

03;12

Способ детектирования возможного электромагнитного предвестника землетрясений

© В.К. Балханов, Ю.Б. Башкуев

Отдел физических проблем Бурятского научного центра СО РАН,
670047 Улан-Удэ, Россия
e-mail: ballar@yandex.ru

(Поступило в Редакцию 18 марта 2010 г. В окончательной редакции 22 декабря 2010 г.)

Предложен способ детектирования возможного электромагнитного предвестника землетрясений. Детектирование основано на устройстве, состоящем из вертикальной электрической антенны и тороидальной магнитной антенны, расположенной на поверхности Земли. Показано, что детектирующее устройство наиболее чувствительно к излучению электрического диполя, расположенного в массиве литосферы и ориентированного нормально к поверхности Земли. Рассматриваемая картина позволяет рагистрировать электромагнитные предвестники предложенным способом.

Введение

В литературе отмечается: „Человечество пока не научилось предсказывать землетрясения. . .“, например [1]. Такое положение связано с тем, что несмотря на успехи во многих областях сейсмологии, некоторые физико-химические процессы, лежащие в основе возникновения землетрясений, остаются еще не исследованными. Реальный физический процесс, происходящий в очаге землетрясения, чрезвычайно сложен и его теоретическое и экспериментальное исследование сталкивается с рядом трудностей. На множество критических вопросов нет ответов. К ним относятся недостаточное знание физических свойств веществ земных недр, механизмов, управляющих распределением и перераспределением в них энергии различного происхождения. Известно, что землетрясению предшествуют аномалии электрического и магнитного полей, выбросы радона, гелия и других газов. Подобные предвестники наблюдаются не всегда и везде, их сочетание и длительность весьма изменчивы, а физическая природа до конца не выяснена.

В настоящей работе мы рассмотрим вопрос о возможности детектирования на поверхности Земли электромагнитного предвестника землетрясений. При этом будем предполагать, что такой предвестник существует. Надежду на это указывают недавние исследования [2–7], согласно которым при деформации земной коры, вызываемые или предшествующие разломам, генерируются электромагнитные сигналы — аномалии электрического потенциала, изменения сопротивления и другие электрические проявления. Б.П. Дьяконовым и др. в работе [3] было установлено, что трещина в земной коре является механическим преобразователем упругих деформаций в электрический диполь, „динамика трещины сопровождается возникновением и релаксацией зарядов, генерирующих электромагнитные импульсы“. Причем, как отмечено в работе [2], ориентированный нормально к поверхности Земли электрический диполь имеет заряд на порядок больше, чем горизонтальный источник из-

лучения. В статье мы предложим подход к поиску и выявлению электромагнитных сигналов диполя, нормально ориентированного к поверхности Земли.

Излучение электрического диполя, расположенного в литосфере и ориентированного нормально к поверхности среды, обладает рядом особенностей, которые могут служить критериями именно электромагнитного предвестника землетрясения. Первый критерий следует из наличия границы раздела „свободное пространство—земная поверхность“. Здесь имеется выделенное направление — нормаль к границе, вдоль которой будет направлено доставляемое из недр Земли на ее поверхность электрическое поле. Магнитное поле ортогонально к электрическому полю и в силу симметрии вдоль нормали поляризовано по кругу на поверхности Земли. Из рассмотренного первого критерия следует, что предполагаемый электромагнитный предвестник необходимо детектировать вертикальной электрической антенной и магнитной антенной в виде рамки, расположенной также вертикально на поверхности Земли. Для усиления сигнала от магнитного поля необходима система рамок, собранных по окружности. Лучше всего для этого электрический провод намотать на ферритовый стержень в виде тороидальной катушки, который располагается на поверхности.

Вторым критерием электромагнитного предвестника является вопрос о частоте, на котором необходимо производить измерение. Для решения этого вопроса используем представление о скин-слое. Распространение электромагнитного поля в сплошной среде характеризуется скин-слоем H . Если ρ — удельное сопротивление однородной среды, то скин-слой [8]

$$H = \sqrt{\frac{2\rho}{\mu_0\omega}}, \quad (1)$$

где μ_0 — магнитная постоянная, ω — круговая частота. Частота электромагнитного поля, выносимого на поверхность Земли, должна быть такой, чтобы скин-слой сравнялся с глубиной h залегания очага землетрясения.

