

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОИСКОВ И РАЗВЕДКИ

УДК 550.830+550.732

СРАВНЕНИЕ ЧАСТОТНЫХ И МОРФОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
НЕПРИЛИВНЫХ ВАРИАЦИЙ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ
И МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Ю.В. АНТОНОВ¹, А.К. РЫБИН², В.Е. МАТЮКОВ²

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

²ФГБУН Научная станция Российской академии наук в г. Бишкеке
Киргизстан, г. Бишкек—49; e-mail: tua@gdirc.ru

Рассмотрено совместное изменение вариаций магнитотеллурического поля Земли и неприливных вариаций силы тяжести, зарегистрированных на территории Бишкекского геодинамического полигона. Наблюдается отчетливая взаимосвязь этих вариаций. Очевидно, что комплексный анализ вариаций магнитотеллурического поля и силы тяжести даёт новые возможности изучения глубинного строения и динамики геосреды.

Ключевые слова: магнитотеллурическое поле; неприливные вариации силы тяжести; Бишкекский геодинамический полигон.

COMPARISON OF FREQUENCY AND MORPHOLOGICAL CHARACTERISTICS
VARIATIONS OF GRAVITY AND MAGNETOTELLURIC FIELDS

YU.V. ANTONOV¹, A.K. RYBIN², V.E. MATIUKOV²

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

²Research Station of the Russian Academy of Sciences in Bishkek-city
Kyrgyzstan, Bishkek—49, e-mail: tua@gdirc.ru)

The joint change variations of magnetotelluric field of the Earth and un-tidal variations of gravity, registered on the territory of Bishkek Geodynamic Polygon, are considered. There is a clear relationship of these variations. Obviously, a joint analysis of the variations of magnetotelluric field and gravity gives a new possibility to study the deep structure and dynamics of geo-medium.

Key words: magnetotelluric field; un-tidal variations of gravity; Bishkek Geodynamic Polygon.

Земля является частью динамической системы Солнце — Земля — Луна. Наибольшее влияние на Землю оказывают Солнце и Луна. Поэтому все физические процессы, происходящие на поверхности

и внутри Земли, так или иначе находятся под влиянием Солнца и Луны и изменяются одновременно. В частности, это относится к наблюдаемым нами магнитным, электромагнитным, сейсмическим и

гравитационным полям. Эти поля взаимосвязаны между собой и могут меняться синхронно под действием внешних сил. Связи эти весьма разнообразны и данному вопросу посвящено огромное число работ. Мы рассмотрим более узкую область воздействия Солнца и Луны на неприливные вариации силы тяжести и магнитотеллурического поля, которая ранее частично нами затрагивалась в работах [3, 5].

Переменное естественное электромагнитное поле Земли (магнитотеллурическое поле) порождается электрическими токами в ионосфере, дальними грозами и другими источниками, находящимися на достаточном удалении от точки наблюдения, и носит как глобальный, так и региональный характер [6]. Переменное магнитное поле по закону электромагнитной индукции создаёт вихревые электрические поля. Электрическое поле порождает в проводящей земле электрический ток, у которого имеется своё магнитное поле. Важно отметить, что хотя первичные электрические токи в земле порождаются индукционным способом, дальнейшее их взаимодействие с горизонтально-неоднородной средой приводит к возникновению вторичного поля как индукционной, так и гальванической природы.

За счёт явления скин-эффекта более высокочастотные колебания магнитотеллурического поля довольно быстро затухают с глубиной, в то время как низкочастотные компоненты поля проникают на большие глубины. Соответственно высокочастотные составляющие поля несут информацию лишь о приповерхностной части разреза. С понижением частоты вклад более глубоких частей разреза в наблюдаемое поле возрастает, и мы получаем информацию о глубинной части геоэлектрического разреза.

