

Поляриметрия магнитного поля сейсмических источников

С. Л. Просвирнин

Радиоастрономический институт Национальной академии наук Украины
310002, г. Харьков, ул. Краснознаменная, 4
E-mail: prosvirnin@rian.kharkov.ua

Статья поступила в редакцию 15 июля 1998 г., после переработки 17 ноября 1998 г.

Показана целесообразность исследования поляризационных характеристик электромагнитной эмиссии сейсмических источников в диапазоне частот 2÷5 Гц в связи с проблемой прогноза землетрясений. Разработана методика исследований.

Показано доцільність дослідження поляризаційних характеристик електромагнітної емісії сейсмічних джерел в діапазоні частот 2÷5 Гц в зв'язку з проблемою прогнозу землетрусів. Запропоновано методіку досліджень.

Введение

В настоящее время существует общепринятая точка зрения в отношении причин возникновения землетрясений и предвещающих их явлений [1]. Землетрясения возникают в сейсмически активных зонах на сейсмогенных разломах, преимущественно там, где они уже неоднократно происходили ранее. Накапливающиеся литосферные напряжения в конечном итоге достигают некоторого предельного уровня и снимаются подвижкой по сейсмогенному разлому. Необходимым условием появления предвестников таких сдвигов является неоднородность земной коры, которая всегда имеет место в той или иной степени, и благодаря которой деформации и микротрещины появляются до сдвигового сейсмического разрыва. Эти деформации, предвещающие разрыв, и обуславливают возникновение предвестников. Каждый сейсмогенный разлом в той или иной степени уникален, и поэтому имеет характерные особенности как землетрясений, так и предвещающих их явлений.

Во время деформаций земной коры, предшествующих сейсмическому разрыву, происходят сейсмoeлектрические преобразования и наблюдается электромагнитная эмиссия в широком диапазоне частот от 10 мГц до 300 кГц задолго до того, как возникает сейсмический сдвиг [2]. Максимум электромагнитной эмиссии приходится на диапазоны ультра низких и крайне низких частот (УНЧ и КНЧ) от 0,1 Гц до 20 Гц [2].

Цель данной работы состоит в изучении возможности и целесообразности исследования поляризационных характеристик электромагнитной эмиссии в общей системе мониторинга сейсмической активности для прогноза землетрясений, а также в разработке методики поляриметрических исследований поля сейсмических источников в УНЧ и КНЧ диапазонах.

Обоснование необходимости исследования поляризации излучения

В настоящее время нет достаточно полного представления о явлениях, обуславливающих электромагнитную эмиссию при сейсмической активности. Однако представляется очевидным, что экспериментально наблюдаемая эмиссия в верхней части диапазона УНЧ и нижней части КНЧ может быть вызвана только процессами, которые происходят одновременно в достаточно протяженных участках земной коры. Возникновение излучения обусловлено, по-видимому, пьезоэлектрическим и трибоэлектрическим эффектами, которые приводят к появлению зарядов при деформации кристаллов и трении в микросдвигах. В результате появления зарядов возникает сложная система хаотических импульсных токов, порождающих некоррелированное излучение в виде электромагнитной эмиссии. Эквивалентный электромагнитный источник имеет большие размеры, приблизительно совпадающие с размерами очага возможного землетрясения. Этот источник создается благодаря деформациям в поле напряжений вдоль разлома. Поэтому, несмотря на хаотическую природу токов в каждом малом объеме, эквивалентный электромагнитный источник в целом имеет определенную структуру, характерную для данного сейсмогенного разлома и поля напряжений на нем. Причем в рассматриваемом диапазоне частот не столько важно то или иное пространственное распределение излучающих областей в объеме источника, как некоторая преимущественная ориентация хаотических токов в этих областях. Причиной излучения, как уже отмечалось, являются деформации земной коры. Известно, что эти деформации происходят в виде подвижек типа смещений и надвигов, охватывающих весь очаг сейсмической активности. Такой сдвиговый ха-

рактер деформаций и обуславливает поляризационную анизотропию хаотического излучения.

В результате электромагнитная эмиссия в УНЧ и КНЧ диапазонах имеет вполне определенные поляризационные характеристики, так называемые поляризационные сигнатуры, соответствующие протяженному эквивалентному источнику. Они могут существенно отличаться от одного географического района к другому в зависимости от того, является ли район тектонически неоднородным или это район однородного разлома [3].

