

## В ПОИСКАХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРЕДВЕСТНИКОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Природные явления, связанные с тектонической активностью Земли, постоянно напоминают о себе катастрофическими последствиями, приводящими к большим человеческим жертвам и всевозможным разрушениям гражданских и промышленных сооружений. Проблема своевременного обнаружения, оценки и прогноза развития негативных геологических процессов, обусловленных тектонической активностью, всегда была и остается одной из наиболее актуальных для человека.

Предвестниками землетрясений называют любые аномальные изменения свойств Земли и ее биосферы, регулярно проявляющиеся перед землетрясением. К настоящему времени выявлено и изучается более 200 таких предвестников [6].

Несмотря на то, что к решению данной проблемы подключены во всем мире, по данным В.Н.Страхова [6], специалисты из примерно ста академических, ведомственных и учебных институтов, процент произошедших, но не предсказанных землетрясений остается достаточно большим. Это говорит о чрезвычайной сложности данной проблемы. Сложность ее состоит в первую очередь в том, что в отличие, скажем, от прогноза погоды, где основные информативные физические величины доступны прямым измерениям, при прогнозе землетрясений приходится иметь дело с косвенными физическими характеристиками, весьма неоднозначно отображающими и строение и происходящие на больших глубинах физико-механические процессы. Проблема прогноза находится пока на стадии научного поиска. В настоящее время ведется активное накопление экспериментального материала с учетом новых аппаратурно-технических возможностей, методов и средств интерпретации регистрируемых полей.

Эффективность прогноза определяется совершенствованием всех его звеньев при максимально возможном использовании комплекса различных видов предвестников землетрясений. Одними из перспективных в этом комплексе являются методы электрометрии, обладающие достаточно большим набором информативных характеристик, связанных с глубинными тектоническими процессами. Механизм образования аномальных электрических и электромагнитных полей объясняется как изменениями трещиноватости, пористости, флюидосодержания, минерализации водных растворов, структуры, текстуры, температуры и давления - факторов, оказывающих влияние на изменение электрических свойств пород (эффекты первого рода), так и различными по своей природе механо-электрическими преобразованиями - пьезоэлектрический эффект, тектономагнитный эффект, электрокинетические процессы, происходящие в пористых влагонасыщенных породах, электризация горных пород при их разрушении и др., вызывающих изменения амплитудно-частотных характеристик естественных электромагнитных полей (эффекты второго рода) [1-7].

В данном сообщении приводятся результаты первого этапа опытно-методических работ по изучению электромагнитных полей в зонах активной тектоники, выполненных лабораторией наземной и подземной электрометрии Горного института. Основные исследования были направлены на разработку программно-измерительного комплекса, технологии ведения полевых работ, способов компьютерной обработки и интерпретации результатов наблюдений и апробирование их на одном из сейсмоактивных регионов. В качестве исследуемого участка был использован Алтайский сейсмологический полигон (Республика Горный Алтай).

Полевые наблюдения проводились на участке расположенном в 25 км северо-восточнее п. Акташ в период достаточно крупного землетрясения (с магнитудой 7.5), произошедшего 27 сентября 2003 года вблизи данного участка. Работы охватывали период времени непосредственно предшествующий землетрясению (август 2003 г.), активную его фа-

зу (ноябрь 2003 г.), а также последующий период, сопровождавшийся большим количеством афтершоков (август 2004 г., и август 2005 г.).

Комплексные электроразведочные наблюдения включали набор методов, направленных на изучение вышеотмеченных эффектов первого и второго рода: 1) мониторинговые измерения компонент  $E_x$ ,  $E_y$ ,  $H_x$ ,  $H_y$  естественных переменных электромагнитных полей практически в непрерывном режиме (частота дискретизации до 50 - 100 кГц) в широком диапазоне частот от сотых долей герца до 50 кГц; 2) мониторинговые измерения удельного электрического сопротивления с аппаратурой низкой частоты; 3) электрические зондирования по профилю, пересекающему одну из зон тектонического нарушения, 4) измерения анизотропии среды.

