

ВАРИАЦИИ ИНДУКЦИИ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН ЧЕРЕЗ РАЗЛОМНУЮ ЗОНУ

Б.Г. Лукишов, А.А. Спивак, А.А. Тер-Семенов

Приводятся результаты инструментальных наблюдений за магнитными эффектами в зонах тектонических структур. Показано, что сейсмические волны с амплитудами, превышающими 5–10 мкм/с, при распространении через разломную зону всегда вызывают вариации геомагнитного поля. При более слабых сейсмических возмущениях эффект имеет «мерцательный» характер, причем относительная частота возникновения эффекта падает с уменьшением амплитуды сейсмической волны и составляет в целом по диапазону 2–5 мкм/с – примерно 50%. Впервые установлена количественная зависимость между максимальным значением полного вектора вариаций геомагнитного поля в разломных зонах и амплитудой сейсмического возмущения. Длительность наведенных сейсмикой геомагнитных вариаций зависит от свойств горных пород.

Введение

Хорошо известно, что распространение сейсмических волн в земной коре сопровождается электромагнитными эффектами [Анисимов и др., 1985; Гохберг и др., 1987; Гульельми, Левшенко, 1994; Мигунов, Соболев, 2006; Elemen, 1965; Sgrigna et al., 2004]. При этом широко обсуждаются возможные механизмы генерации электрических и магнитных сигналов, среди которых следует отметить сейсмо-электрические эффекты I-го и II-го рода [Иванов, 1940; Гершензон, 1992; Назарный, Комаров, 2001], пьезо- и трибоэффекты [Пархоменко, 1968; Соболев, Демин, 1980], поляризацию горных пород при резком изменении напряженно-деформированного состояния (ударная поляризация) [Гончаров, Соловьев, 2004; Соловьев, Спивак, 2009], инерционный и индукционный механизм [Гульельми, 2008] и ряд других.

Более детальные эксперименты свидетельствуют о том, что в качестве основного определяющего фактора выступают неоднородности среды [Соловьев, Спивак, 2009; Soloviev, Sweeney, 2005]. Именно неоднородности структуры среды, наличие границ раздела между горными породами разного вещественного состава, зон нарушенности среды и разного напряженно-деформированного состояния способствует возникновению электромагнитных эффектов в поле сейсмических колебаний.

В связи с этим значительный интерес вызывает исследование электрических и магнитных сигналов при распространении сейсмических волн через крупные тектонические структуры земной коры – разломные зоны. Имеющиеся в литературе данные показывают, что возникающие на разломах земной коры электрические и магнитные эффекты, вызванные сейсмическим возмущением, надежно регистрируются [Анисимов и др., 1985; Гохберг и др., 1987].

Практическое значение геомагнитных исследований определяется возможностью диагностики и текущего контроля физико-механического состояния локальных участков земной коры при выборе мест строительства и геодинамическом обеспечении долговременной безопасной эксплуатации особо ответственных объектов повышенного риска на основе регистрации геофизических полей.

В настоящей работе представлены результаты систематических инструментальных наблюдений за аномальными вариациями геомагнитного поля в зоне влияния тектонических разломов при распространении сейсмических волн разной интенсивности.

Регистрация сейсмических волн и магнитных эффектов

Синхронные инструментальные наблюдения за сейсмическими сигналами и вариациями геомагнитного поля выполнялись на разломных зонах, оперяющих Нелидово-Рязанскую тектоническую структуру (НРТС), расположенную в Центральной части Восточно-европейской платформы [Адушкин и др., 2006], а также на разломах скальных горных пород в зоне отчуждения карьера «Мурунтау» (Узбекистан).

Измерения индукции геомагнитного поля выполнялись с помощью протонных магнитометров G-856 (GEOMETRICS) и магнитометров индукционного типа МИН-ВЧ-002 (разработка ИДГ РАН). Датчики-преобразователи G-856 размещались на антивибрационных подвесах на высоте 2,5 м над поверхностью земли, индукци-

онные магнитометры располагались непосредственно на земной поверхности в неглубоких приемках [Спивак и др., 2005].

Предварительное тестирование датчиков на поверочных сейсмометрических установках ПСГУ и ПСВУ (разработка и производство ОКБ ИФЗ РАН) показало отсутствие сейсмической наводки на магнитометры G-856 при амплитудах колебаний, не превышающих 10^{-2} м/с и незначительную сейсмическую наводку на индукционные магнитометры МИН примерно до 1 пТл при амплитудах колебаний не выше 10^{-3} м/с в диапазоне частот 0,1–20 Гц. Результаты виброиспытаний учитывались при выборе условий регистрации (магнитометры G-856 использовались, в основном, для регистрации эффектов, сопровождающих высокоамплитудные (до 3 мм/с) сейсмические возмущения при взрывах на карьере «Мурунтау»).