Для гранитных пород обычно $\rho \sim 10^5 \Omega \cdot \text{m}$ [9]. Приняв для глубины очага $h = 10 \text{ km}$, из (1) находим частоту $f = \omega/2\pi$:

$$f = \frac{\rho}{\pi\mu_0 h^2} \approx 250 \text{ Hz}. \quad (2)$$

Поскольку глубина очага землетрясения заранее неизвестна, то необходимо проводить измерение широкополосного спектра. На частоте (2) в широкополосном спектре будет наблюдаться максимум. Сделанный вывод является вторым критерием электромагнитного предвестника землетрясений. Развитая картина ранее была предложена в работах [10,11]. Однако предложенные там пространственные характеристики электромагнитных полей, измеряемые на поверхности земли, требуют уточнения, которое сделаем в настоящей работе.

Электрические и магнитные поля на поверхности Земли имеют характерные частотные закономерности. Эти закономерности являются третьим критерием электромагнитного предвестника землетрясений. Одновременное проявление всех трех установленных выше критериев — однозначное проявление электромагнитного предвестника землетрясений. Как следует из работы (2), диапазон реально возможных глубин очагов землетрясения ($h = 10\text{--}30 \text{ km}$) и значений удельного сопротивления твердых пород ($\rho = 10^4\text{--}10^5 \Omega \cdot \text{m}$), оптимальные частоты, на которых необходимо проводить измерения, должны быть порядка $1 \text{ Hz}\text{--}1 \text{ kHz}$. В работе [12] была предложена программа поиска электромагнитных предвестников на частотах, меньших 1 Hz . Например, на частоте 0.1 Hz , как следует из (2), глубина очага землетрясения должна быть порядка 500 km , что является нереальным. И действительно, в [13] отмечено, что после многолетних исследований поиски электромагнитных предвестников землетрясений в диапазоне частот, меньших 1 Hz , не принесли значимых результатов.

Для описания электрических свойств сплошных сред в радио и геофизике используются два параметра — проводимость σ и диэлектрическая проницаемость ε . Совместно наличие этих электрических свойств приводят к следующему. Если литосфера в небольших внутренних участках находится в напряженном состоянии и это состояние приводит к образованию электрических разрядов в течение длительного времени, то такие условия могут оказаться достаточными для формирования электромагнитных полей такого уровня, чтобы они успели достигнуть поверхности среды, где их можно измерить. Уравнения Максвелла с включенными в них электрическими параметрами называют материальными уравнениями Максвелла [8]. Из них следует, что в однородной полупроводящей среде (т.е. имеющей проводимость σ и диэлектрическую проницаемость ε) ток J и заряд Q связаны следующим уравнением:

$$\frac{dQ}{dt} + \frac{\sigma Q}{\varepsilon_0 \varepsilon} = J. \quad (3)$$

Здесь ε_0 — диэлектрическая постоянная. Приняв $J = J_0 \exp(-i\omega t)$, получим общее решение уравнения (3):

$$Q = \left(Q_0 - \frac{J_0}{-i\omega + \sigma/\varepsilon_0 \varepsilon} \right) \exp\left(-\frac{\sigma}{\varepsilon_0 \varepsilon} t\right) + \frac{J_0 \exp(-i\omega t)}{-i\omega + \sigma/\varepsilon_0 \varepsilon}. \quad (4)$$

Для гранитных пород $\rho \approx 10^5 \Omega \cdot \text{m}$, $\varepsilon = 10$ [9] и величина $\varepsilon_0 \rho \approx 10^{-6} \text{ s}$. Малая величина этого времени означает, что появляющиеся во время механических напряжений заряды практически мгновенно затухают. Следовательно, первое, не периодическое слагаемое в (4) зануляется. При этом слагаемое с периодическим множителем остается, т.е.