Имеются некоторые данные о поляризационных измерениях. Поляризационные измерения всплесков квазисинусоидального магнитного поля на частотах около 1 Гц и 5 Гц в районе Кавказской сейсмически активной зоны на двух разнесенных пунктах за несколько дней до землетрясения показали, что поле имеет эллиптическую поляризацию [4]. Ориентация главной оси эллипса в пределах точности измерений совпадала с направлением на эпицентр.

Поляризационные измерения могут существенно дополнить информацию об электромагнитных полях, возникающих перед землетрясениями. Полный анализ излучения, инициированного в очаге сейсмической активности, возможен только в рамках проведения поляризационного анализа этого излучения. Игнорирование поляризационных особенностей электромагнитного излучения ведет к потере большого объема информации о процессах в сейсмически активной области.

Поскольку поляризационные характеристики излучения главным образом обусловлены структурой источника в очаге возможного землетрясения, они, по-видимому, в среднем менее изменчивы в течение небольших промежутков времени (минуты и часы), чем амплитудные вариации всплесков электромагнитного поля. Поэтому поляризационные измерения могут дать возможность идентифицировать всплески поля (в некоторой их случайной последовательности), относящиеся к одному источнику излучения.

С другой стороны, изменения поляризационных характеристик в течение более длительных временных интервалов могут свидетельствовать о существенных изменениях структуры источника в очаге возможного землетрясения, а значит и поля напряжений в нем.

Для описания поляризации поля удобно использовать параметры Стокса [5]. Они дают возможность связать между собой такие характеристики поля как интенсивность, степень поляризации, коэффициент эллиптичности и угол ориентации эллипса поляризации полностью поляризованной составляющей и выразить их через изменяемые параметры электромагнитного поля.

На поверхность Земли через горные породы – среду с высокой проводимостью – проникает

электромагнитное излучение на частотах примерно от 0,3 Гц до 10 Гц.

Выбор частотного диапазона

В диапазоне от 0,3 Гц до 10 Гц можно выделить пять основных поддиапазонов частот электромагнитной эмиссии, обусловленной разными причинами. Приведенная ниже классификация и описание причин излучения основаны на результатах работы [6].

1. Первая из пяти наблюдаемых частот эмиссии магнитного поля связана с вращением Земли в ее электромагнитном окружении. Теоретическое значение этой частоты около 1,56 Гц. Экспериментально наблюдается пик в частотной области от 1,2 Гц до 1,9 Гц. Предполагается, что может существовать связь между величиной девиации частоты от ее значения 1,56 Гц и интенсивностью сейсмической активности где-либо на Земле. Когда сейсмическая активность низкая, наблюдается слабое излучение на частоте близкой к 1,56 Гц.

2. Поле в диапазоне 3,1÷3,9 Гц связано с вулканической и сейсмической активностью.

3. Третий из основных типов эмиссии проявляется в виде двойных сигналов, сконцентрированных вокруг частот 5,6 Гц и 11,2 Гц. Он связан с прохождением космических ракет через D и E слои ионосферы. Вероятность наблюдения дублета 5,6 Гц и 11,2 Гц без запуска или возвращения космического корабля оценивается как весьма низкая. Иногда наблюдается возбуждение F слоя на частоте 16,8 Гц.

4. Частота 7,8 Гц представляет собой частоту первого шумановского резонанса.

5. Пятый тип возбуждения поля наблюдается в частотном диапазоне 9,2÷9,6 Гц, обычно вокруг 9,4 Гц, и хорошо коррелирует с появлением протонов в результате солнечных вспышек.

Таким образом, для исследования сейсмической активности целесообразно выбрать диапазон от 2 Гц до 5 Гц [2], в котором лежит пик эмиссии, связанной с сейсмической активностью, и нет шумов, обусловленных геомагнитными пульсациями (частоты ниже 2 Гц), возбуждением шумановского резонанса и дублета 5,6 Гц и 11,2 Гц.

Требования к магнитометрам и их размещение

В выбранном частотном диапазоне электромагнитное поле реально всегда является шестикомпонентным полем ближней зоны эквивалентного источника. В настоящее время датчики магнитного поля значительно более удобны, имеют большую чувствительность и надежность, чем датчики электрического поля. Поэтому для регистрации электромагнитной эмиссии, обусловленной сейсмической активностью, целесообразно

использовать трехкомпонентные магнитометры для измерения вертикальной компоненты магнитного поля – Z и горизонтальных компонент север-юг – Н и восток-запад – D.