Следует отметить, что одновременная регистрация приборами G-856 и МИН демонстрирует близкие результаты (занижение на 5–7% данных, полученных с помощью G-856, связано с меньшей частотой опроса¹).

Регистрация сейсмических колебаний выполнялись с помощью сейсмометров СМ-3КВ, работающих в режиме велосиметра и расположенных в непосредственной близости от пункта геомагнитных измерений.

Регистрация информации проводилась с помощью часто используемых на практике программируемых регистраторов REFTEK-130 и «Дельта-Геон-023». При сборе и считывании информации использовался пакет прикладных программ MagPac, позволяющий выполнять коррекцию и усреднение данных, их фильтрацию, а также построение профилей поля.

Измерения выполнялись в летний период времени. Источниками сейсмических сигналов являлись массовые взрывы разной мощности, проводимые на карьере «Мурунтау» и на карьерах Московской, Калужской и Тульской областей России (Афанасьевский, Гурьевский, Парсуковский, Щуровский и др. карьеры), а также местные релаксационные события с амплитудой, превышающей 1 мкм/с.

Результаты инструментальных наблюдений

Измерения показали, что распространение сейсмического сигнала через разломную зону, как правило, сопровождается вариациями геомагнитного поля [Адушкин и др., 2006; Спивак, 2010]. В настоящей работе зарегистрировано в общей сложности 32 случая распространения сейсмических сигналов с амплитудой более 1 мкм/с через разломные зоны. При этом во всех случаях зарегистрированы амплитудные вариации геомагнитного поля. В качестве примера на рис. 1 и 2 приведены синхронные записи сейсмических колебаний A_M и вариаций полного вектора индукции геомагнитного поля B_G в зоне влияния тектонического разлома при взрывах на карьерах Гурьевский и Мурунтау². Приведенные данные демонстрируют достаточно сильную вариацию геомагнитного поля над фоновыми значениями во время прохождения сейсмического сигнала.

¹ Минимальное время между измерениями для магнитометров класса G-856 составляет 1 с, в то время как частота опроса датчиков МИН устанавливалась равной 100 Гц.

² С целью демонстрации структуры сейсмического сигнала, вызванного взрывом на карьере «Мурунтау», на рис. 3 представлен развернутый фрагмент сейсмической записи.

Рис. 1. Синхронная запись геомагнитных вариаций и сейсмического сигнала, вызванного массовым взрывом на Гурьевском карьере, в зоне влияния разлома II порядка относительно НРТС.

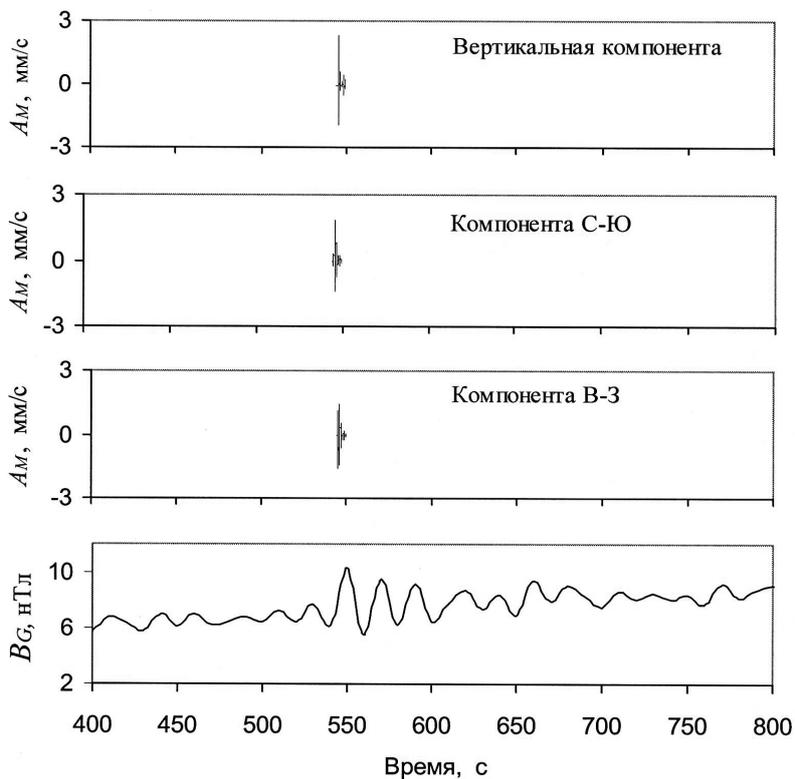
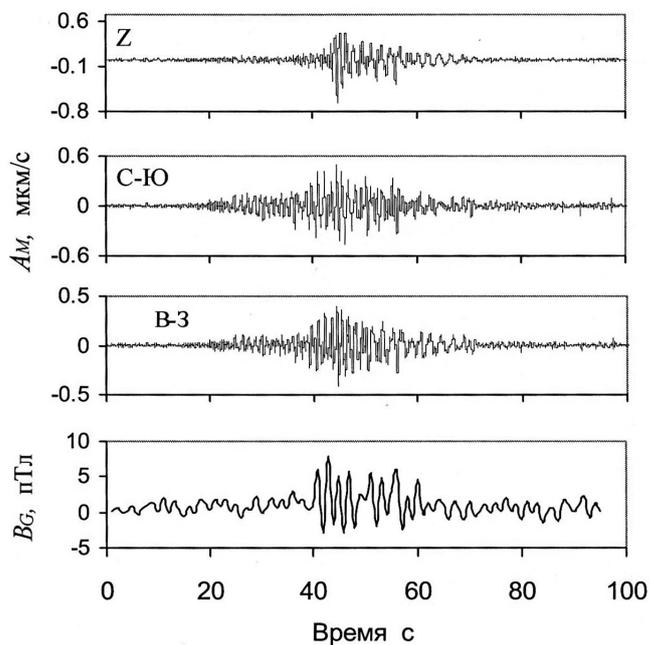