$$Q = \frac{J_0 \exp(-i\omega t)}{-i\omega + \sigma/\varepsilon_0 \varepsilon}. \quad (5)$$

Видно, что если ток в источнике меняется со временем периодически, то заряд не исчезает. Это обстоятельство приводит к тому, что времени может оказаться достаточным, чтобы в среде сформировалось электромагнитное поле, которое можно измерить на поверхности среды. Выше мы отметили, что измерения необходимо проводить на частотах от 1 Hz и выше. Возникает задача: как механические напряжения могут менять заряды диполей с частотой от 1 Hz . Для решения этой задачи необходимо совместное решение уравнений Максвелла и уравнений теории упругости.

Поля на поверхности плоской среды

Как было отмечено во Введении, в литосфере в результате механических напряжений, предшествующих землетрясению, образуются электрические диполи, нормально ориентированные к поверхности Земли. Как следует из (5), если заряды диполя периодически меняются со временем, то они не исчезают и времени может оказаться достаточным, чтобы диполи сформировали электромагнитное поле. Приступим к вычислению поля излучаемого диполем, ориентированным вдоль оси z , нормальным к поверхности Земли. Если ввести обычным образом векторный \mathbf{A} и скалярный φ потенциалы, то они будут находится из следующих выражений [14]:

$$\nabla^2 \mathbf{A} + k^2 \mathbf{A} = -\mu_0 \mathbf{j}. \quad (6)$$

$$\varphi = -\frac{c^2}{\varepsilon} \exp\left(-\frac{\sigma}{\varepsilon_0 \varepsilon} t\right) \int_0^t \nabla \mathbf{A} \exp\left(\frac{\sigma}{\varepsilon_0 \varepsilon} t\right) dt. \quad (7)$$

Здесь ∇ — оператор набла, c — скорость света, \mathbf{j} — вектор плотности тока. Квадрат волнового числа в однородной среде дается следующим выражением:

$$k^2 = \frac{\omega^2}{c^2} \left(\varepsilon + \frac{i\sigma}{\varepsilon_0 \omega} t \right). \quad (8)$$

В выражении (7) опущено слагаемое, не зависящее от координат. Это слагаемое выпадает при вычислении компонент электромагнитного поля.

На расстояниях R , далеких от диполя, уравнение (6) имеет следующее ненулевое решение:

$$A_z(R, t) = \frac{\mu_0 J l}{4\pi} - \frac{1}{R} \exp(-i\omega t + ikR), \quad (9)$$

где l — длина диполя. Удобно множитель $\mu_0 J l / 4\pi$ на время не выписывать, а экспоненту $\exp(-i\omega t + ikR)$ обозначить как e . Тогда

$$A_z = \frac{1}{R} e. \quad (10)$$

В сферических координатах $A_r = A_z \cos \theta$, $A_\theta = A_z \sin \theta$, где θ — полярный угол. Подставляя (10) в (7), получаем скалярный потенциал:

$$\varphi = \frac{\omega}{k} \frac{1}{R} e \cos \theta. \quad (11)$$

Здесь опущены слагаемые, пропорциональные $1/R^2$ и не зависящие от времени как $\exp(-i\omega t)$. Используя формулы векторного анализа в сферических координатах, из формул (10) и (11) находим ненулевые компоненты электромагнитного поля:

$$B_\varphi = \frac{ik}{R} e \sin \theta, \quad (12)$$

$$E_r = \frac{\omega}{k} \frac{1}{R^2} e \cos \theta, \quad (13)$$

$$E_\theta = \frac{i\omega}{R} e \sin \theta. \quad (14)$$

Здесь θ — полярный угол, отсчитываемый от оси z . Мощность излучения

$$P = \frac{2\pi}{\mu_0} \left\langle \frac{E_\theta B_\varphi^* + E_\theta^* B_\varphi}{4} \right\rangle R^2 \sin \theta d\theta, \quad (15)$$

