, которые в рассматриваемых задачах соответствуют дипольным модам. На примере эллиптических скважин показано, что направления колебаний мод могут быть существенно неортогональными и зависеть от частотного спектра сигнала источника, что приводит к некорректному определению главных направлений трансверсально-изотропной породы. Полученные после обработки направления сопоставлены с независимым расчётом собственных векторов дипольных мод полуаналитическим методом конечных элементов (SAFE). Результаты сравнения свидетельствуют об эффективности применения частотных фильтров и «неортогональных» алгоритмов для проверки корректности найденных направлений и повышения точности значений углов.

Ключевые слова: акустический каротаж; эллиптическая скважина; анизотропия; Alford rotation.

ANALYSIS OF POLARIZATION OF DIPOLE MODES IN NON-CIRCULAR BOREHOLES IN ANISOTROPIC FORMATION

G.S. SCHELIK

Moscow Institute of Physics and Technology
141700, Russia, Moscow Region, Dolgoprudniy, Institutskiy per., 9;

Schlumberger Moscow Research
119285, Russia, Moscow, Pudovkinastr, 13; e-mail: german.schelik@phystech.edu,