Рис. 2. Геомагнитные вариации, наведенные сейсмическим действием массового взрыва на карьере Мурунтау.

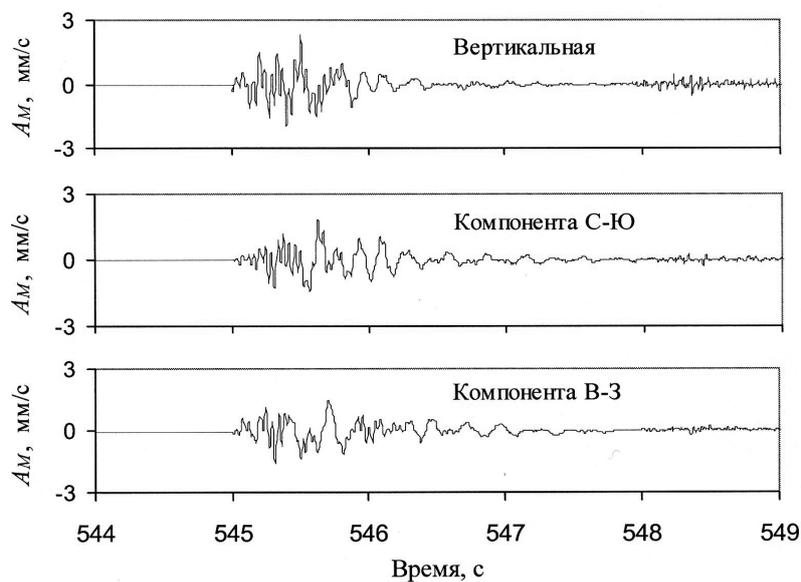


Рис. 3. Сейсмический сигнал, вызванный массовым взрывом на карьере Мурунтау.

