

УДК 550.837+550.343 (575.2)(04)

ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО МОНИТОРИНГА СЕЙСМОАКТИВНЫХ ЗОН (ОБЗОР)

В.Е. Матюков

Представлены практические результаты мониторинговых электромагнитных исследований состояния земной коры, полученные в различных сейсмоактивных регионах Земли. Рассмотрены два различных физических механизма динамики электромагнитных полей для изучения процессов, происходящих в земной коре при подготовке землетрясения. Проведен анализ результатов электромагнитного мониторинга сейсмогенерирующей зоны Северного Тянь-Шаня в широком частотном диапазоне.

Ключевые слова: геодинамические процессы; электромагнитное поле; мониторинг; сейсмоактивные зоны.

Введение. Современные представления о геодинамических процессах, происходящих в недрах Земли при подготовке землетрясения, дают основание полагать, что эти процессы в определенной мере можно проследить на основе наблюдений электромагнитного поля естественного или искусственного происхождения на поверхности Земли. Существуют два принципиально различных физических основания для электромагнитного мониторинга геодинамических процессов. Первое – изменение электрических свойств геологической среды под воздействием тектонических процессов, второе – непосредственные механоэлектрические преобразования энергии при таких процессах и появление связанных с ними электромагнитных полей. В определенной мере они соответствуют установленным сейсмoeлектрическим эффектам 1 и 2 рода [1, 2]. Есть основания полагать, что геодинамические процессы и, в частности, формирование очага землетрясения сопровождаются активным трещинообразованием, резким изменением поровой структуры горных пород и перераспределением насыщающих горные породы водных растворов, вследствие чего изменяется удельное сопротивление затронутых тектоническими процессами массивов горных пород. Относительные изменения удельного сопротивления горной породы зависят от ее структуры, водонасыщенности и других факторов, и в некоторых типах пород могут в несколько десятков, сотен и тысяч раз превышать относительные значения вызвавших их деформаций [3]. Вариации электропроводности могут также про-

исходить под воздействием сопровождающих геодинамические процессы общих изменений в физико-химической обстановке, приводящих к дегидратации горных пород или испарению водных растворов. Такие физико-геологические процессы ведут к изменению не только электропроводности, но и поляризуемости вещества.

Режимные наблюдения за естественным электромагнитным (магнитотеллурическим) полем в низкочастотном (до первых десятков герц) диапазоне позволяют изучить оба направления электромагнитного мониторинга геодинамических процессов: слежение за временной динамикой характеристик геоэлектрических разрезов и мониторинг электромагнитных полей внутреннего происхождения. В этом диапазоне частот можно ожидать, в основном, линейную связь между вариациями упругих и электромагнитных полей внутреннего происхождения. С другой стороны, именно этот диапазон частот, освоенный при магнитотеллурических исследованиях, позволяет судить об изменениях геоэлектрической структуры Земли вплоть до глубин 10–20 км, которые представляют основной интерес, с геодинамической точки зрения.

В настоящее время уже накоплен достаточно большой опыт прогностических режимных магнитотеллурических наблюдений для исследования геодинамических процессов, происходящих в недрах Земли перед землетрясением или во время него. Исследователями разных стран получены интересные практические результаты построения надежных геоэлектрических моделей сейсмоактивных зон на основе выполненных

магнитотеллурических зондирований. Известно гораздо меньше примеров проведения экспериментальных электромагнитных исследований, ориентированных на мониторинг геодинамических процессов в сейсмоактивных регионах. На большинстве геодинамических полигонов осуществляются наблюдения различных характеристик магнитотеллурического поля с целью использования их в качестве прогностических параметров. При этом в качестве возможного прогностического параметра обычно используют магнитотеллурическое кажущееся сопротивление. Вопрос об эффективности применения МТ-кажущегося сопротивления в качестве прогностического параметра остаётся открытым в связи с противоречивостью имеющихся экспериментальных результатов. Рассмотрим более подробно некоторые практические примеры электромагнитных наблюдений, связанные с мониторингом геодинамических процессов в земной коре сейсмоактивных регионов и поиском электромагнитных предвестников сейсмических событий.