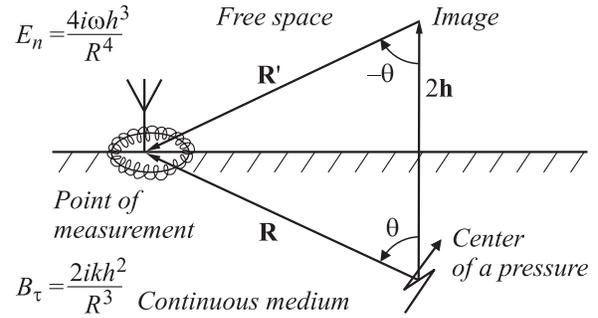
где $*$ — комплексное сопряжение, $\langle \dots \rangle$ — усреднение по времени [15]. Подставляя в (15) формулы (12)–(14), получаем с учетом всех размерных множителей

$$P = \frac{4}{3} \frac{\pi}{\mu_0} \left(\frac{\mu_0 J l}{4\pi} \right)^2 \omega \operatorname{Re} k \exp(-2R \operatorname{Im} k), \quad (16)$$

где Re и Im — операции взятия действительной и мнимой части соответственно. Если излучение происходит в свободном пространстве, то $k = \omega/c$ и из (16) следует известный результат [14]:

$$P = \frac{4}{3} \pi \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}} \left(\frac{\mu_0 J l}{4\pi} \right)^2 \omega^2.$$

Видно, что мощность излучения в среде имеет более сложную зависимость от частоты, чем излучение в свободном пространстве.



Геометрия задачи. В пункте измерения расположено устройство, детектирующее электромагнитное поле. Устройство состоит из вертикальной электрической антенны и магнитной рамки, намотанный на тороидальный ферритовый сердечник. Показаны ненулевые компоненты тангенциальной магнитной индукции и нормального электрического поля. Общий множитель $\mu_0 J l / (4\pi) \exp(-i\omega t + ikR)$ для компонент полей не выписан.

Для решения поставленной задачи — определения полей на поверхности Земли, используем известный метод изображений. Проведем подробно расчет для магнитной индукции. На рисунке представлена геометрия задачи, h — глубина погружения электрического разряда очага напряжения. Имеем

$$B_\varphi(R, \theta) = \frac{ik}{R} e \sin \theta,$$

$$B'_\varphi(R', -\theta) = -\frac{ik}{R'} e' \sin \theta,$$

где $e' = \exp(-i\omega t + ikR')$. Общее поле на поверхности

$$B_r = B_\varphi + B'_\varphi = ik \left(\frac{e}{R} - \frac{e'}{|R - 2h|} \right) \sin \theta.$$

Здесь примем, что $h \ll R$. Далее, принимая во внимание, что $\cos \theta = h/R$, в итоге получаем следующие выражения для компонент магнитной индукции (ниже все размерные множители выписаны полностью):

$$B_n = 0, \quad B_r = \frac{\mu_0 J l}{4\pi} \frac{2ikh^2}{R^3} \exp(-i\omega t + ikR). \quad (17)$$

Аналогично находим компоненты электрического поля:

$$E_n = \frac{\mu_0 J l}{4\pi} \frac{4i\omega h^3}{R^4} \exp(-i\omega t + ikR), \quad E_r = 0. \quad (18)$$

Мы нашли, что в первом приближении электрическое поле нормально к поверхности среды, а магнитное поле — тангенциальное. Этим самым, подтвердили картину, данную во Введении. Из формул (17) и (18) следует, что амплитуда электрического поля пропорциональна частоте: $E_n \propto \omega$. Частотная характеристика амплитуды магнитной индукции более сложная. Так, для однородной проводящей среды $B_r \propto \sqrt{\omega}$.

Необходимо заметить следующее. Реально, в зоне очага готовящегося землетрясения образуется система

трещин разной длины и ориентированных случайным образом. Поэтому необходимо учитывать как вторичные источники излучения на поверхности земли, так и провести усреднение по случайным образом ориентированным дипольным излучателям. Это можно сделать после принципиального обнаружения электромагнитного предвестника землетрясения.