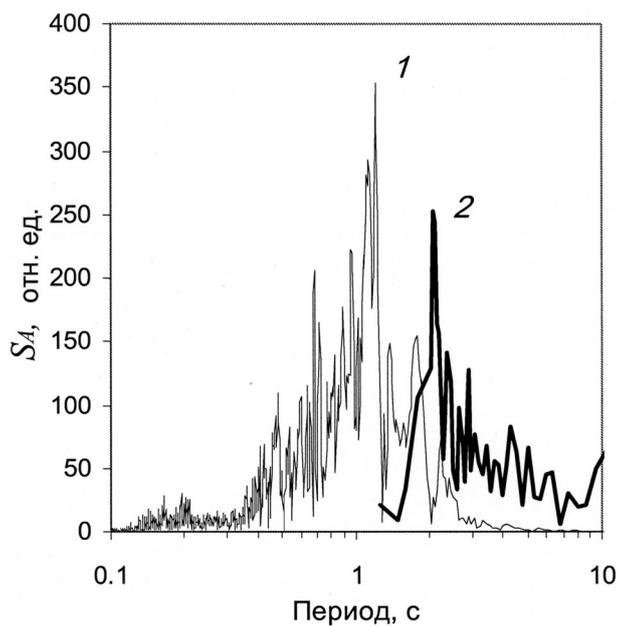


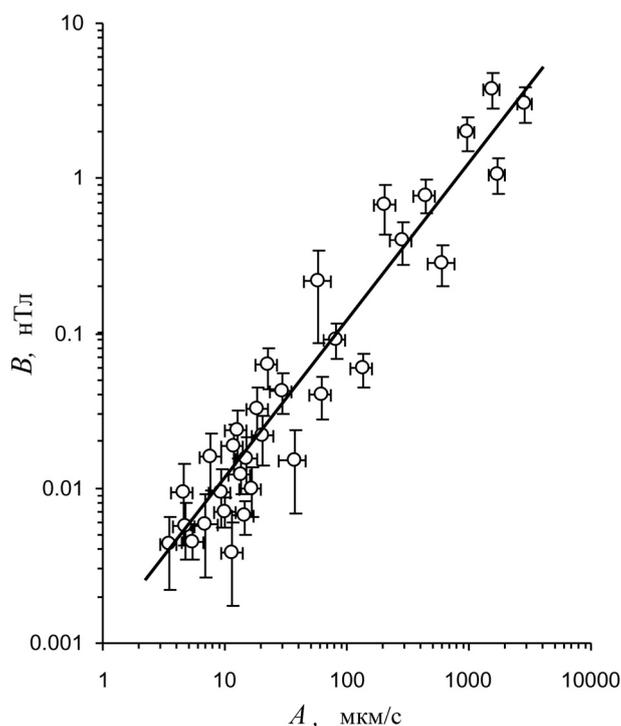
Рис. 4. Амплитудные спектры сейсмического воздействия (1) и вариаций геомагнитного поля (2) для данных, приведенных на рис. 1.

Анализ результатов инструментальных наблюдений свидетельствует о значительных отличиях в спектральных характеристиках сейсмического воздействия и наведенных вариаций геомагнитного поля. В качестве иллюстрации на рис. 4 представлены амплитудные спектры сигналов, приведенных на рис. 1. Видно, что характерные частоты наведенных геомагнитных вариаций существенно ниже

характерных частот воздействующего сейсмического возмущения. Это можно рассматривать в качестве дополнительного подтверждения отсутствия сейсмической помехи при измерениях с помощью датчиков МИН.

Для целей установления механизма генерации магнитного сигнала и разработки основ диагностики разломных зон на основе регистрации геофизических полей основной интерес представляет связь между интенсивностью сейсмического возмущения и амплитудой вызванного магнитного сигнала. Анализ показывает, что указанная связь, которую можно характеризовать зависимостью между максимальными значениями модуля полного вектора сейсмических колебаний A и модуля полного вектора индукции геомагнитных вариаций B , достаточно сложная. Это связано с «мерцательным» характером вызванных геомагнитных вариаций. При слабых сейсмических возмущениях (с амплитудами менее примерно 10–20 мкм/с) амплитуда генерируемого магнитного сигнала нестабильна: эффект геомагнитных аномалий фактически наблюдается примерно в 50% случаях. Тем не менее, можно получить зависимость $B(A)$ для случаев, когда геомагнитная аномалия устойчиво регистрируется.

Рис. 5. Зависимость максимального модуля полного вектора наведенной геомагнитной индукции от модуля полного вектора сейсмического сигнала; сплошная линия – расчет по формуле (1)



На рис. 5 приведена обобщенная зависимость $B(A)$, объединяющая результаты всех экспериментов. Видно, что при сейсмических воздействиях с амплитудой, превышающей примерно 4 мкм/с экспериментальные данные, полученные в разных условиях (скальные породы горного массива Мурунтау и осадочный чехол Центральной части Восточно-Европейской платформы), хорошо группируются вокруг единой зависимости. Статистическая обработка данных свидетельствует о значи-

мой корреляции между величинами B и A (показатель Дарбина–Уотсона составляет величину 0,88), а зависимость имеет вид:

$$B = 10^{-3} A^{1,025} \text{ нТл}, \quad (1)$$

где A выражено в мкм/с.

Длительность вызванной геомагнитной аномалии зависит от конкретных свойств массива и слагающих его горных пород. Так для разломной зоны в скальном массиве Мурунтау длительность геомагнитной аномалии может достигать 5–10 мин при длительности сейсмического воздействия порядка 10 с (рис. 2). Напротив, длительность геомагнитной аномалии, зарегистрированной в зоне НРТС, практически совпадает с длительностью сейсмического сигнала (рис. 1) и составляет величину 10–50 с.