Низкочастотный магнитотеллурический мониторинг в Северном Тянь-Шане. В работе [4] представлены практические результаты непрерывных режимных наблюдений 5 компонент МТ-поля, которые были начаты в 1992 г. на Бишкекском прогностическом полигоне Института высоких температур РАН в Киргизии. Измерения проводились на одном из стационарных пунктов наблюдений с помощью модифицированной цифровой автоматизированной измерительной станции. Измерения магнитного поля осуществлялись магнитостатическими датчиками, а в качестве датчиков электрического поля использовались две электрические линии длиной 100 м, ориентированные в северном (E_y) и восточном (E_x) направлениях и заканчивающиеся неполяризуемыми электродами системы "Траверс". Дискретизация данных во времени была равна 10 с. С помощью цифровой фильтрации наблюдаемые данные разделялись на две полосы: высокочастотную – с максимальным периодом 1 ч, и низкочастотную – с периодами более одного часа.

Был предложен адаптивный алгоритм обработки наблюдаемых МТ-данных, позволяющий выделить временные зависимости передаточной функции и генерацию полей внутреннего происхождения. В его основе лежит связь между вариациями компонент МТ-поля в точке наблюдения на поверхности Земли, записанная во временной области в виде интегрального уравнения свертки:

$$E_x(t) = \int_0^{\infty} Z_x(t, \tau) H_x(t - \tau) d\tau + \int_0^{\infty} Z_y(t, \tau) H_y(t - \tau) d\tau + \Delta E_x(t).$$

Здесь запись $Z_{xx}(t, \tau)$ и $Z_{xy}(t, \tau)$ предусматривает возможность изменения передаточных функций во времени как за счет выходящих за рамки наложенных требований изменений возбудителя поля, так и за счет вариаций геоэлектрического разреза, а дополнительное слагаемое $\Delta E_x(t)$ описывает вклад электромагнитных полей стороннего происхождения. Аналогичный вид имеет и уравнение для выражения $H_z(t)$. С помощью этого алгоритма были получены данные режимных наблюдений за 1993 г. в полосе периодов до одного часа.

В целом, суточные реализации количественно характеризуются величиной относительного среднеквадратического отклонения (СКО) наблюдаемого поля от синтезированного (в отношении к синтезированному). Для первых наблюдений 27 октября 1993 г. СКО составило 30,5%. Как и на суточных, месячные реализации для вертикальной компоненты магнитного и одной из горизонтальных компонент электрического (E_x) полей, демонстрируют неплохое подавление полей ионосферного происхождения (СКО = 27,8%). Аномальное электрическое поле практически равно внешнему теллурическому полю (СКО = 98,2%). Аномальные поля (ΔB_z и ΔE_x) как и на суточных реализациях, слабо коррелируют с внешними полями (ΔB_{zs} и ΔE_{xs}). Интересной особенностью аномальных полей является наличие в них суточной гармоника (особенно в электрическом поле). Поскольку исходный спектр вариаций ограничен со стороны больших периодов одним часом, ее появление на огибающей может быть связано с модуляцией поля какими-то нелинейными процессами. Как и в случае суточных реализаций, электрическое поле характеризуется более высокой степенью возмущенности динамических разрезов и остаточного электрического поля по сравнению с магнитным.

В результате выполненных работ был создан прообраз компьютеризированного технологического комплекса магнитотеллурического мониторинга геодинамических процессов, позволяющего на основе режимных наблюдений естественного электромагнитного поля Земли одновременно получать в квазиреальном времени независимую и объективную информацию как об изменениях геоэлектрического разреза, так и о генерируемых внутри Земли электромагнитных полях. Экспериментальные материалы, полученные в течение нескольких лет использо-

вания такого комплекса на Бишкекском геодинамическом полигоне, показали высокую информативность его выходных данных с точки зрения слежения за геодинамическими процессами и выявления корреляционных связей изменений геоэлектрического разреза и полей внутреннего происхождения.

Электромагнитный мониторинг сейсмоактивных зон Тянь-Шаня в широком частотном диапазоне. Работами Научной станции РАН [5, 6] было показано, что наблюдаемые изменения электросопротивления, как правило, связаны не с процессами, происходящими в очаге будущего сейсмического события, а отражают процесс упругопластического деформирования геосреды, протекающий на исследуемой территории, который может реализоваться, а может и не реализоваться сейсмическим событием. Сейсмический процесс на территории локальной сейсмогенерирующей зоны является составной частью сейсмического процесса на территории всего Среднеазиатского региона. Было также отмечено, что распределение гипоцентров сейсмических событий в конкретной сейсмогенерирующей зоне обусловлено глубинным строением территории и, в частности, наличием в разрезе разуплотненных горизонтов, которые хорошо выделяются с помощью глубинных электромагнитных зондирований и сейсмологических наблюдений. Они проявляются в виде проводящих горизонтов и слоев с пониженными значениями сейсмических скоростей (волноводов), которые в большинстве случаев согласуются с проводящими горизонтами.