Частотный состав вариаций электромагнитного поля Земли охватывает широкий диапазон: от 10^5 до 10^{-6} Гц [6]. Медленные изменения магнитотеллурического поля с периодом от нескольких минут до нескольких веков называют «длинно-периодными вариациями». Изменения от нескольких долей секунд до нескольких минут называют «короткопериодными колебаниями» (КПК), а высокочастотные колебания с периодами, меньшими долей секунд, — «атмосферными шумами». В практике разведочной геофизики наибольшее распространение имеют КПК, на использовании которых основаны методы магнитотеллурического профилирования и зондирования. КПК возникают при воздействии заряженных частиц, излучаемых Солнцем и попадающих в околоземное пространство. Предполагается, что в плазме, окружающей Солнце, поток заряженных частиц возбуждает магнитогидродинамические волны, которые, достигая ионосферы, превращаются в электрические волны.

На вариации поля силы тяжести преимущественное влияние имеет Луна. На магнитотеллурическое поле Луна, как инертное тело по космическим понятиям, вроде не должна влиять. Но оно (влияние) всё-таки имеет место. В частности, о влиянии вариаций силы тяжести на короткопериодные вариации магнитотеллурического поля отмечено в [3]. Суть этого влияния состоит в следующем. Под действием приливного действия Луны в земной коре возникают деформационные волны сжатия-растяжения, и соответственно изменение давления в породах создает электрический эффект второго рода, когда под действием прохождения упругих волн происходит электризация земных слоёв. Еще в 1939 г. об этом писал А.Г. Иванов [10], отмечая, что с появлением высокоточной аппаратуры это обстоятельство будет использовано в геофизике. Действительно, сейчас эта идея находит практическое применение.

Как показывают полевые эксперименты, вариации силы тяжести и магнитотеллурического поля коррелируют между собой. Ранее нами анализировались результаты совместных наблюдений вариаций магнитотеллурического поля и силы тяжести, полученных на территории Бишкекского геодинимического полигона [5]. Анализ результатов наблюдений проводился тогда во временных интервалах 7—8 дней, что определялось объёмом флеш-памяти гравиметра, и шагом дискретизации 30 с. Как отмечалось в [5], в силу конструктивных особенностей гравиметра получить более длинные непрерывные записи силы тяжести с дискретизацией в 30 с не удалось. Причина в том, что при исключении линейного фона за счёт сползания нуля-пункта гравиметра удаляется линейная часть изменения неприливной вариации и трансформируется нелинейная часть вариации. В результате не удалось создать достаточно длинный временной интервал наблюдений, чтобы достоверно выделить длинно-периодные неприливные вариации силы тяжести. Поэтому для получения низкочастотных изменений силы тяжести необходимо увеличивать шаг дискретизации измерений, естественно теряя при этом высокочастотную информацию. Что же касается практики магнитотеллурических измерений, то здесь вопрос увеличения интервала наблюдения решается просто. Отметим только, что для корректного сопоставления при обработке вариаций магнитотеллурических записей приходится приводить наблюдения к той же дискретизации, что и в гравиметре.

В период 18.06.2014—02.09.2014 г. на территории Бишкекского геодинимического полигона были проведены измерения вариаций силы тяжести с шагом дискретизации 5 мин. Синхронно регистрировались вариации магнитотеллурического поля. На рис. 1 представлены неприливные вариации силы тяжести и магнитотеллурического поля

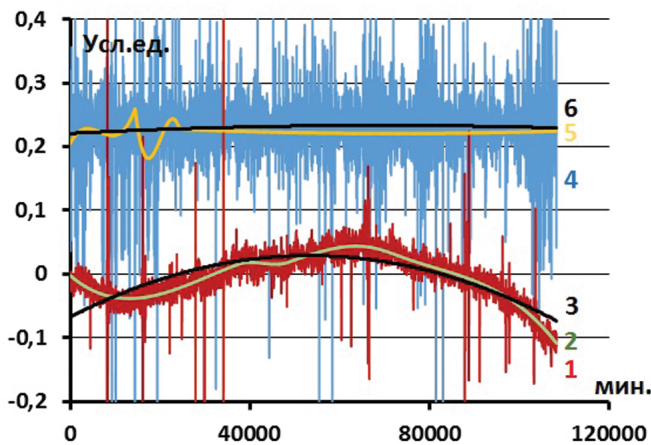


Рис. 1. Графики неприливых вариаций силы тяжести и компоненты H_z магнитотеллурического поля: 1 – график неприливной вариации силы тяжести; 2 – сплайн-сглаженный график неприливной вариации силы тяжести; 3, 5 – аппроксимационные кривые второго порядка неприливной вариации силы тяжести и вертикальной компоненты магнитного поля H_z ; 4 – вариации компоненты H_z магнитотеллурического поля; 6 – сплайн-сглаженный график магнитотеллурического поля