Одна из возможных причин отмеченного эффекта может быть связана с отличием времен релаксации токовых систем в сухом массиве скальных горных пород блочного строения и в достаточно рыхлом осадочном чехле. Вполне естественно предполагать, что проводимость в достаточно сухой скальной породе, разделенной поверхностями слабо контактирующих блоков, существенно ниже проводимости увлажненных пород осадочного чехла Приокского участка НРТС¹.

В качестве другой причины следует рассматривать тот факт, что в отличие от района НРТС в окрестности мощной неоднородности массива Мурунтау (глубина карьера «Мурунтау» достигает 300 м) возможно перераспределение действующих в среде напряжений при достаточно сильном сейсмическом воздействии.

Заключение

В заключение следует отметить, что полученные результаты не претендуют на общность. Однако, по мнению авторов, могут представлять интерес в качестве количественной основы для построения моделей генерации геомагнитных аномалий в зонах тектонических структур при сейсмических воздействиях, а также – разработки новых подходов к установлению конкретных механизмов разделения электрических зарядов и нарушения естественных токовых систем в земной коре, в том числе в условиях внешних возмущений.

Исследования выполнены по Программе 7 Отделения наук о Земле РАН «Внутреннее строение и физические поля Земли. Динамика взаимодействующих геосфер» при финансовой поддержке РФФИ (гранты 09-05-00614-а и 11-05-00096-а).

Литература

Адушкин В.В., Спивак А.А., Кишкина С.Б., Локтев Д.Н., Соловьев С.П. Динамические процессы в системе взаимодействующих геосфер на границе земная кора–атмосфера // Физика Земли. 2006. №7. С. 34–51.

Анисимов С.В., Гохберг М.Б., Иванов Е.А. и др. Короткопериодные колебания электромагнитного поля земли при промышленном взрыве // Доклады академии наук. 1985. Т. 281. № 3. С. 556–559.

¹ Этим объясняется и более высокая частота наведенных сейсмикой геомагнитных вариаций в разломных зонах НРТС по сравнению с массивом горных пород Мурунтау.

- Гончаров А.И., Соловьев С.П.* Ударная электрическая поляризация материалов // Физика горения и взрыва. 2004. Т. 40. № 6. С. 52–57.
- Гохберг М.Б., Гуфельд И.Л., Козырева О.В. и др.* Электромагнитное излучение горной среды в условиях взрывного нагружения // Доклады академии наук. 1987. Т. 295. № 2. С. 321–325.
- Гульельми А.В., Левшенко В.Т.* Электромагнитные сигналы от землетрясений // Физика Земли. 1994. № 5. С. 65–70.
- Гульельми А.В.* Инерционные эффекты в коре и в магнитосфере Земли // Физика земли. 2008. № 1. С. 50–56.
- Иванов А.Г.* Сейсмоэлектрический эффект второго рода // Изв. АН СССР. Сер. географ. и геоф. 1940. № 5. С. 699–727.
- Мигунов Н.И., Соболев Г.А.* О сейсмомагнитных сигналах при землетрясениях Сахалина // Физика земли. 2006. № 3. С. 81–84.
- Назарный С.А., Комаров В.А.* Вызванная сейсмоэлектрическая поляризация. Изд-во С.-Петербур. ун-та, 2001. 144 с.
- Пархоменко Э.И.* Явления электризации в горных породах. М.: Наука, 1968. 255 с.
- Соболев Г.А., Демин В.М.* Механоэлектрические явления в земле. М.: Наука, 1980. 215 с.
- Соловьев С.П., Стивак А.А.* Электромагнитные сигналы в результате электрической поляризации при стесненном деформировании горных пород // Физика Земли. № 4. 2009. С. 76–84.
- Стивак А.А., Локтев Д.Н., Соловьев С.П.* Организация оперативной регистрации геофизических полей с помощью мобильных комплексов // Динамические процессы в системе внутренних и внешних взаимодействующих геосфер: сб. научн. труд. ИДГ РАН. М.: ГЕОС, 2005. С. 46–53.
- Стивак А.А.* Особенности геофизических полей в разломных зонах // Физика Земли. 2010. № 4. С. 55–66.
- Eleman F.* The response of magnetic instruments to earthquake waves // J. Geomag. Geoelectr. 1965. Vol. 18. No. 1. P. 43–72.
- Sgrigna V., Buzzi A., Conti L. et al.* Electromagnetic signals produced by elastic waves in the Earth's crust // Nuovo Cimento. 2004. Vol. 27. No. 2. P. 115–132.
- Soloviev S.P., Sweeney J.J.* Generation of electric and magnetic field during detonation of high explosive charge in boreholes // J. geophys. res. 2005. Vol. 110. No. B01312/ doi: 10.1029/2004JB003223.