На территории Бишкекского геодинамического полигона, который является частью Северо-Тяньшаньской сейсмогенерирующей зоны, с 1984 г. проводятся режимные зондирования методом становления поля с использованием мощных источников тока в диапазоне глубин от первых километров до 25 км [7]. В результате было получено распределение зон аномального изменения сопротивления в земной коре на исследуемой территории перед локальными землетрясениями. При этом на отдельных пунктах наблюдения максимальные по амплитуде изменения сопротивления предшествовали наиболее сильным землетрясениям, а на других пунктах вариации электросопротивления отсутствовали. Был сделан вывод, что контрастность изменений электросопротивления максимальна в глубоких горизонтах земной коры и это обусловлено тем, что напряженно-деформационные процессы на этих горизонтах протекают наиболее интенсивно,

т.е. источник, возбуждающий эти процессы, необходимо искать в низах коры.

В 2003 г. Научная станция РАН в Бишкеке и канадская компания “Феникс Геофизикс” (Торонто) совместно установили две широкополосные станции Феникс MTU-5D [8] для магнитотеллурического мониторинга в пунктах Аксу и Чон-Курчак, расположенных на территории Бишкекского геодинамического полигона [9, 10]. Основная задача эксперимента по магнитотеллурическому мониторингу – дополнение режимных электромагнитных наблюдений методом становления поля информацией о динамике геоэлектрического разреза в интервале глубин нижней коры и верхней мантии (25–100 км), а также выявление возможной связи магнитотеллурических параметров и сейсмической активности исследуемого региона.

В результате полевого эксперимента по электромагнитному мониторингу сейсмоактивных зон Северного Тянь-Шаня была создана база данных, включающая как магнитотеллурические поля и их трансформации, определяемые в ходе измерений с помощью широкополосной аппаратуры Феникс MTU-5, так и соответствующие параметры сейсмической активности исследуемого региона (например, величина магнитуды сейсмического события, удаленность от эпицентра землетрясения). Полная база данных, которая использовалась для исследований, формировалась с помощью каталога сейсмических событий KNET с 2004 по 2006 г. и соответствующих им трансформаций MT-поля, измеренных в пункте Аксу. С помощью нейросетевого подхода, а именно, метода обратного распространения ошибки на основе многоуровневого персептрона, был выполнен поиск корреляционных связей между сейсмической активностью по каталогу KNET и трансформациями MT-поля в пункте мониторинга Аксу [11, 12]. Исследования показали, что для нахождения корреляции сейсмической активности и магнитотеллурических параметров наиболее информативным является диапазон периодов 0,012–25 сек. Было также установлено, что кажущиеся сопротивления обнаруживают корреляции с сейсмической активностью, при этом минимальные значения ошибок распознавания нейронных сетей получены при одновременном использовании ху- и ух-компонент кажущихся сопротивлений.

Для дальнейших исследований был построен базовый геоэлектрический одномерный разрез на основе имеющейся априорной геолого-геофизической информации и инверсии

усредненной эффективной кривой кажущегося сопротивления для пункта Аксу. Была исследована возможность предсказания сейсмической активности (а именно класса сейсмического события и удаленности от эпицентра до точки МТ мониторинга) с помощью нейросетевого подхода. Для прогноза на входе нейросети использовались как вариации кажущегося сопротивления, так и временная динамика геоэлектрического разреза в пункте мониторинга. Как показали исследования с обучением и тестированием нейронных сетей, изменения в кажущихся сопротивлениях гораздо хуже коррелируют с сейсмическими событиями, чем изменения истинных сопротивлений разреза. Прогноз сейсмической активности по динамике геоэлектрического разреза не показал конкретных результатов, но позволил надеяться, что при расширении обучающей выборки по количеству дней, соответствующем выборе как входных, так и выходных параметров, результативность прогноза сейсмической активности может быть улучшена.

