

ДИПОЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ГЕНЕРАЦИИ ИМПУЛЬСНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ В ЗЕМНОЙ КОРЕ

Т.В. Лосева, А.А. Спивак, М.Ю. Кузьмичева

Разработана новая численная модель генерации электрических импульсов в земной коре системой электрических диполей, равномерно распределенных по активной поверхности релаксирующего структурного блока при его стесненном повороте. Электрические моменты диполей изменяются со временем в соответствии с амплитудой дифференциальных движений. Показано, что амплитуды электрических импульсов и степень их затухания с расстоянием до источника соответствуют данным инструментальных наблюдений.

Введение

Исследование электромагнитных эффектов на приповерхностных участках земной коры вызывает особый интерес как с точки зрения установления режимов физических процессов, протекающих в массивах горных пород при их деформировании, так и при оценке граничных условий взаимодействия внешних и внутренних оболочек Земли [Адушкин и др., 2006]. При этом наиболее важной задачей является установление механизмов генерации электрических сигналов.

В разработанных ранее моделях генерации электромагнитных импульсов [Соловьев, Спивак, 2009; Лосева и др., 2009, 2010] предполагалось, что источником является активная поверхность релаксирующего блока земной коры, на которой происходит разделение электрических зарядов. При этом в работах [Соловьев, Спивак, 2008, 2009] в качестве источника электрического сигнала рассматривается электрический диполь, который формируется в результате стесненного поворота (квазистатика). Известны также работы, связанные с установлением механизма генерации электрических и магнитных импульсов в сухих горных породах в виде электрических излучающих диполей при нагружении образцов пород и их разрушении [Frid et al., 2003; Chen, Huang, 2010; O'Keef, Thiel, 1995; Triantis et al., 2008].

Модель, предложенная в работах [Лосева и др., 2009, 2010], предполагает динамическое развитие источника электромагнитных сигналов в виде изменяющейся во времени и распределенной по активной поверхности блока токовой системы, формирующейся в результате активизации активного межблокового промежутка. Решение полной системы уравнений Максвелла сводилось в этом случае к решению уравнения диффузии для векторного потенциала, что ограничивало область применимости полученного решения.

В настоящей работе рассматривается новая нестационарная модель генерации электрических импульсов в земной коре блочного строения, в основе которой лежит система электрических диполей, равномерно распределенных по активной поверхности релаксирующего структурного блока при его стесненном повороте. Электрические моменты диполей изменяются со временем в соответствии с амплитудой дифференциальных движений.

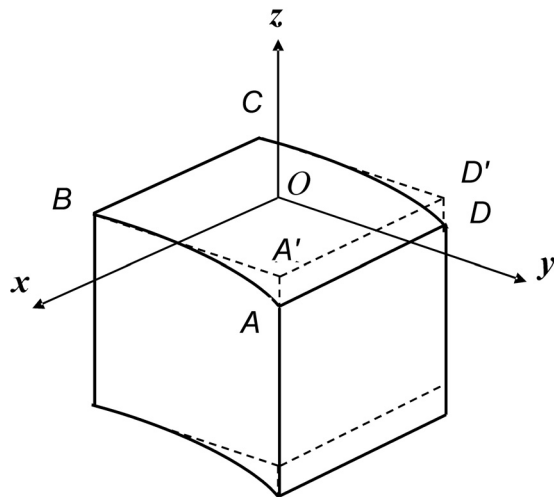
Особенности деформирования активного межблокового промежутка при стесненном повороте релаксирующего блока

Фундаментальным свойством земной коры является ее блочно-иерархическое строение. Деформационные процессы, протекающие в такой среде в течение геологического периода времени под влиянием разного рода воздействий, определяют конкретную конфигурацию и ориентацию граней структурных блоков в пространстве. Эти же процессы формируют в блочной среде сложное поле действующих сил и их моментов. Наблюдаемые современные движения блоков разного масштаба свидетельствуют о статической неуравновешенности действующих сил.

Деформирование блочной среды в стесненных условиях означает наличие детерминированных условий на перемещение границ отдельных блоков (например, запрет на увеличение объема блока) либо зависимости граничных условий от величины смещения границ. Характерной особенностью стесненной деформации блоковой структуры является неоднородность сдвиговых деформаций.

