

ОСОБЕННОСТИ СЕЙСМОМАГНИТНОГО ЭФФЕКТА В ЗОНЕ ВЛИЯНИЯ РАЗЛОМА

Г.Н. Иванченко, Б.Г. Лукишов, А.А. Спивак, В.А. Харламов

Приводятся результаты синхронных инструментальных наблюдений за геомагнитными вариациями, вызванными распространением сейсмических волн через тектонический разлом. Получены зависимости сейсмоманнитного эффекта от амплитуды сейсмического сигнала. Впервые показано, что амплитуда сейсмоманнитного эффекта максимальна в зоне влияния разлома и уменьшается экспоненциально с расстоянием до его серединной линии.

Введение

Разломные зоны земной коры оказывают существенное влияние на формирование режимов геофизических полей в приповерхностном слое атмосферы Земли [Адушкин, Спивак, 2012; Спивак, 2010] в том числе при внешних воздействиях, связанных с приливной деформацией [Адушкин и др., 2012], барическими вариациями в атмосфере [Локтев, Спивак, 2008] и распространением сейсмических волн [Гохберг и др., 1987; Гершензон и др., 1993; Гульельми и др., 1996; Лукишов и др., 2012]. Инструментальные наблюдения свидетельствуют также о повышенной интенсивности геодинамических процессов в зонах влияния тектонических разломов,

а также процессов, связанных с взаимодействием и преобразованием геофизических полей [Адушкин и др., 2006].

Исследование вариаций геофизических полей в зонах тектонических нарушений (а, следовательно, зонах повышенной деформируемости твердой среды) представляет значительный интерес при решении фундаментальных задач, связанных с установлением механизмов межгеосферных взаимодействий, преобразованием энергии физических полей разной природы, а также с постоянно возрастающим интересом к совершенствованию имеющихся и разработке новых перспективных методов диагностики геодинамического состояния земной коры.

Повышение чувствительности методов геодинамического контроля локальных участков земной коры и достоверности картирования наиболее опасных (с точки зрения потери механической устойчивости зон) востребовано при выборе и обосновании площадок под строительство особо ответственных сооружений и объектов повышенного риска (АЭС, трубопроводный транспорт, крупные гидроузлы и т.д.), а также обеспечении их долговременной безопасной эксплуатации. Одновременно с этим совершенствование методов диагностики массивов горных пород необходимо проводить в целях контроля и предотвращения катастрофических последствий природных явлений и процессов (склоновые явления, обрушение карстовых пустот и т.д.).

Результаты инструментальных наблюдений, выполненных в ИДГ РАН в течение последних 8 лет, свидетельствуют о том, что расширение возможностей геодинамического контроля локальных участков земной коры и, в частности, интенсивности деформационных процессов в разломных зонах связано с необходимостью привлечения анализа временных и пространственных вариаций геофизических полей (например, электрического и магнитного) на приповерхностных участках земной коры и в приземном слое атмосферы [Адушкин и др., 2011].

Одним из наиболее перспективных является подход, основанный на оценке отклика геофизических полей на слабые внешние возмущения, и, особенно, в зонах влияния тектонических структур, в которых процессы, связанные с взаимодействием и преобразованием геофизических полей, проявляются более ярко [Гульельми, 2002; Спивак, 2010]. При этом весьма важной является информация о степени локализации и размерах зоны влияния тектонического разлома на указанные процессы.

Нас заинтересовал известный сейсмамагнитный эффект, проявляющийся возникновением геомагнитных вариаций при распространении сейсмических волн [Гульельми, 1986а, 1986б; Eleman, 1965]. Известны механизмы этого явления: инерционный, индукционный и деформационный, в зависимости от того, какой элемент движения среды является определяющим – ускорение, скорость или смещение [Гульельми, Рубан, 1990; Гульельми, 1995 и др.]. Сейсмамагнитный сигнал может возникать в результате пьезомагнитного эффекта, возбуждения роста микротрещин, а также вследствие магнитостатических колебаний локальных геомагнитных аномалий среды в поле сейсмических волн либо колебаний проводящих элементов среды в магнитном поле геодинамо [Анисимов и др., 1985; Горбачев, Сурков, 1987; Гульельми, Рубан, 1990; Гульельми и др., 1996].