(вертикальная компонента магнитного поля H_z), полученные после исключения линейного фона и выполнения соответствующих процедур обработки [1–5].

Для наглядности значения вертикального магнитного поля H_z на рис. 1 умножены на корректирующий коэффициент, подобранный так, чтобы значения сравниваемых полей по величине примерно совпадали между собой. Остаточная аномалия приливной силы тяжести (рис. 1, кривая 1) изменяется в пределах 0,1 мГал, что сопоставимо с изменением суточной лунно-солнечной вариации. При недельных интервалах анализа этот момент не проявляется. По-видимому, причиной такой аномалии являются приливные волны или прецессия земной оси с полу- и годовым периодами, и она должна быть удалена. Надо иметь в виду, что нутационные движения земной оси и приливные явления связаны одни с другими, так как они вызваны силой гравитации [12]. Указанная остаточная аномалия приливной силы тяжести аппроксимируется полиномом второй степени (рис. 1, кривая 3). Следует обратить внимание, что аппроксимирующая H_z (рис. 1, кривая 6) имеет кривизну того же знака, что и аппроксимирующая кривая силы тяжести (рис. 1, кривая 3). Это может свидетельствовать, что возможным источником изменения вертикальной компоненты магнитного поля служит все та же прецессия оси Земли. Когда ось Земли меняет своё положение в пространстве, меняется не только сила тяжести, но и освещенность (плотность солнечного ветра) Земли.

Кроме того, на рис. 1 (кривые 2 и 5) представлены сплайн-сглаженные значения наблюдаемых полей. Кривая сплайн-сглаживания в значительной степени отличается от кривой простого осред-

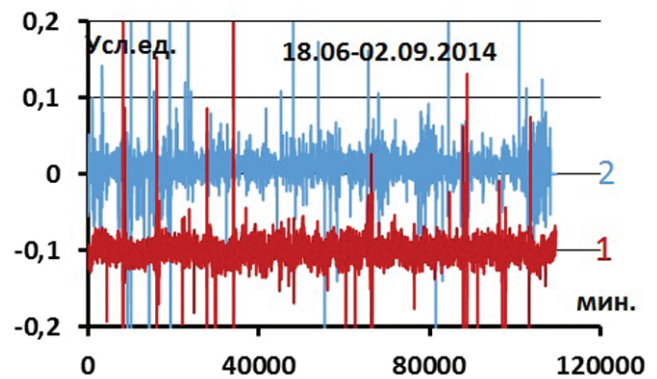


Рис. 2. Графики остаточных вариаций силы тяжести и компоненты H_z магнитотеллурического поля после исключения сплайн-сглаженных значений: 1 – остаточная неприливая вариация поля силы тяжести; 2 – остаточная вариация H_z магнитотеллурического поля

нения. Чтобы получить при обычном осреднении такую же гладкую кривую вариации, как и при сплайн-сглаживании, необходимо скользящее окно увеличить до 5–8 ч, а это ведёт к потере большей части информации на концах графика. Частично результаты об использовании сплайн-сглаживания приведены в [1]. А в целом любое сглаживание ведёт к искажению полезного сигнала. Если скользящее окно осреднения невелико, то искажения полезного сигнала незначительны, но подавление случайных погрешностей в этом случае тоже неполное. При желании получить большее подавление помех (увеличение размеров окна), сразу сталкиваются с искажением полезного сигнала. После исключения сплайн-сглаживающей кривой остаётся неприливая вариация (рис. 2, кривые 1 и 2), которые связаны с периодами примерно от 1 ч до нескольких суток.