Регистрация Z компоненты магнитного поля необходима для идентификации всплесков электромагнитной эмиссии, вызванных подземными сейсмическими источниками. Известно, что геомагнитные пульсации обычно Н-поляризованы. В электромагнитном поле шумановских резонансов электрическая составляющая поляризована вертикально, а магнитная – в параллельной к поверхности Земли плоскости и имеет Н и D компоненты. Поэтому источники электромагнитной эмиссии, магнитное поле которых удовлетворяет условиям $B_Z / B_H > 1$, $B_Z / B_D > 1$, с большой вероятностью можно отождествлять с подземными сейсмическими источниками.

Для определения местоположения источника электромагнитной эмиссии необходимо иметь по крайней мере два пункта наблюдения. Желательно, чтобы их база составляла порядка 200 км и была ориентирована перпендикулярно к направлению на сейсмически активный район. Если есть возможность установить три или большее число пунктов наблюдения, целесообразно их разместить в вершинах равностороннего треугольника или многоугольника со стороной порядка 150–200 км, т. е. построить кольцевую решетку, имеющую примерно одинаковую базу для наблюдений источников в любом из направлений. Датчиками Z компоненты поля, по-видимому, достаточно оборудовать только некоторые из пунктов наблюдения для идентификации подземного происхождения всплесков электромагнитной эмиссии.

Типичный уровень магнитного поля эмиссии составляет около $0,1 \pm 10,0$ нТл и зависит от многих факторов. В наблюдениях, описанных в [4], магнитное поле имело величину $0,03 \pm 0,2$ нТл. В ряде работ отмечаются еще более низкие уровни поля эмиссии. Поэтому чувствительность датчиков должна быть около 10^{-4} нТл. Более высокая чувствительность, судя по имеющимся данным об уровнях электромагнитной эмиссии, вряд ли необходима и приведет к усложнению регистрации и зашумленности сигнала. Необходимый динамический диапазон датчиков составляет около 40 дБ.

Объем информации, подлежащей регистрации во время наблюдений, растет пропорционально верхней граничной частоте диапазона частот, в котором необходимо иметь данные для последующего анализа.

Для того чтобы уверенно выделять первый шумановский резонанс и дублет 5,6 Гц и 11,2 Гц (и тем самым оценивать их возможный вклад в спектральную плотность магнитного поля в диапазоне 2–5 Гц по отношению к спектральной плотности

поля сейсмических источников), выберем верхнюю границу частотного диапазона равной 15 Гц.

Для получения данных в диапазоне частот до 15 Гц без ошибок маскировки частот аналоговые сигналы каждого из датчиков трехкомпонентного магнитометра следует пропустить через низкочастотный фильтр с граничной частотой 15 Гц. Обычно низкочастотный фильтр имеет плоскую характеристику в диапазоне $0,7 \div 0,8$ от верхней, пропускаемой им частоты. Поэтому для получения данных в диапазоне до 15 Гц следует выбрать несколько более высокую частоту Найквиста, определяющую интервал между отсчетами, равную, например, $f_c = 20$ Гц. Тогда необходимый интервал дискретизации временной зависимости $\Delta t = 1 / (2f_c) = 1/40$ с, т. е. частота съема информации во времени должна составить 40 отсчетов в секунду.

Цифровая обработка данных

Пусть величины $\{x_n\}$, $\{y_n\}$ и $\{z_n\}$, $n = 1, 2, 3, \dots, N$ представляют собой значения D, Н и Z компонент магнитного поля в моменты времени $t_n = t_0 + n\Delta t$ и являются исходными данными для обработки.

Предварительная обработка данных

Исходные данные должны быть подвергнуты обычной предварительной обработке. Она включает в себя следующие операции:

- 1) приведение к нулевому среднему значению,
- 2) удаление тренда (при необходимости),
- 3) временное сглаживание перед вычислением спектральной плотности для подавления "просачивания" через боковые максимумы.

Пусть после предварительной обработки имеется набор данных $v_\alpha(t_n)$, $\alpha = x, y, z$.

С помощью алгоритма быстрого преобразования Фурье вычисляются функции спектральной плотности $S_{\alpha\alpha}(f)$ магнитного поля. Если длительность записей позволяет, используется усреднение по ряду оценок, полученных в результате обработки отрезков временных рядов с временным сглаживанием на каждом отрезке.

В выбранном диапазоне частот оцениваются величины отношений S_{zz} / S_{xx} и S_{zz} / S_{yy} для отождествления излучения от подземного источника и принятия решения о целесообразности дальнейшей обработки. При этом принимаются во внимание уровни спектральной плотности на частотах выше и ниже выбранного диапазона.