При большом объеме выполненных исследований вопросы, связанные с установлением количественного соотношения между амплитудой сейсмического сигнала и амплитудой геомагнитных вариаций, а также влиянием разломной зоны на величину эффекта, детально не рассматривались.

В настоящей работе анализируется роль и влияние разломной зоны на пространственное распределение геомагнитных вариаций в приземном слое атмосферы, вызванных распространением сейсмических волн разного происхождения.

Объект исследований и содержание наблюдений

Влияние разломной зоны на пространственные характеристики процесса преобразования энергии сейсмических колебаний в энергию геомагнитных вариаций исследовалось в настоящей работе в одном из районов центральной части Восточно-Европейской платформы, расположенном в северной части Тульской области РФ. В качестве объекта исследований был выбран один из разломов, оперяющий Приокскую разломную зону на Тарусо-Алексинском участке и проявляющийся на поверхности в виде хорошо выраженного линеамента, пересекающего субмеридиональный участок долинного комплекса р. Оки (рис. 1). Линеамент трассируется по правому и левому притокам р. Оки, которые имеют выраженный бухтообразный поперечный профиль и невыработанный продольный профиль равновесия. На дне флювиальных форм отмечен выход коренных нижнекарбоновых известняков тарусской свиты, что связано с интенсивной глубинной эрозией. Эти морфологические

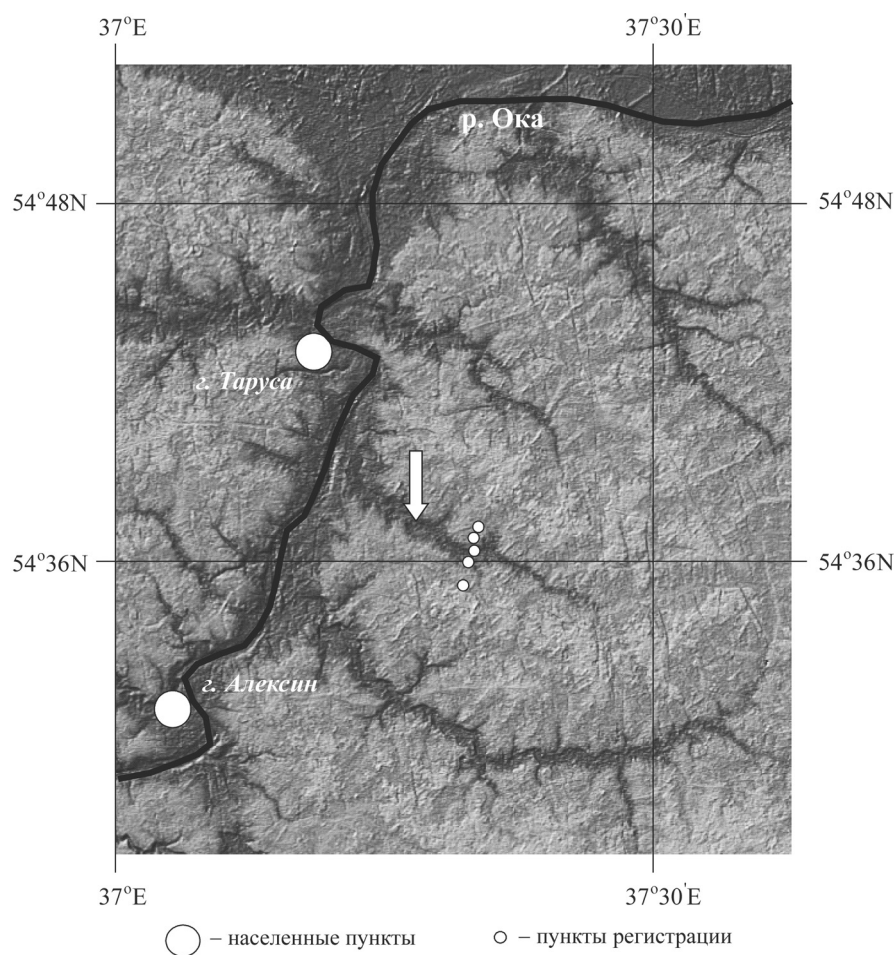


Рис. 1. Схема линеаментов района проведения инструментальных наблюдений с указанием профиля регистрации геофизических полей.
Стрелкой обозначена исследуемая тектоническая структура