Перейдем к обсуждению частотных характеристик. Заранее отметим, для всех реализаций вычислялись амплитудно-частотные спектры и спектральные плотности мощности. Практически нет никаких расхождений между указанными характеристиками. Спектры Фурье вычислялись для всех позиций, представленных на рис. 1 и 2: неприливые вариации, сплайн-сглаженные значения вариаций и остаточные аномалии неприливых вариаций после исключения сплайна. Для гравитационного и магнитотеллурического полей во всех случаях четко отмечается период около 18,5 тыс. мин. Этот период примерно соответствует одному из основных периодов в интервале 13,66 сут., который связан с периодом нутации земной оси или полумесячной приливной волной M_f . Вторым главным периодом является период 27,6 сут. (приливая месячная волна M_m). Следует сразу отметить, что периоды нутаций земной оси и земных приливов очень точно вычисляются по формулам, но в силу различных причин плохо определяются прак-

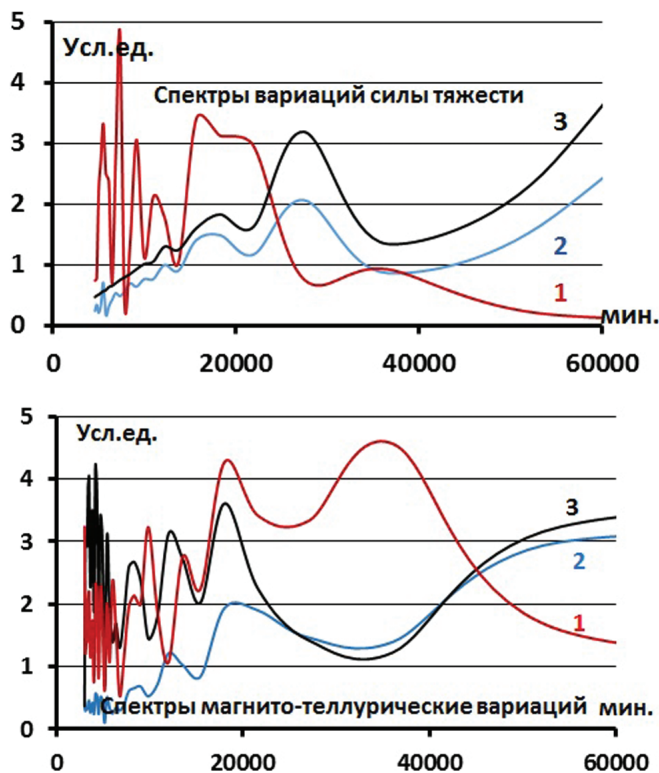


Рис. 3. Амплитудно-частотные спектры Фурье вариаций вертикальной компоненты магнитного поля и силы тяжести: 1 – спектр вариаций остаточных аномалий после исключения значений сплайна из исходных данных; 2 – спектр исходных значений вариаций; 3 – спектр сплайн-сглаженных вариаций

тическим путем [11]. К тому же, в нашем случае временной интервал наблюдений не совсем достаточен для получения надежной оценки. Тем не менее можно уверенно считать, что выделяемый период 18,5 тыс. мин. связан с приливной волной M_2 .

Также на спектрах для сплайн-сглаженных вариаций (рис. 3 кривые 3) выделяется период 9,1 сут. (13 тыс. мин.) и даже более точно, чем период в 13,7 сут. А вот период в 27,6 сут. (40 тыс. мин.) выделяется только для остаточных аномалий для гравитационного и магнитотеллурического полей, полученных после вычитания сплайн-сглаженных вариаций (рис. 3, кривая 1). Надо отметить, что в вариациях силы тяжести выделяется период примерно 19 сут., который также характерен для нутаций, но в магнитотеллурическом поле он отсутствует. Этот период просматривается на нормализованной периодограмме Ломба (рис. 4). Все остальные упомянутые выше периоды отчетливо проявляются в обоих полях. Кроме того, на периодограмме Ломба дополнительно выделяется период 38 сут., который, вероятно, также связан с прецессией земной оси. Метод Ломба использовался с целью независимой оценки полученных результатов методом Фурье, так как метод Ломба несколько отличается от метода Фурье в отношении ослабления долгопериодных и усиления высокочастотных вариаций [8], но в целом при распределении