Оценка поляризационных характеристик магнитного поля

Цель дальнейшей обработки данных состоит в получении в некоторой выбранной полосе частот $f_0 - \Delta f/2 < f < f_0 + \Delta f/2$ со средней частотой f_0 (например, в полосе 3,25÷3,75 Гц, в диапазоне 2÷5 Гц) величин, характеризующих поляризационные свойства магнитного поля. Это следующие величины:

1) Степень поляризации, которая характеризуется соотношением между интенсивностью полностью поляризованной составляющей магнитного поля и его полной интенсивностью, включающей в себя интенсивность неполяризованной составляющей.

2) Три параметра Стокса, которые описывают состояние поляризации полностью поляризованной составляющей поля и дают возможность найти геометрические характеристики эллипса поляризации и направление вращения вектора поля.

Будем рассматривать поляризацию магнитного поля в плоскости xu .

Выполним частотную фильтрацию для выделения выбранной полосы частот со средней частотой f_0 . Фильтрацию можно выполнить как в частотной, так и во временной области. Фильтрация в частотной области соответствует умножению Фурье-образа исходной реализации $v_\alpha(t)$ на частотную характеристику полосового фильтра и выполнению затем обратного преобразования Фурье. В результате получается набор данных $\tilde{v}_\alpha(t)$. Здесь и далее $\alpha = x$ или $\alpha = y$.

Представим $\tilde{v}_\alpha(t)$ в виде квазимонохроматического колебания с меняющимися во времени амплитудой и фазой

$$\tilde{v}_\alpha(t) = \text{Re}[u_\alpha(t) \exp(-i2\pi f_0 t)],$$

где $u_\alpha(t) = \tilde{v}_\alpha(t) \exp(i2\pi f_0 t)$.

Состояние поляризации поля в плоскости xu полностью характеризуется поляризационным тензором [7]

$$\rho_{\alpha\beta} = \overline{u_\alpha(t) u_\beta^*(t)} / J,$$

где $\alpha = x, y$; $\beta = x, y$; $J = \overline{u_x(t) u_x^*(t) + u_y(t) u_y^*(t)}$ – сумма диагональных компонент тензора – среднее значение интенсивности магнитного поля; черта обозначает усреднение по времени.

Поляризационный тензор может быть выражен через параметры Стокса ξ_1, ξ_2, ξ_3 следующим образом:

$$\rho_{\alpha\beta} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 + \xi_3 & \xi_1 - i\xi_2 \\ \xi_1 + i\xi_2 & 1 - \xi_3 \end{pmatrix}.$$

Параметры Стокса вычисляются по формулам:

$$\xi_1 = \frac{2}{J} \text{Re}(\overline{u_x(t) u_y^*(t)}),$$

$$\xi_2 = \frac{2}{J} \text{Im}(\overline{u_x(t) u_y^*(t)}),$$

$$\xi_3 = \frac{1}{J} (\overline{u_x(t) u_x^*(t)} - \overline{u_y(t) u_y^*(t)}).$$

Каждый из параметров может принимать значения от -1 до $+1$.

Физический смысл параметров Стокса состоит в следующем. Первый параметр Стокса ξ_1 характеризует линейную поляризацию поля вдоль направлений, составляющих угол $\pi/4$ с осью Ox . Значению $\xi_1 = +1$ соответствует полная поляризация под углом $\pi/4$, а $\xi_1 = -1$ – под углом $-\pi/4$. Вторым параметр ξ_2 представляет собой разность нормированных интенсивностей поляризованных по кругу составляющих с противоположным вращением векторов поля. Параметр ξ_3 характеризует линейную поляризацию вдоль осей Ox и Oy ; значению $\xi_3 = +1$ соответствует полная поляризация вдоль Ox , а $\xi_3 = -1$ – вдоль Oy .

С помощью параметров Стокса легко находят степень поляризации и геометрические характеристики эллипса поляризации полностью поляризованной составляющей магнитного поля.