Программно-измерительный комплекс был сформирован на базе отечественных комплектовующих блоков: малогабаритного аналого-цифрового преобразователя (L-Card E-440, Москва), двух электрических и трех магнитных датчиков индукционного типа (разработка Института Геофизики УрО РАН), ноутбука (класса Pentium 4) с программой регистрации ResWin и спектрального анализа наблюдаемых полей (Горный институт УрО РАН, Пермь), системы цифрового управления и блока питания. В его создании большая помощь была оказана сотрудниками лаборатории сейсмологии Горного института, чей многолетний опыт в создании аналогичных измерительных комплексов и изучении сейсмических событий был максимально учтен и адаптирован к изучению электромагнитных полей. Это в конечном итоге позволило синхронизировать по времени регистрацию естественных электромагнитных полей с сейсмологическими наблюдениями, проводившимися на исследованном участке.

Вместе с тем для осуществления интерпретационного процесса был разработан и адаптирован применительно к данной задаче ряд дополнительных программ: а) программа первичной обработки массивов данных, позволяющая получать кривые магнитотеллурического зондирования; б) программа решения прямой задачи магнитотеллурического зондирования для горизонтально-слоистых сред; в) программа количественной интерпретации электрических зондирований; г) программа визуализации мониторинговых электроразведочных наблюдений.

В общей сложности за период проведенных исследований получено более 300 Гб информации о поведении электромагнитного поля в заданной точке наблюдений, из которой, в связи с затратами времени на создание стартового комплекса программ обработки и интерпретации, на данный момент обработано не более 25 %.

Первые результаты анализа полученных материалов, представленных в виде частотных характеристик регистрируемых полей, гистограмм частотного состава и спектрограмм напряженности электрического поля, позволили выделить ряд особенностей: а) наличие характерных фаз состояния электромагнитного поля в период предшествующий сейсмическому событию – фаза интенсивного увеличения амплитудных характеристик поля и фаза относительного “затишья” (рис.1; фаза “затишья” в данном примере длится около 3 часов); б) наличие нескольких видов импульсов, отличающихся по форме, характеру и частотному составу; в) значительные изменения интенсивности излучения в период предшествующий землетрясению и после активной его фазы (рис.2). При этом наибольшая интенсивность наблюдается в сверхнизкочастотном (0.04-2 Гц) и высокочастотном (7-9 кГц) диапазонах, сопровождаемых серией всплесков в высокочастотной (10-12 кГц, 18-25 кГц) области. Некоторое повышение интенсивности отмечено в диапазоне 4-8 Гц.

Характер изменения интенсивности во времени в период предшествующий сейсмическому событию в общих чертах оказался наиболее близок к модели лавинно-неустойчивого трещинообразования, начинающегося с появления мелких трещин (высокие частоты) с последующим образованием более крупных нарушений (низкие частоты поля).

Однако процент проявления подобных закономерностей поведения электромагнитных полей в период предшествующий сейсмическому событию средней интенсивности (с магнитудой 2.5 – 3), полученный по результатам предварительного анализа обработанной части

информации составляет порядка 30 %, что говорит о разной природе аномальных проявлений регистрируемых сигналов. Одной из причин этого является достаточно сложный, составной характер наблюдаемого поля, определяемый влиянием различных по своей природе электромагнитных источников (магнитотеллурических полей, полей связанных с тектоническими процессами, грозových разрядов (так называемые атмосферники), техногенных полей и др.), создающих достаточно высокий шумовой фон.

Для выделения в более “чистом” виде информации о тектонических событиях необходима процедура разделение полей и, в первую очередь, снятие фоновой составляющей наблюдаемого поля, связанной ионосферными процессами (выделение магнитотеллурической составляющей электромагнитного поля), которая в свою очередь несет информацию о строении и физическом состоянии слагающих разрез пород – то есть о проявлении эффектов второго рода.