В качестве активных в данном случае рассматриваются блоки, которые при сложившихся условиях получают возможность для быстрого (скачкообразного) деформирования, сопровождающегося частичным или полным высвобождением запасенной упругой энергии.

Рис. 1. Схема стесненного поворота структурного блока.
Сплошная – начальное (нагруженное) состояние; пунктир – форма блока после разгрузки; $ABCD$ – активная грань блока.



Для получения количественных соотношений выделим из среды активный блок, начальная деформация которого соответствует стесненному повороту (рис. 1). Упрощая задачу, будем рассматривать блок в виде куба с размером грани L . Разгрузка активного блока в процессе релаксации накопленных напряжений вызывает смещение каждой точки активной поверхности $ABCD$ на величину Δz вдоль оси z :

$$\Delta z(x, y, t) = \frac{2\gamma}{L} \left\{ y + \frac{L}{2} \right\}^2 \Psi(t), \left(-\frac{L}{2} \leq x \leq \frac{L}{2}; -\frac{L}{2} \leq y \leq \frac{L}{2} \right), \quad (1)$$

где x, y, z – декартовы координаты с началом в центре активной грани, γ – средняя по объему деформация блока в результате релаксации, $\Psi(t)$ – нормированная

функция времени, которую можно принять в виде сейсмического импульса, который сопровождается релаксацией [Спивак, Кишкина, 2004]:

$$\Psi(t) = Bt \exp\{-bt\} \sin(\omega t), \quad (2)$$

где ω – циклическая частота, B и b – нормировочные коэффициенты.

Время сброса напряжений T , которое определяет период порождаемого сигнала, связано с размером активного блока как [Кочарян, Спивак, 2003]:

$$T = \pi L \sqrt{\frac{\rho}{\alpha G}},$$

где ρ и G – соответственно плотность и упругий модуль горной породы; α – коэффициент, определяющий долю сейсмической энергии.

В этом случае скорость деформирования области, в которой генерируются электрические сигналы, составляет

$$e = \frac{\Delta z_{\max}}{\pi L} \sqrt{\frac{\alpha G}{\rho}} \sim \frac{1}{L}. \quad (3)$$

Хорошо известно, что деформационные и прочностные характеристики межблоковых промежутков определяются рангом структурного нарушения (фактически размером блока L). Причем с ростом L жесткость k межблокового промежутка падает [Спивак, 2011]:

$$k \sim \frac{1}{L^{0.5}}. \quad (4)$$

В первом приближении можно полагать, что величина критической деформации блока ε_* , при которой наступает сброс напряжений, аналогичным образом зависит от размера блока, и тогда:

$$\Delta z_{\max} \approx \varepsilon_* L \sim L^{0.5}. \quad (5)$$

Источник электромагнитных сигналов

В качестве источника электромагнитных сигналов в среде, окружающей активный блок, выберем систему точечных излучающих электрических диполей, равномерно расположенных на активной грани блока и ориентированных вдоль оси z (рис. 2). Примем, что электрический дипольный момент каждого из диполей $p(t, x, y)$ изменяется со временем в соответствии с амплитудой скорости смещения той точки, в которой он расположен (в соответствии с зависимостью (1)).

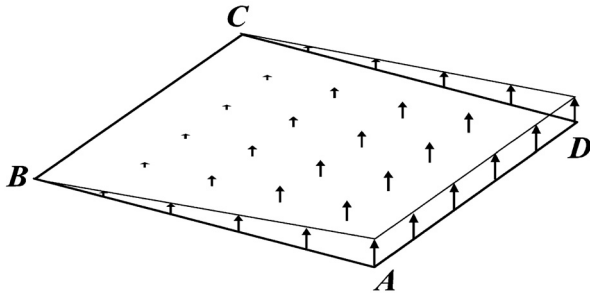


Рис. 2. Схема расположения электрических диполей на активной грани релаксирующего блока. Стрелками обозначены ориентированные в пространстве точечные диполи.