Электромагнитный мониторинг и поиск предвестников землетрясений на Камчатке. В работе [13] приведены результаты мониторинга вариаций геомагнитного поля на Камчатке. В обсерватории “Паратунка” в течение многих десятилетий осуществляются наблюдения геомагнитного поля в виде компонент H , D , Z . Эти компоненты последнее время регистрируются с дискретностью 1 с с помощью цифровой геомагнитной станции. С помощью этих экспериментальных данных были рассчитаны параметры индукционной матрицы Визе–Паркинсона, векторы индукции и коэффициенты когерентности между вертикальной и горизонтальными составляющими геомагнитного поля. Индукционные матрицы получены в широком диапазоне периодов в результате обработки непрерывных наблюдений геомагнитного поля за период 2001–2003 гг. Поведение исследуемых компонент определяется латеральными и вертикальными геоэлектрическими неоднородностями среды. О характере их влияния на различных частотах можно судить из поведения магнитных полярных диаграмм. Форма и ориентация полярных диаграмм в диапазоне коротких периодов, вероятно, обусловлена влиянием геоэлектрических неоднородностей, связанных со сложными очертаниями береговой линии, а в диапазоне длинных периодов диаграммы вытянуты вкост простираения Курило-Камчатского глубоководного желоба, представляющего собой двухмерную геоэлектрическую неоднородность.

Был также рассмотрен вопрос о связи вектора индукции с землетрясениями. Были сопоставлены временные ряды вектора индукции на различных периодах с моментами сильных землетрясений с $K \geq 13$ на эпицентральных расстояниях до 150 км от обсерватории “Паратунка”. В качестве примера выбирались моменты таких землетрясений на периодах $T = 6000$ и 3000 с, на которых в лучшей мере проявились годовые вариации. В результате анализа не удалось выявить эффекты, связанные с землетрясениями. Возможно, это обусловлено тем, что за рассматриваемый период в районе Камчатки не было землетрясений сильнее $K = 14.1$. Таким образом, по результатам многолетних наблюдений исследователям геомагнитного поля на Камчатке не удалось выявить взаимосвязи исследуемых компонент матрицы Визе–Паркинсона и параметров векторов индукции в низкочастотном интервале с сейсмическими событиями.

Влияние лунно-солнечных приливных деформаций на электропроводность и флюидный режим земной коры Кольского полуострова. Исследователями под руководством А.А. Жамалетдинова было экспериментально исследовано влияние лунно-солнечных приливных деформаций на электропроводность земной коры юго-западной части Кольского полуострова [14]. Следует отметить, что очень большое значение имеют изменения электропроводности, вызванные влиянием достаточно хорошо изученных деформационных процессов, а таковыми являются твердые приливы Земли, для оценки чувствительности мониторинговой системы к изменению напряженно-деформированного состояния геосреды. Эксперимент по электромагнитному мониторингу осуществлялся с помощью мощного источника сверхнизкочастотного излучения “Зевс” в условиях сильного превышения полезного сигнала над помехой. Измерения проводились в июне 1998 г. на полигоне Аввагуба, расположенном на юго-западной части Кольского полуострова, на удалении 180 км от источника. Использовалась излучающая антенна “Зевс”, которая представляет собой заземленную линию электропередачи длиной 60 км, ориентированную в широтном направлении. В антенну подавался ток силой 300 А на частоте 83,3 Гц отдельными сериями по 6 мин через каждые 30 мин в течение 2-х суток. Станцией частотно-зондирования СЧЗ-95 измерялись 4 компоненты – 2 электрические (E_x , E_y) и 2 магнитные (H_x , H_y). По результатам исследований была выявлена четкая взаимосвязь между теоретической

кривой изменения вертикальной компоненты приливных деформаций dH и экспериментальными изменениями кажущихся сопротивлений (ρ_T) и фаз импедансов. Причем воздыманию рельефа (приливу) соответствует уменьшение ρ_T , а опусканию – рост ρ_T . Связь фазовых кривых с приливыми деформациями проявляется более отчетливо и имеет прямую пропорциональную зависимость. Результаты исследований показали, что возрастанию кажущегося сопротивления соответствует уменьшение фазы, а уменьшение ρ_T сопровождается ростом фазы. В исследуемом районе суточные изменения кажущегося сопротивления и фазы имеют индукционную природу и охватывают всю толщу земной коры до глубины $H = 7-8$ км.

Результаты электромагнитного мониторинга позволяют сделать вывод о том, что при воздымании земной коры под действием приливов происходит уменьшение ее удельного электрического сопротивления в верхнем слое мощностью порядка 7–8 км, а в фазе сжатия происходит увеличение сопротивления в слое такой же мощности. Основным информативным параметром в исследованиях была электромагнитная реакция среды на приливные деформации, которая определяется коэффициентом тензочувствительности электросопротивления (КТЭ). Полученные значения КТЭ для полигона Авва-Губа составили $2.3 \cdot 10^5$ отн. ед. по широтной и 10^5 отн. ед. по меридиональной компоненте и совпадают по порядку со средними значениями КТЭ, установленными по измерениям электромагнитных откликов от землетрясений с магнитудой 3–3.5 балла на удалении 10–15 км от их эпицентров. Таким образом, возможность детектирования приливных деформаций, вероятно, определяет минимально допустимый порог разрешающей способности в системе электромагнитного мониторинга с точки зрения выявления взаимосвязи вариаций электрического сопротивления с сейсмической активностью.