признаки свидетельствуют о заложении рассматриваемой линеamentной формы в новейшее время и, следовательно, о ее возможной неотектонической активности. По нашим оценкам, выполненным с использованием подхода, изложенного в работе [Кузьмин, 2004], ширина разломной зоны составляет около 500 м.

Трехкомпонентная сейсмическая регистрация выполнялась в диапазоне частот 0,5–40 Гц с помощью сейсмометров СМ-3КВ-Э, работающих в режиме велосиметра. Измерение геомагнитных вариаций выполнялись в сейсмическом диапазоне частот с помощью магнитометра G-856 (GEOMETRICS) и тремя магнитометрами индукционного типа МИН-ВЧ-002. Регистрация получаемой информации выполнялась с помощью программируемых регистраторов REFTEK-130 и «Дельта-Геон-023». Более подробно методика проведения инструментальных наблюдений описана в работе [Лукишов и др., 2012].

Сейсмическая регистрация и регистрация геомагнитных вариаций выполнялись вдоль профиля, пересекающего линеamentную форму (рис. 1), на разных расстояниях R от ее срединной линии в летний период 2012 г. при стабильных метеоусловиях и отсутствии заметных ветровых проявлений. Анализировались геомагнитные вариации, вызванные сейсмическими сигналами от взрывов на карьерах Московской и Тульской областей и от местных событий релаксационного типа [Адушкин и др., 2006; Куликов и др., 2008; Спивак, Кишкина, 2004].

Результаты инструментальных наблюдений

Синхронная регистрация показала, что распространение сейсмического сигнала через разломную зону вызывает вариацию геомагнитного поля. Выбор участков записей, содержащих сейсмический сигнал и вариации геомагнитного поля, осуществлялся следующим образом. На первом этапе выполнялась подготовка цифровых данных для дальнейшего анализа. Для приведения в эквидистантный вид и восстановления данных («сглаживание») пропусков и выбросов в исходных временных рядах) привлекались методы, основанные на использовании ряда Котельникова [Загоруйко, 1972], методы дискретного преобразования Фурье [Росси́ев, 1998] и сплайн-интерполяции программного пакета MatLab.

На втором этапе с использованием метода STA/LTA выполнялась выборка участков записей, содержащих по отдельности сейсмические и геомагнитные вариации с амплитудой, в 2,5 раза превышающей фоновую. Для анализа выбирались участки записи, содержащие одновременно сейсмическое событие и геомагнитные вариации (таких участков за время выполнения наблюдений было выделено 48).

Пример синхронной записи сейсмического сигнала и вызванных геомагнитных вариаций представлен на рис. 2. Детальный анализ синхронных вариаций сейсмического и геомагнитного полей свидетельствует о том, что рассматриваемый эффект связан с группой поверхностных волн (это хорошо видно из рис. 2) и имеет выраженный локальный характер, поскольку предвестник геомагнитных вариаций в экспериментах не наблюдается. Последнее может быть связано с сильным пространственным затуханием электромагнитного сигнала в отличие от сейсмического.

Сравнительный анализ данных демонстрирует также существенное отличие в спектрах сейсмических сигналов и геомагнитных вариаций. Если характерная частота сейсмических сигналов находится в диапазоне 0,7–1 Гц, то характерная частота геомагнитных вариаций составляет величину 0,5 Гц и менее.