Для описания процессов распространения электромагнитного сигнала в горных породах воспользуемся системой уравнений Максвелла:

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \mathbf{H} &= \mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}, \operatorname{div} \mathbf{B} = 0, \mathbf{B} = \mu_0 \mu \mathbf{H}, \\ \operatorname{rot} \mathbf{E} &= -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \mathbf{D} = \varepsilon_0 \varepsilon \mathbf{E}, \end{aligned} \quad (6)$$

$$\mathbf{j} = \mathbf{j}_\sigma + \mathbf{j}_0, \mathbf{j}_\sigma = \sigma \mathbf{E}.$$

Здесь: $\mathbf{E}$ – вектор напряженности электрического поля, $\mathbf{B}$ – вектор магнитной индукции, $\mathbf{j}_0$ – плотность стороннего тока, вызванного механическими процессами в разломе, σ – удельная электрическая проводимость среды, ε_0 и μ_0 – электрическая и магнитная постоянные, ε – относительная диэлектрическая, а μ – относительная магнитная проницаемости среды. Переходя к магнитному векторному потенциалу $\mathbf{A}$ ($\operatorname{rot} \mathbf{A} = \mathbf{B}$) и считая, что $\mu = 1$, получаем систему уравнений:

$$\mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t}, \quad (7)$$

$$\varepsilon_0 \mu_0 \mu \frac{\partial}{\partial t} \left(\varepsilon \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \right) + \mu_0 \sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \Delta \mathbf{A} = \mu_0 \mu \mathbf{j}_0. \quad (8)$$

Система уравнений (6)–(8) решалась численно в 3D геометрии с помощью метода векторных конечных элементов на неравномерной тетраэдральной сетке. Метод позволяет учитывать описанную выше геометрию деформирования активной грани блока и заданное распределение величин σ и ε в среде.

Расчетная область размером $50 \times 50 \times 100$ км состояла из двух равных по высоте подобластей. Электрические характеристики верхней подобласти соответствовали параметрам воздуха с $\sigma = 10^{-14}$ См/м и $\varepsilon = 1$, а нижней, имитирующей твердую среду (земная кора), – граниту с $\sigma = 0,001$ См/м и $\varepsilon = 5$.

Активная область размером $L \times L \times \Delta z_{\max}$, расположенная на глубине h м от поверхности раздела сред, представлена материалом с $\sigma = 0,1$ См/м и $\varepsilon = 5$ (песок). На нижней грани активной области равномерно по всей ее площади располагались N точечных диполей с переменным моментом. Величина электрических зарядов выбиралась в соответствии с данными работы [Соловьев, Спивак, 2009]

Задача решалась в двух постановках: активная область расположена горизонтально (дипольные моменты ориентированы вертикально) и вертикально (дипольные моменты ориентированы горизонтально). Величины L , h , ω , $\Delta z_{\max}$, p_i ($i = 1, 2, 3, \dots, N$), а также коэффициент пропорциональности между максимальным дипольным моментом и $\Delta z_{\max}$ варьировались в широких пределах.

Результаты расчетов

Результаты расчета для случая вертикально расположенного активного межблочного промежутка приведены на рис. 3 в виде зависимости горизонтальной компоненты напряженности электрического поля E_H на поверхности раздела твердая среда–атмосфера от относительного расстояния R/L , где R – эпицентрального расстояние от активной поверхности. Представленные графики наглядно демонстрируют амплитуды электрических сигналов в разные моменты времени.

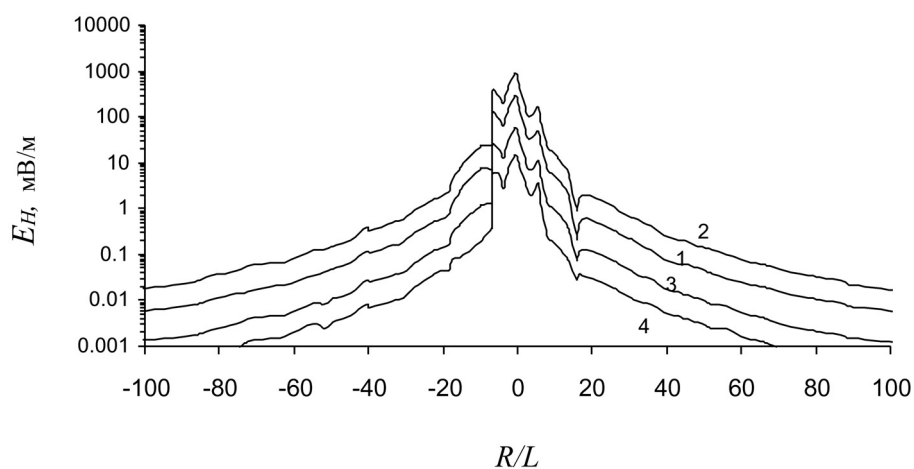


Рис. 3. Горизонтальная компонента напряженности электрического поля на земной поверхности в зависимости от относительного расстояния по горизонтали; время с начала движения блока, мс: 1 – 10; 2 – 30; 3 – 150; 4 – 170