Анализ электромагнитных полей перед сильными землетрясениями в Спитаке и Loma Prieta. Рассмотрим результаты широко развернутых за последние десятилетия исследований по поиску краткосрочных электромагнитных предвестников землетрясений, проявляющихся за несколько дней или часов до начала сейсмического события. Перспективным подходом в этом направлении является регистрация низкочастотных электромагнитных сигналов в ультранизком частотном (УНЧ) диапазоне (0,001–10 Гц). Наиболее удачными примерами таких электромаг-

нитных исследований в УНЧ диапазоне с точки зрения поиска возможных предвестников, можно считать результаты, полученные во время сильных землетрясений в Спитаке (Армения, 1988 г., $M = 6.9$) и Loma Prieta (США, 1989 г., $M = 7.1$) [15]. Характеристики эмиссий магнитного поля в УНЧ диапазоне были получены в двух магнитных обсерваториях Грузии на станции Душети (128 км от эпицентра) до и после землетрясения в Спитаке. Было замечено аномальное поведение низкочастотных электромагнитных сигналов перед этим землетрясением. Амплитуда в низкочастотной области возросла за 3–5 дней перед землетрясением, а значительный всплеск УНЧ эмиссии был замечен за 4 часа перед событием. Амплитуда оставалась высокой в течение двух недель и после основного события.

Землетрясение в районе Loma Prieta было изучено на станции Corralitos в 7 км от эпицентра. В результате исследований за 12 дней перед основным событием была выявлена мощная низкочастотная (0,01 Гц) аномалия амплитуды, с увеличением примерно в 30 раз по сравнению с нормальной амплитудой (рис. 1). В диапазоне 0,01–0,5 Гц был замечен большой уровень активности приблизительно за три часа до землетрясения. После землетрясения высокая низкочастотная активность наблюдалась в течение нескольких месяцев, в том числе из-за большого количества афтершоков и магнитных бурь.

Исследование двух умеренно сильных землетрясений в префектуре Kagoshima с использованием УНЧ диапазона. Еще одним интерес-

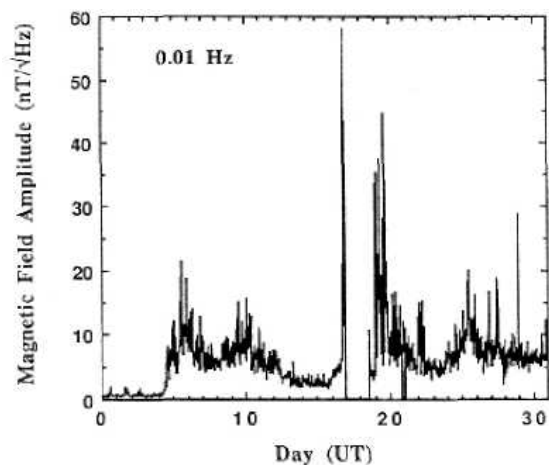


Рис. 1. Вариации полевых измерений магнитного поля на частоте 0,01 Гц по станции Corralitos в октябре 1989 года.

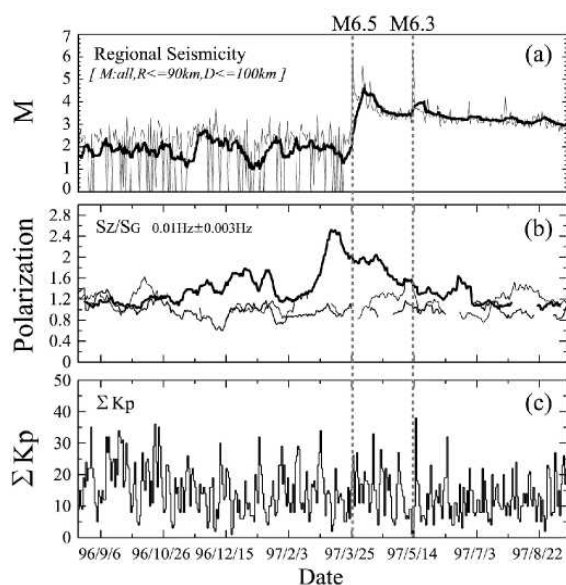


Рис. 2. Изменения поляризации в диапазоне 0,01 Гц: а – выделенная сейсмическая энергия в единицах магнитуды; б – S_z/S_g – изменение поляризации; в – суммарные Kp индексы. Толстой линией представлены сглаженные 10-дневные вариации поляризации.