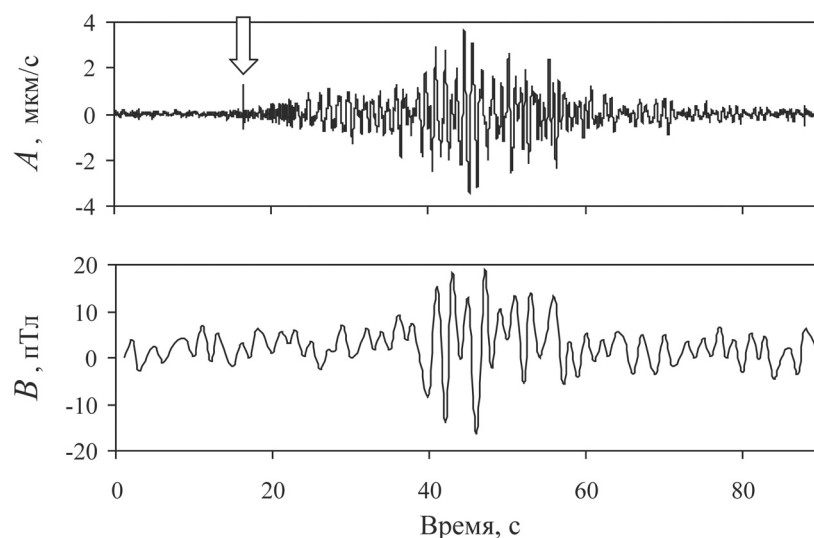


Рис. 2. Пример синхронных вариаций полного вектора геомагнитного поля B за вычетом тренда и вертикальной компоненты сейсмического сигнала A от массового карьерного взрыва (вертикальной стрелкой обозначен приход P -волны)

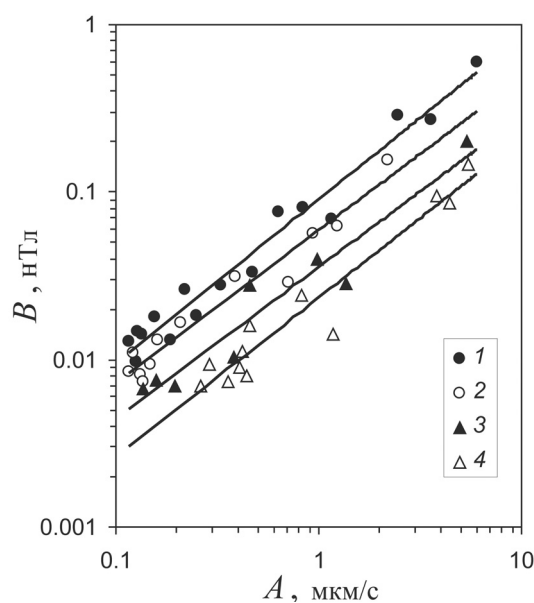


Рис. 3. Соотношение между максимальными среднеквадратичными амплитудами сейсмического сигнала A и вызванных геомагнитных вариаций B ; расстояние от срединной линии разлома, км: 1 – 0,1; 2 – 0,625; 3 – 1,109; 4 – 1,156

Анализ полученных данных показал, что зависимость между максимальными значениями модуля полного вектора¹ сейсмических импульсных колебаний A и модулем полного вектора геомагнитных вариаций B близка к линейной (величины A

¹ В связи с тем, что сейсмические сигналы распространялись вдоль разных азимутов и под разными углами выхода на свободную поверхность в точках регистрации зависимости между отдельными компонентами рассматриваемых геофизических полей не анализировались.