Заключение

Уравнения для потенциалов применены к задаче излучения диполя Герца, погруженного в сплошную среду и ориентированного нормально к поверхности Земли. Установлено, что если в свободном пространстве мощность излучения диполя пропорциональна квадрату частоты, то мощность излучения в среде зависит от частоты более сложным образом. Получены соотношения для компонент электромагнитного поля в волновой зоне — первые ненулевые выражения разложения в ряд по обратным степеням расстояния от диполя до измерительного устройства на поверхности Земли. Эти соотношения с использованием метода изображений применены к выяснению картины полей на поверхности Земли. Установлено, что в принятом приближении на поверхности Земли магнитное поле имеет только тангенциальную компоненту, а электрическое поля — нормальную. Определены оптимальные частоты, на которых необходимо производить измерения.

Показано, что если механические напряжения в сплошной среде создают периодически меняющиеся и пространственно разделенные противоположного знака электрические заряды, то эти заряды не затухают, и времени оказывается достаточно для формирования электромагнитного поля. На основе выше изложенного, можно предложить следующее устройство для поиска возможного предвестника землетрясения. Переменное электрическое поле измеряется вертикальной электрической антенной. При этом измеряемая напряженность электрического поля предвестника землетрясения пропорциональна частоте. Тангенциальное магнитное поле измеряется на поверхности земли, при этом измеряемая напряженность магнитного поля имеет сложную зависимость от частоты, но не зависит от ориентации магнитной антенны. Независимость измеряемой напряженности магнитного поля от ориентации магнитной антенны позволяет в качестве последней предложить круговую катушку на торовый сердечник для повышения чувствительности самой антенны. Поскольку спектр излучения предвестника заранее не известен, то измерения необходимо производить широкополосным приемником. Предложенные критерии однозначно будут указывать на глубинный источник излучения электромагнитной волны от зарождающегося очага землетрясения. Для осуществления предложенного в статье подхода к поиску электромагнитного предвестника в сейсмоопасных регионах необходимо создать региональную сеть мо-

нитринговых станций. Это позволит проводить постоянный мониторинг по предсказанию землетрясения в сейсмоактивных районах.

Работа частично поддержана РФФИ грантами № 08-01-98006, 08-02-98007 и интеграционным проектом № 56 СО РАН.

Список литературы

- [1] *Соболев Г.А., Пономарев А.В.* Физика землетрясений и предвестники. М.: Наука, 2003. 270 с.
- [2] *Киссин И.Г.* Флюиды в земной коре. М.: Наука, 2009. 328 с.
- [3] *Дьяконов Б.П., Мартышко П.С., Троянов А.К.* и др. // ДАН. 2010. Т. 430. № 1. С. 105–107.
- [4] *Болт Б.* Землетрясения. М.: Мир, 1981. 256 с.
- [5] *Соболев Г.А.* Основы прогноза землетрясений. М.: Наука, 1993. 313 с.
- [6] *Киссин И.Г., Рузайкин А.И.* // Физика Земли. 2000. № 7. С. 67–75.
- [7] *Желиговский В.А., Подвигина О.М.* // Физика Земли. 2002. № 12. С. 3–13.
- [8] *Балханов В.К., Башкуев Ю.Б.* Основы теории метода поверхностного импеданса (2005). Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН. 100 с.
- [9] *Башкуев Ю.Б.* Электрические свойства природных слоистых сред. Новосибирск: Изд-во СО РАН. 1996. 196 с.
- [10] *Балханов В.К., Башкуев Ю.Б.* // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2005. № 3. С. 45–47.
- [11] *Балханов В.К., Башкуев Ю.Б.* // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2005. № 4. С. 336–337.
- [12] *Hayakawa M., Tomizawa I., Shimakura S., Fujinava Y., Takahashi K. and Yishino T.* // Phys. of the Planetary Interiors. 1993. N 77. P. 127–135.
- [13] *Вербин Ю.П., Крылов Г.Н., Зарх А.З.* // Успехи современной радиоэлектроники. 2002. № 1. С. 62–71.
- [14] *Гольдштейн Л.Д., Зернов Н.В.* Электромагнитные поля и волны. М.: Советское радио, 1971. 664 с.
- [15] *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Электродинамика сплошных сред. М.: Наука, 1982. 624 с.