ным примером регистрации магнитного поля УНЧ диапазона в момент землетрясения можно считать результаты, приведенные в работе [16]. Здесь были исследованы два умеренно сильных землетрясения, зафиксированные на северо-западе префектуры Kagoshima. Землетрясения были зафиксированы 26 марта 1997 г. с магнитудой $M = 6.5$ и 13 мая 1997 г. с магнитудой $M = 6.3$. Измерения производились на расстоянии 60 км от эпицентров землетрясений с помощью трехкомпонентного феррозондового магнитометра с частотой дискретизации 1 Гц. Результаты исследований представлены на рис. 2.

На основе измерений магнитного поля определялись значения параметра поляризации S_z/S_g , как отношение спектральных плотностей мощности вертикальной компоненты магнитного поля к суммарной горизонтальной. На рис. 2b показаны графики изменения параметра поляризации на трех станциях. Толстая линия – обсерватория Tagumizu, тонкие линии – обсерватории на острове Chichi-jima на расстоянии 1200 км и на острове Дарвин в Австралии (геомагнитный сопряженный пункт). На рис. 2 хорошо видно, что поляризация имеет четкий предвестниковый всплеск в обсерватории Tagumizu прибли-

зительно за месяц до сейсмического события. Отсутствие подобных резких изменений на двух других станциях подтверждает предположение о том, что аномальное поведение поляризации соотношения в Tagumizu связано с землетрясениями в Kagoshima, а не с изменением геомагнитной активности.

Сравнение методов обработки УНЧ данных для исследования сильного землетрясения в Guam. Применение различных методов анализа сигналов по УНЧ данным для изучения землетрясения Guam в 1993 г. было проанализировано в работе [17].

Деформированный неоднородный материал геосреды характеризуется образованием и соединением микротрещин непосредственно перед разрушением. Были рассмотрены два физических явления, которые наиболее информативно отражают процесс образования микротрещин в фокальной зоне: 1) УНЧ-электромагнитная эмиссия и 2) акустическая эмиссия. Основная задача исследователей состояла в выявлении микротрещин по записям УНЧ-эмиссий, которые образуются непосредственно перед событием в фокальной зоне землетрясения. Ранее характерные предвестники землетрясений в УНЧ диапазоне проявлялись в периоды от нескольких недель до нескольких дней перед мощными землетрясениями, такими как Спитак, Loma Prieta, Guam, Biak и т.п. Предвестники землетрясений образуются в фокальной зоне и распространяются до расположенных на поверхности УНЧ датчиков. Поскольку динамика землетрясений может быть представлена свойствами, которые являются характеристиками процесса самоорганизованной критичности, то была сделана первая попытка использовать фрактальный анализ для сейсмогенных УНЧ-эмиссий как нелинейный процесс для землетрясения Guam. Было выполнено сравнение результатов исследований двумя различными методами УНЧ-электромагнитных данных, включая и время землетрясения Guam – август 1993 года: 1) моно-фрактальный анализ и 2) спектроскопия фликкер-шума. Этот вид сравнения результатов исследований различными методами наблюдаемых данных, позволяет производить проверку надежности полученных результатов, и делать выводы о процессах, происходящих в литосфере. При сравнении результатов исследований с помощью этих методов были сделаны следующие выводы:

1. Данные за один год наблюдений (с января по декабрь 1993 г.) были проанализированы во временном интервале $\pm 1,5$ года от момента

землетрясения. Отчетливо видно, что некоторые существенные эффекты имели место в периоды времени, близкие к землетрясению.

2. Можно считать, что предвестниковые эффекты начинаются за три месяца до землетрясения, а процессы преобразования среды, по-видимому, происходят в интервале: три месяца до землетрясения и несколько месяцев после него.

3. Оба метода обработки имеют хорошо согласующиеся результаты по поиску предвестников землетрясений в литосфере на периоде от трех месяцев перед землетрясением, до самого землетрясения. Спектроскопия фликкер-шума указывает на 5 всплесков перед землетрясением (101, 78, 54, 31 и 8 день перед землетрясением), и во время этих всплесков было замечено значительное увеличение моно-фрактального параметра.