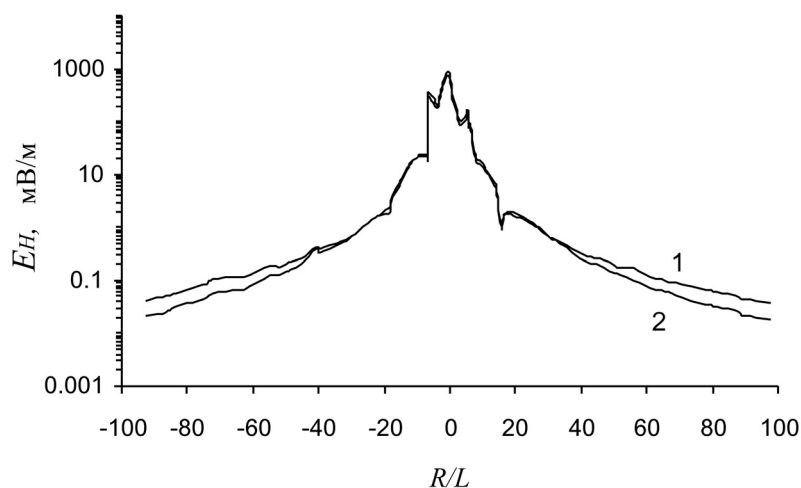


Рис. 4. Результаты расчета горизонтальной компонента напряженности электрического поля на земной поверхности для случаев полной (1) и «усеченной» системы диполей (2), представленной одним рядом диполей с максимальным дипольным моментом.

Расчет при $L = 100$ м, $h = 100$ м, $\omega = 5$ Гц, $N = 36$.

Значительный интерес представляет сравнение результатов вычислений с данными инструментальных наблюдений. Сложность этой процедуры связана с тем, что амплитуда электрического сигнала E зависит не только от расстояния до источника, но также от размеров активного блока L .

Расчеты показывают, что основной вклад в характеристики электрических импульсов вносят диполи с максимальным дипольным моментом, которые в соответствии с принятой схемой генерации сигналов располагаются в области максимальных смещений $\Delta z_{\max}$ (рис. 4). Количество таких диполей составляет примерно $\sqrt{N}$.

Полагая, что плотность распределения источников электрических сигналов (диполей) скорее всего величина постоянная, не зависящая от размера блока, допустимо принять:

$$N = nL^2. \quad (9)$$

В этом случае с учетом (3) и (5) получаем, что амплитуда электрического сигнала E должна зависеть от размера активного блока как:

$$E \sim L^{1.5}.$$

С учетом последнего соотношения получаем:

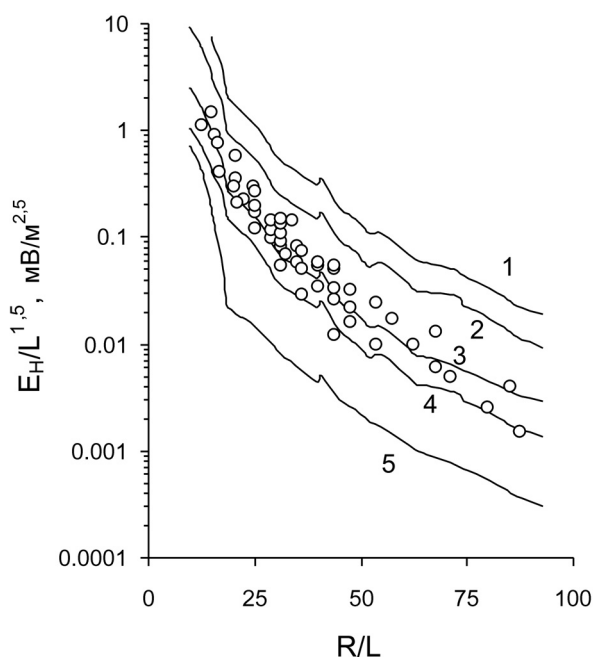
$$E = A_E L^{1.5} \left(\frac{R}{L} \right)^m, \quad (10)$$

где A_E – коэффициент, зависящий от параметров задачи, m – степень затухания сигнала.