Известно несколько подходов к решению данной задачи: а) с помощью использования передаточных функций (Б.С.Светов, 1995), б) на основе учета морфологии прогностических сигналов (С.М. Крылов, 1997) и др. В данном случае для выделения ионосферной составляющей наблюдаемого поля был использован способ, основанный на выделении регулярной составляющей электромагнитного поля, отражающей физические свойства геоэлектрической модели среды, обеспечивающих более устойчивые поля по сравнению с электромагнитными полями тектонической природы. Для этого был разработан способ и программа построения кривых МТЗ (графиков  $r_k(\sqrt{T})$ ), основанные на аппроксимации множества экспериментальных значений кривых кажущегося сопротивления, полученных в результате мониторинговых наблюдений, с использованием метода наименьших квадратов. Большая помощь в реализации данного метода была оказана сотрудником лаборатории потенциалных полей В.А.Кутиным.

На основе анализа первичного материала, выявившего наличие участков нестабильности в поведении точек  $r_k(\sqrt{T})$ , проявляющихся в разбросе значений в форме облака с отдельными выбросами, охватывающими диапазон в несколько порядков, в качестве аналитической функции, сглаживающей данную зависимость, была выбрана функция вида:

$$r_k(\sqrt{T}) = e^{P_n(\sqrt{T})},$$

где в показателе экспоненты находится полином степени  $n$

$$P_n(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_nx^n.$$

Решение задачи сводится к определению коэффициентов  $a_i$  данного полинома. С учетом слабой регулярности наблюдаемого поля порядок полинома был взят равным семи ( $n=7$ ). Все расчеты выполнялись в билогарифмической системе координат.

Коэффициенты полинома вычисляются на основе минимизации квадратического функционала:

$$\Phi(a_0, \dots, a_n) = \sum_{i=1}^N W_i [y_i^3 - y(x_i)]^2 = \sum_{i=1}^N W_i [y_i^3 - P_n(x_i)]^2,$$

где  $N$  - общее количество точек,  $W_i = W(x_i)$  - весовая функция необходимая для регулирования вклада точек, обладающих разной степенью информативности. Значения коэффициентов полинома  $a_i$  находятся путем решения системы линейных уравнений:

$$-\frac{1}{2} \frac{\partial \Phi}{\partial a_\kappa} = 0, \quad \kappa = \overline{1, n+1}$$

Некоторые элементы выделения и анализа ионосферной составляющей электромагнитного поля представлены на рис.3,4.

Визуальный анализ структуры суточных вариаций поля (рис.3а) показывает, что оно неоднородно по составу. Можно выделить до трех видов полей (отмеченных на рисунке цифрами 1, 2 и 3). Два из них прослеживаются во всем интервале регистрируемых частот; третий вид проявляется в диапазоне 6-8 Гц. Локальный характер последнего вида аномалии,

устойчиво прослеживаемой в течение всего периода режимных наблюдений, позволяет предположить о техногенной его природе.

Поинтервальный анализ наблюдаемого поля показал, что характер поведения регулярной его составляющей зависит от времени суток: первый вид зависимости наиболее отчетливо проявляется в первой половине суток (от 4.5 часа до 15 часов), второй - менее выраженный, в вечерние и ночные интервалы времени.

Динамический разрез кажущихся сопротивлений (рис.4), построенный для первого типа наблюдаемого поля, отмечает закономерное понижение со временем значений электрического сопротивления опорного горизонта. Количественная оценка, выполненная по кривым зондирования (в частности, приведенная на рисунке 3б), показала, что эти изменения происходят на глубинах порядка 12-14 км.