4. Некоторые из всплесков спектроскопии фликкер-шума по всей вероятности могут указывать на ступенчатые изменения в литосфере непосредственно перед землетрясением в соответствии с процессом самоорганизованной критичности.

Применение УНЧ данных для исследования роя землетрясений в районе полуострова Izu. Применение УНЧ данных для исследования роя землетрясений представлено в работе [18]. Геомагнитные данные регистрировались с 1 февраля по 25 июля 2000 г. двумя сетями, расположенными на полуостровах Izu и Boso. Каждая сеть состояла из трех магнитных станций, оборудованных трехкомпонентными торсионными магнитометрами, работающими с частотой дискретизации 50 и 12,5 Гц, и системы GPS для синхронизации данных. Конфигурация сети напоминает треугольник с расстояниями между станциями 5–8 км. Среднее расстояние от эпицентра роя землетрясений составило около 80–100 км для сети Izu, и около 130–150 км для сети Boso. В рое землетрясений было пять событий с магнитудой $M > 6$. Детальный статистический анализ показал общее количество толчков порядка 7000 с магнитудой $M \geq 3$ и очень большой суммарной сейсмической энергией. Для анализа были выбраны четырехчасовые ночные записи (00:00–04:00), полученные двумя магнитными сетями в 5 частотных поддиапазонах, суммарно покрывающие интервал частот $f = 0,001–0,3$ Гц.

В результате исследований поведения геомагнитной активности в УНЧ диапазоне, предшествующей рою землетрясений в районе полуострова Izu летом 2000 г., были выявлены достойные внимания уменьшения поляризации в высоких частотных диапазонах (0,03–0,1 и

0,1–0,3 Гц), начинающиеся непосредственно перед роом, и небольшое увеличение на низких частотах (0,003–0,01 и 0,01–0,03 Гц) приблизительно за один месяц перед роом землетрясений.

Промышленные шумы, как правило, намного выше, чем естественный сигнал, но электромагнитная эмиссия ассоциируется с сейсмическими событиями. Поэтому, необходима дополнительная обработка результатов для разделения УНЧ-эмиссии.

Характерные УНЧ предвестники сильного землетрясения в районе “Chi-Chi” на острове Тайвань. Еще один удачный пример использования УНЧ геомагнитных данных для выявления возможных предвестников землетрясений представлен в работе [19]. В ней рассматривается сильное землетрясение с магнитудой $M = 7.6$, которое произошло в районе города Chi-Chi на острове Тайвань 21 сентября 1999 г. в 01:47 по местному времени. Его эпицентр располагался примерно в 120 км от обсерватории Lunping, где производились измерения магнитного поля. Измерения осуществлялись трехкомпонентным феррозондовым магнитометром с частотой дискретизации 1 с.

При наблюдении за поведением геомагнитных компонент на различных частотах были выявлены значительные изменения на частоте 0,01 Гц. Эта частота известна как одна из основных характеристик сейсмических УНЧ эмиссий. По изменениям параметра поляризации на этой характерной частоте 0,01 Гц видно, что значительное увеличение поляризации началось за два месяца перед землетрясением и ее значение оставалось высоким непосредственно до самого землетрясения (рис. 3).

По результатам исследований можно вывод о том, что выявленные вариации параметра поляризации перед землетрясением Chi-Chi и их временные изменения могут с большой долей

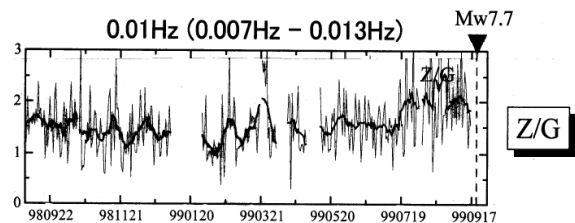


Рис. 3. Временные изменения поляризации (Z/G) в диапазоне частот 0,007–0,013 Гц в течении всего анализируемого периода.

вероятности являться предвестниковыми признаками.

Выводы. Из представленного обзора следует, что в целом в мировой практике электромагнитных исследований существует не очень большое количество результативных примеров проведения экспериментальных магнитотеллурических исследований для мониторинга геодинамических процессов в сейсмоактивных регионах. Наиболее перспективные результаты в этом направлении получены с помощью регистрации низкочастотных электромагнитных сигналов в УНЧ диапазоне. Так за 2–4 часа до начала землетрясений в Спитаке и Loma-Prietta и в ряде других случаев наблюдалось резкое возрастание параметров УНЧ электромагнитных шумов на эпицентральных расстояниях до 100 км. Однако попытки объяснить, например, высокую амплитуду этих сигналов натолкнулись на ряд трудностей.