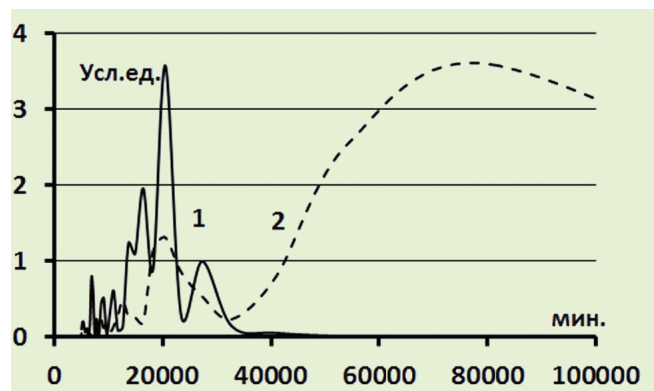


Рис. 4. Периодограммы Ломба вариаций неприливных вариаций силы тяжести и компоненты H_z магнитотеллурического поля: 1 – периодограмма Ломба неприливных вариаций силы тяжести; 2 – периодограмма Ломба вариаций магнитотеллурического поля H_z

ряда данных с равномерным шагом дискретизации близок к методу Фурье.

Интересно рассмотреть более короткие периоды (рис. 5). В вариациях силы тяжести всегда выделяется 1-часовой период с отклонением в несколько минут в ту или другую сторону. Этот период наиболее значимый. Впервые период в 57 мин. выде-

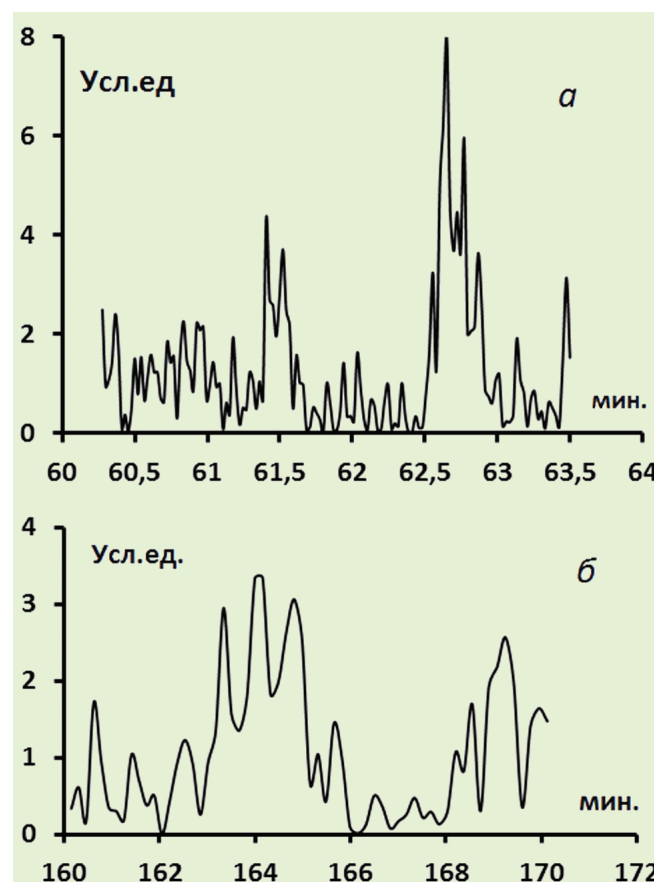


Рис. 5. Спектры компоненты H_z магнитотеллурического поля в диапазоне 50–200 мин.: а – спектр Ломба компоненты H_z магнитотеллурического поля в часовом диапазоне; б – спектр Ломба компоненты H_z магнитотеллурического поля в диапазоне 160–170 мин.