На рис. 5 представлены совместно результаты вычислений, выполненных на основе предложенной модели генерации электрических сигналов, и данные регистрации электрических импульсов в грунте (вид представления данных определяется зависимостью (10)).

Рис. 5. Зависимость относительной максимальной напряженности горизонтальной компоненты электрического поля на земной поверхности в зависимости от эпицентрального расстояния.

Кружки – данные инструментальных наблюдений в зоне влияния Курайской тектонической структуры (Горный Алтай); результаты расчета при $L = 100$ м, $h = 100$ м, $\omega = 5$ Гц, $N = 36$; $\Delta z_{\max}$, м: $5 \cdot 10^{-3}$ (1); 10^{-3} (2); $5 \cdot 10^{-4}$ (3); 10^{-4} (4); $5 \cdot 10^{-5}$ (5).



Анализ приведенных на рис. 5 данных свидетельствует о том, что предложенная модель при соответствующем выборе ее параметров достаточно хорошо (по крайней мере, визуально) описывает результаты измерений. При этом, обращаясь к рис. 3, следует отметить, что значения напряженности электрического поля в источнике не противоречат известным оценкам [Назарный, Комаров, 2001; Соболев, Демин, 1980].

Заключение

Предложенная модель генерации электрических импульсов, в основу которой положена система точечных излучающих диполей с переменными во времени дипольными моментами, адекватно описывает результаты инструментальных наблюдений. Модель позволяет проводить сравнение разных участков земной коры по относительной величине параметров механического источника путем сравнения расчетных и экспериментальных данных.

Исследования выполнены по Программе 7 Отделения наук о Земле РАН «Внутреннее строение и физические поля Земли. Динамика взаимодействующих геосфер» и при финансовой поддержке РФФИ (грант 09-05-00614-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.
- Кочарян Г.Г., Спивак А.А. Динамика деформирования блочных массивов горных пород. М.: Академкнига, 2003. 423 с.
- Лосева Т.В., Кузьмичева М.Ю., Спивак А.А. Модель генерации электрических и магнитных импульсов при стесненном повороте структурных блоков земной коры // Проблемы взаимодействующих геосфер: сб. научных трудов ИДГ РАН. М.: ГЕОС, 2009. С. 250–259.
- Лосева Т.В., Кузьмичева М.Ю., Спивак А.А. Электрические и магнитные сигналы при стесненных движениях блоков земной коры // Доклады академии наук. 2010. Т. 432. № 5. С. 685–688.
- Назарный С.А., Комаров В.А. Вызванная сейсмоэлектрическая поляризация. Изд-во С.-Петербург. ун-та, 2001. 144 с.
- Соболев Г.А., Демин В.М. Механоэлектрические явления в земле. М.: Наука, 1980. 215 с.
- Соловьев С.П., Спивак А.А. Генерация электромагнитных импульсов при релаксационных процессах в земной коре // Геофизика межгеосферных взаимодействий: сб. научных трудов ИДГ РАН. М.: ГЕОС, 2008. С. 289–301.
- Соловьев С.П., Спивак А.А. Электромагнитные сигналы в результате электрической поляризации при стесненном деформировании горных пород // Физика Земли. 2009. 4. С. 76–84.
- Спивак А.А. Жесткость разломных зон по сейсмическим данным // Физика Земли. 2011 (в печати).
- Chen Z., Huang K. Using the oscillation dipoles model to study the electromagnetic radiation induced by fracture of rocks // Progress in Electromagnetic Research M. 2010. Vol. 14. P. 221–231.
- Frid V., Rabinovich A., Bahat D. Fracture induced electromagnetic radiation // J. Phys. D: Appl. Phys. 2003. Vol. 36. No. 13. P. 1620–1628.
- O'Keef S.G., Thiel D.V. A mechanism of the production of electromagnetic radiation during of brittle materials // Physics of the Earth and Planetary interiors. 1995. Vol. 89. No. 1-2. P. 127–135.
- Triantis D., Anastasiadis C., Stavrakas I. The correlation of electrical charge with strain on stress rock samples // Nat. Hazards earth Sci. 2008. Vol. 8. P. 1243–1248.