и B вычислялись относительно тренда). На рис. 3 представлены результаты измерений в виде зависимости $B(A)$, которая представима в виде:

$$B = 0,09A^{0,97} \text{ нТл, для } R = 0,1 \text{ км,}$$

$$B = 0,06A^{0,91} \text{ нТл, для } R = 0,625 \text{ км,}$$

$$B = 0,036A^{0,9} \text{ нТл, для } R = 1,109 \text{ км,}$$

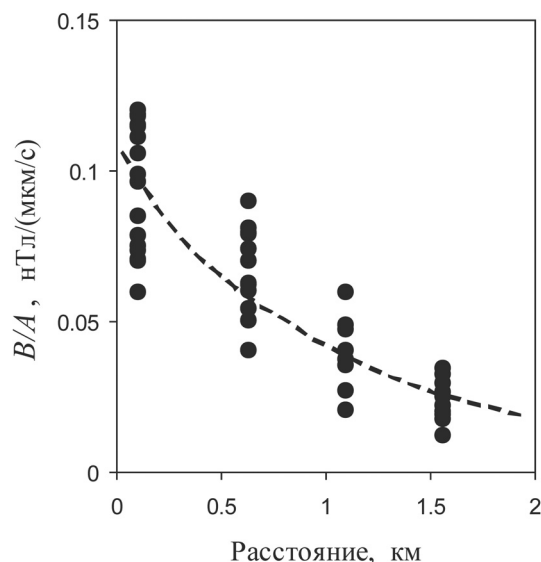
$$B = 0,023A^{0,95} \text{ нТл, для } R = 1,156 \text{ км,}$$

где A выражена в мкм/с.

Из данных рис. 3 также следует, что по мере удаления от разлома величина геомагнитных вариаций при сходных по величине амплитудах сейсмического сигнала уменьшается. Из этого следует, что преобразование энергии механических колебаний в энергию геомагнитных вариаций происходит более интенсивно в самом разломе и в зоне его влияния. Это может быть связано с более сложной по сравнению с окружающей средой внутренней структурой разломной зоны, а также ее особой флюидодинамикой. Но этот вопрос требует проведения дальнейших исследований.

С целью группирования данных и в связи с отсутствием выполнения многоточечных синхронных наблюдений одновременно на разных расстояниях от разлома, в качестве параметра, характеризующего сейсмомагнитный эффект, в настоящей работе анализировался параметр $B_0 = \frac{B}{A}(R)$, где R – кратчайшее расстояние от точки наблюдений до центральной части разломной зоны.

Рис. 4. Относительные геомагнитные вариации, вызванные сейсмическим сигналом в зависимости от расстояния до серединной линии разломной зоны



Полученные в ходе эксперимента значения параметра B_0 приведены на рис. 4 в зависимости от расстояния до центральной части разломной зоны. Данные рис. 4 свидетельствуют о том, что интенсивность сейсмомагнитного эффекта максимальна в окрестности серединного участка разломной зоны и заметно уменьшается по мере удаления от разлома.

Заключение

Полученные данные в очередной раз подтверждают неоднократно высказанное ранее мнение о разломах как особых зонах земной коры, внутренняя структура которых и особенности поведения материала-заполнителя определяют не только интегральные механические свойства локальных участков земной коры, но также сложные процессы, связанные с преобразованием и взаимодействием геофизических полей [Ребецкий, 2008; Кочарян и др., 2011; Спивак, Цветков, 2009; Спивак, 2010; Шерман, 2012]. Роль разломных зон в преобразовании энергии между геофизическими полями разной природы значительна, что открывает новые возможности для картирования активных разломов и оценки величины возможных дифференциальных смещений в среде на основе анализа особенностей пространственных и временных вариаций геофизических полей.

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ (грант 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.

Адушкин В.В., Спивак А.А., Локтев Д.Н., Соловьев С.П., В.А. Харламов. Инструментальные наблюдения за геофизическими полями Тункинской рифтовой зоны // *Межгеосферные взаимодействия: материалы семинара-совещания, 26-27 сентября 2011 г.*, Москва. М.: ГЕОС, 2011. С. 27–42.

Адушкин В.В., Спивак А.А. Приповерхностная геофизика: комплексные исследования литосферно-атмосферных взаимодействий в окружающей среде // *Физика Земли*. 2012. № 3. С. 3–21.

Адушкин В.В., Спивак А.А., В.А. Харламов. Влияние лунно-солнечного прилива на вариации геофизических полей на границе земная кора-атмосфера // *Физика Земли*. 2012. № 2. С. 14–26.