Для изучения эффектов второго рода, связанных с изменением физических свойств пород, помимо кривых магнитотеллурического зондирования, содержащих информацию в основном о глубинной части разреза, был использован метод сопротивлений для оценки изменчивости электрических сопротивлений верхней части разреза. Для этого были проведены как профильные наблюдения вдоль линии пересекающей одно из тектонических нарушений, так и режимные наблюдения вблизи данного нарушения.

Разрез кажущихся сопротивлений, полученный по результатам электрического зондирования вдоль профиля до и после землетрясения (рис.5а,б), фиксирует заметные отличия, проявляющиеся в повышении дифференциации и латеральной изменчивости свойств среды после активной фазы землетрясения; а также увеличении значений кажущегося сопротивления, особенно в восточной части профиля, примерно до 30-35 %. Первый фактор вполне объясним с позиции нарушенности пород, вследствие произошедших геодинамических явлений. Наиболее вероятной причиной второго фактора может служить изменение гидрогеологических условий, вызвавших уменьшение водосодержания пород в исследуемом интервале глубин.

Для оценки анизотропии горных пород на пикетах 7, 11, 18 были проведены крестовые ВЭЗ. Результаты измерений показали, что коэффициент анизотропии в зоне разлома в 1.25 – 1.33 раза превышает его фоновые значение. Диаграмма анизотропии показала на наличие зоны повышенной трещиноватости, простирающейся в субмеридиональном направлении.

Для осуществления мониторинговых наблюдений за изменением электрических свойств среды был использован генератор аппаратуры АНЧ-3, создающий квазинизкочастотное электрическое поле частотой 4.88 Гц, и рассмотренный выше программно-измерительный комплекс для регистрации естественных электромагнитных полей. Питающие электроды располагались с двух сторон от зоны тектонического нарушения примерно на одинаковом удалении от нее. Величина разноса АВ составляла 800 м. В качестве приемных использовались две линии MN гальванического типа.

Искомые значения разности потенциалов  $\Delta U_x(t)$  и  $\Delta U_y(t)$  определялись путем выделения составляющей наблюдаемого поля заданной частоты (4.88 Гц) в результате спектрального его анализа.

Графики кажущегося сопротивления, вычисленные по измеренным значениям разностей потенциалов, показали, что электрическое сопротивление исследуемой части разреза испытывает закономерные изменения во времени. Величина максимального относительного изменения сопротивлений составляет порядка 12 %. Характер изменения электрических сопротивлений в субширотном (а) и субмеридиальном (б) направлениях оказался существенно различным, что свидетельствует об особенностях геодинамических процессов, происходящих вдоль и вкрест линии тектонического нарушения.

Таким образом, полученные первые результаты опытно-методических работ показывают достаточно отчетливое проявление в электромагнитных полях эффектов как первого, так и второго рода, предшествующих и сопровождающих тектонические события. Однако выявление критериев-маркеров предвестников землетрясений и определение количествен-

ных характеристик, необходимых для осуществления достоверного краткосрочного прогноза требует дальнейшего всестороннего и глубокого анализа экспериментального материала. Работы в этом направлении продолжаются.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Добровольский И.П. Механика подготовки тектонического землетрясения. М.: ИФЗ АН СССР. 1984.
2. Моргунов В.А. Реальности прогноза землетрясений // Изв. РАН. Физика Земли. 1999. N 1. С.79-91.
3. Перельман М.Е. Хатиашвили Н.Г. К теории электромагнитного излучения при разрушении // Прогноз землетрясений / -1983/ -N 4, - С. 112-117.
4. Сидорин А.Я. Предвестники землетрясений. М., Наука. 1992. 192 с.
5. Соболев Г.А. Основы прогноза землетрясений М., Наука. 1993. - 313 с.
6. Современное состояние проблемы прогноза землетрясений. Неофициальный сервер Геологического ф-та МГУ. <http://web.ru/db/msg.html?mid=1170162>
7. Электромагнитные предвестники землетрясений. Отв. ред. ак. Садовский М.А. М.: Наука, 1982.