лил еще Беньюфф [14] после разрушительного землетрясения на Камчатке в 1952 г. и предположил, что он соответствует основному тону собственных колебаний Земли, а причиной появления этого периода являются землетрясения. Но измерительная аппаратура тогда была не настолько чувствительной, чтобы надёжно выделить другие, меньшие по амплитуде, частоты. К настоящему времени в большинстве случаев считается, что собственные колебания Земли существуют вне зависимости от землетрясений, а последние лишь увеличивают амплитуду колебаний [12]. В спектре Ломба (рис. 5, а) выделяется тот же период. Совпадение периодов вариаций магнитотеллурического поля и собственных колебаний Земли кажется противоестественным. Однако этому есть объяснение. Выше упоминалась работа [10], где рассматривался эффект электризации горных пород при прохождении упругих волн. Таким образом, собственные колебания Земли могут вызывать изменения магнитотеллурического поля, о чём частично было изложено в [3–5].

Далее на рис. 5, б четко выделяется период в 164 мин. В 1975 г. А.Б. Северным совместно с

С.А. Котовым и Т.Т. Цапом впервые был выделен период собственных колебаний Солнца с периодом 160 мин. [13]. В последующем эта оценка менялась в пределах нескольких минут. Естественно, что вариации магнитотеллурического поля связаны напрямую с деятельностью Солнца, соответственно период в 164 мин., показанный на рис. 5, б, логично объяснить собственными колебаниями Солнца. Предполагается, что в плазме, окружающей Солнце, поток заряженных частиц возбуждает магнитогидродинамические волны, которые, достигая ионосферы, превращаются не только в электрические волны, но и в результате динамического удара вызывают упругие колебания Земли. Поэтому в неприливных вариациях силы тяжести возникают колебания с тем же периодом в 164 мин., модулируя в свою очередь электромагнитное поле внутри Земли.

Таким образом, следует констатировать что вариации гравитационного и магнитотеллурического полей тесно связаны между собой, а это даёт возможность повысить надёжность комплексной интерпретации указанных методов, а также создания новых способов интерпретации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Антонов Ю.В. Структура и морфология неприливных вариаций силы тяжести // Геофизика. 2015. № 1. С. 67–71.
2. Антонов Ю.В., Антонова И.Ю. Сравнение приливных вариаций силы тяжести и вертикальной составляющей сейсмографа // Геофизика. 2013. № 2. С. 27–31.
3. Антонов Ю.В., Антонова И.Ю., Рыбин А.К., Щелочков Г.Г. Модуляция вариаций вертикального градиента силы тяжести и электромагнитного поля собственными колебаниями Земли // Изв. вузов. Геология и разведка. 2010. № 6. С. 101–105.
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., Рыбин А.К. Вариации гравитационного и магнитотеллурического полей. Воронеж // Вестник ВГУ. 2013. Серия Геология. Вып. 2. С. 129–133.
6. Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И. Магнитотеллурическое зондирование горизонтально-однородных сред. М.: Недра, 1992. 250 с.
7. Богачёв С.А., Кириченко А.С. Солнечные вспышки // Земля и Вселенная. 2013. № 5. С. 3–15.
8. Витязев В.В. Цифровая частотная селекция сигналов. М.: Радио и связь, 1993. 240 с.
9. Жаров В.Е. Сферическая астрономия. Фрязино: Изд-во «Век»–2, 2006. 480 с.
10. Иванов А.Г. Эффект электризации пластов земли при прохождении через них упругих волн // Докл. АН СССР. 1939. Т. XXIV. № 1. С. 41–43.
11. Максимов И.В. Геофизические силы и воды океанов. М.: Гидрометеиздат, 1970. 447 с.
12. Мельхиор П. Земные приливы. М.: Изд-во «Мир», 1968. 482 с.
13. Северный А.Б. Некоторые проблемы физики Солнца. М.: Наука, 1988. 221 с.
14. Benioff H., Press F., Smith S. Excitation of the free oscillations of the Earth by earthquakes // J. Geophys. Res. 1961. V. 66. P. 605–619.