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

Гершензон Н.И., Гохберг М.Б., Гульельми А.В. Электромагнитное поле сейсмического импульса // *Физика Земли*. 1993. № 9. С. 48–52.

Горбачев Л.П., Сурков В.В. Возмущение внешнего магнитного поля поверхностной волной Релея // *Магнитная гидродинамика*. 1987. № 2. С. 2–12.

Гохберг М.Б., Гуфельд И.Л., Козырева О.В., и др. Электромагнитное излучение горной среды в условиях взрывного нагружения // *ДАН*. 1987. Т. 295. № 2. С. 321–325.

Гульельми А.В. Магнитоупругие волны // *Физика земли*. 1986а. № 7. С. 110–121.

Гульельми А.В. Возбуждение колебаний электромагнитного поля упругими волнами в проводящем теле // *Геомагнетизм и аэрономия*. 1986б, Т. 26. № 3. С. 467–470.

Гульельми А.В., Левшенко В.Т., Похотелов Д.О. Сравнительный анализ динамических и квазистатических механизмов генерации сейсмамагнитных сигналов // *Физика Земли*. 1996. № 8. С. 18–25.

Гульельми А.В. О пороговых явлениях в геоэлектрике // *Физика Земли*. 2002. № 4. С. 75–77.

Загоруйко Н.Г. Методы распознавания и их применение. М.: Сов. радио, 1972. 216 с.

Кочарян Г.Г., Остапчук А.А., Марков В.К. Изменение жесткости контакта между блоками горной породы в ходе прерывистого скольжения // *Динамические процессы в геосферах*. Вып. 2: сб. научн. тр. ИДГ РАН. М.: ГЕОС, 2011. С. 40–49.

Кузьмин Ю.О. Современная геодинамика разломных зон // *Физика Земли*. 2004. № 10. С. 95–111.

Куликов В.И., Санина И.А., Гончаров А.И. и др. Особенности распространения сейсмических волн от карьерных взрывов на Русской платформе // *Локальные и глобальные проявления воздействий на геосферы: сб. научн. тр. ИДГ РАН. М.: ГЕОС, 2008. С. 89–97.*

Локтев Д.Н., Спивак А.А. Вариации высокочастотной составляющей микросейсмического фона при барических возмущениях атмосферы // *ДАН*. 2008. Т. 418. № 3. С. 387–390.

Лукишов Б.Г. Спивак А.А., Тер-Семенов А.А. Вариации геомагнитного поля при распространении сейсмических волн через разлом // *ДАН*. 2012. Т. 442. № 2. С. 259–262.

Ребецкий Ю.Л. Разломы как особое геологическое тело. Модель развития крупномасштабного хрупкого разрушения // *Дегазация Земли: геодинамика, геофлюиды, нефть, газ и их прагенезы*. М.: ГЕОС, 2008. С. 418–420.

Россигов А.А. Моделирование данных при помощи кривых для восстановления пробелов в данных // *Методы нейроинформатики* / Под ред. А.Н. Горбаня. КГТУ: Красноярск, 1998. С. 6–22.

Спивак А.А., Кишкина С.Б. Исследование микросейсмического фона с целью определения активных тектонических структур и геодинамических характеристик среды // *Физика Земли*. 2004. № 7. С. 35–49.

Спивак А.А., Цветков В.М. Новая модель зональной структуры разломов // *ДАН*. 2009. Т. 424. № 3. С. 398–401.

Спивак А.А. Особенности геофизических полей в разломных зонах // *Физика Земли*. 2010. № 4. С. 55–66.

Шерман В.Н. Деструкция литосферы: состояние проблемы, современные представления о разломно-блоковой делимости и ее короткопериодной активизации // *Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле*. Т. 1. М.: ИФЗ РАН, 2012. С. 123–129.

Eleman F. The response of magnetic instruments to earthquake waves // *J. Geomag. Geoelectr.* 1965. Vol. 18. No. 1. P. 43–72.