Степень поляризации описывается величиной

$$P = \sqrt{\xi_1^2 + \xi_2^2 + \xi_3^2}.$$

Она может принимать значения от 0 для неполяризованного поля до 1 для полностью поляризованного поля. Интенсивность поляризованной части магнитного поля

$$J^{(p)} = JP,$$

неполяризованной части –

$$J^{(n)} = J(1 - P).$$

Угол φ между осью Ox и одной из осей (для определенности – осью \vec{b}_1) поляризационного эллипса определяется следующим выражением

$$\varphi = \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \frac{\xi_1}{\xi_3}.$$

Полуоси эллипса поляризации магнитного поля определяются из равенств

$$b_1^2 + b_2^2 = JP, \quad 2b_1b_2 = J\xi_2.$$

Если $\xi_2 > 0$, вектор \vec{b}_2 в плоскости xu повернут относительно вектора \vec{b}_1 на угол $\pi/2$ в положительном направлении, если $\xi_2 < 0$ – в отрицательном. Вращение вектора поля происходит по кратчайшему пути от \vec{b}_1 к \vec{b}_2 , т. е. по или против направления винта, ввинчиваемого вдоль оси Oz , соответственно при $\operatorname{sign}(\xi_2)$, равном +1 или -1.

Найденные таким образом степень поляризации и параметры Стокса могут рассматриваться как поляризационная сигнатура магнитного поля электромагнитной эмиссии сейсмического источника в данном пункте наблюдения.

Сопоставление поляризационных сигнатур в разных пунктах наблюдения может дать информацию о направлении на источник и его местоположении.

Заключение

Основные результаты работы могут быть сформулированы следующим образом:

1. Показана целесообразность поляриметрии магнитного поля сейсмических источников в диапазоне частот 2÷5 Гц в связи с проблемой прогноза землетрясений.

2. Разработана методика поляриметрических исследований.

При обосновании целесообразности и разработке методики поляриметрии сейсмических источников сделан ряд предположений. Предполагается,

1) что сейсмические источники имеют достаточно мощную для экспериментального обнаружения и получения поляризационных сигнатур полностью поляризованную составляющую электромагнитной эмиссии (в пользу этого свидетельствуют некоторые описанные в литературе наблюдения);

2) экспериментальные данные позволяют выполнить поляризационный анализ излучения;

3) поляризационные сигнатуры имеют меньшую изменчивость, чем амплитудные вариации поля электромагнитной эмиссии, и поэтому могут

служить для идентификации сейсмических источников и определения направлений на них.

Безусловно, все эти предположения нуждаются в экспериментальной проверке, результаты которой могут вызвать необходимость коррекции в подходе к анализу поляризационных характеристик излучения.

Систематические исследования поляризационных характеристик электромагнитной эмиссии и анализ их результатов могли бы дать возможность определить практическое значение поляриметрии в общей системе мониторинга сейсмической активности для прогноза землетрясений.

Литература

1. Mogi Kiyoo. Earthquake prediction. Tokyo, Academic Press, 1985.
2. W-M. Boerner, R. Lanary, G. Franceschetti, J. Moreira, W. Keydel, P. Rosen, E. Rignot, N. R. Weinman, J. Teti, J. S. Verdi. Proc. of the Third Intern. Workshop on Radar Polarimetry, Nantes, March 21-23, 1995, 2, p. 731.
3. W-M. Boerner, J. Y. Dea, M. B. Gokhberg, A. J. Fraser-Smith, P. Varatsos, A. W. Green, T. Yoshino, L. C. Bobb. Proc. of the Third Intern. Workshop on Radar Polarimetry, Nantes, March 21-23, 1995, 1, p. 382.
4. Yu. A. Kopytenko, T. G. Matiashvili, P. M. Voronov, E. A. Kopytenko. Observation of electromagnetic ultralow frequency lithospheric emissions in the Caucasian seismically active zone and their connection with earthquakes. Electromagnetic phenomena related to earthquake prediction. Edited by M. Hayakawa and Y. Fujinawa. Terra Scientific Publishing Company, Tokyo, 1994, pp. 175-180.
5. Д. Б. Канарейкин, Н. Ф. Павлов, В. А. Потехин. Поляризация радиолокационных сигналов. Москва, Советское радио, 1966, 440 с.
6. W. L. Van Bise, E. A. Rauscher. Ambient electromagnetic fields as possible seismic and volcanic precursors. Electromagnetic phenomena related to earthquake prediction. Edited by M. Hayakawa and Y. Fujinawa. Terra Scientific Publishing Company, Tokyo, 1994, pp. 221-242.
7. Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. Теория поля. Москва, Наука, 1967, 460 с.

Magnetic Field Polarimetry of Seismic Sources

Sergey Prosvirnin

A use of investigation of 2÷5 Hz frequency band electromagnetic emission polarization characteristics is grounded in the connection with earthquake precursor problem. The investigation method is suggested.