Следует отметить, что во всех рассмотренных примерах электромагнитного мониторинга отсутствует увязка представленных результатов со знанием внутреннего строения исследуемого региона, которое может быть получено с помощью детальной магнитотеллурической съемки. По-видимому, недостаточно развитая методика интерпретации данных магнитотеллурического мониторинга не позволяет еще в полной мере оценить возможности магнитотеллурического метода, и, как следствие, сдерживает его эффективное применение. С другой стороны, результаты ряда экспериментов по электромагнитному мониторингу, рассмотренные в данном обзоре, достаточно убедительно демонстрируют информативность магнитотеллурических данных для оценки изменений состояния геосреды в средние и долгосрочных временных масштабах.

Литература

1. Иванов А.Г. Сейсмoeлектрический эффект 1 рода в приэлектродных областях // ДАН СССР. 1949. Т. 68. № 1. С. 53–56.
2. Иванов А.Г. Сейсмoeлектрический эффект 2 рода // Изв. АН СССР. Сер. географ. и геофиз. 1940. № 5. С. 699–727.
3. Соболев Г.А. Основы прогноза землетрясений. М.: Наука, 1993. 312 с.
4. Светов Б.С., Каринский С.Д., Кукса Ю.И., Одинов В.И. Магнитотеллурический мониторинг геодинамических процессов // Физика Земли. 1997. № 5. С. 36–46.
5. Волыхин А.М., Брагин В.Д., Zubovich A.B. и др. Проявления геодинамических процессов в геофизических полях. М.: Наука, 1993. 158 с.
6. Брагин В.Д. Активный электромагнитный мониторинг территории Бишкекского прогностического полигона: Дисс... канд. физ.-мат. наук. М.: ОИВТРАН, 2001. 135 с.
7. Брагин В.Д., Мухаммадеева В.А. Изучение пространственно-временного распределения деформаций в земной коре на территории Бишкекского геодинамического полигона электромагнитными методами // Геодинамика внутриконтинентальных орогенов и геозоологические проблемы. Москва–Бишкек, 2009. С. 85–94.
8. Fox L. Satellite-Synchronized 3-D Magnetotelluric System. U.S. Patent No. 6 191 587 B1. issued February 20. 2001.
9. Rybin A., Batalev V., Fox L., Ingerov A., Schelochkov G. Magnetotelluric monitoring experiment in the Northern Tien Shan seismogenic zone: first results // Вестник КРСУ. 2006. Т. 6. №3. С. 87–94.
10. Rybin A., Batalev V., Bataleva E., Matukov V. Magnetotelluric monitoring experiment at the Northern Tien Shan seismogenic zone. Abstracts-CD-106-TUE-P1700-0600. 11th Scientific Assembly IAGA. Sopron. Hungary. August 23–30, 2009.
11. Спичак В.В., Попова И.В., Рыбин А.К., Матюков В.Е., Гойдина А.Г. Корреляция между сейсмической активностью Северного Тянь-Шаня и динамикой магнитотеллурического поля // Геодинамика внутриконтинентальных орогенов и геозоологические проблемы: Матер. 4 Межд. симп., 15–20 июня 2008 г. Бишкек : НС РАН, 2008. С. 214.
12. Матюков В.Е., Спичак В.В., Рыбин А.К., Попова И.В., Баталев В.Ю., Баталева Е.А. Применение нейросетевого подхода для анализа корреляции магнитотеллурических параметров с сейсмической активностью региона Северного Тянь-Шаня. Прогноз землетрясений, оценка сейсмической опасности и сейсмического риска Центральной Азии // Тез. 7-го казахско-китайского межд. симп. Алматы, 2010. С. 47.
13. Мороз Ю.Ф., Смирнов С.Э., Мороз Т.А. Результаты мониторинга вариаций геомагнитного поля на Камчатке // Физика Земли. 2006. №3. С. 49–56.
14. Жамалетдинов А.А., Митрофанов Ф.П., Токарев А.Д., Шевцов А.Н. Влияние лунно-солнечных приливных деформаций на электрическую проводимость и флюидный режим земной коры // Докл. Академии наук. 2000. Т. 371. № 2. С. 235–239.
15. Molchanov O.A., Kopytenko Yu.A., Voronov P.M., Kopytenko E.A., Matiashvili T.G., Fraser-Smith A.C., and Bernardi A. Results of ULF magnetic field measurements near the epicenters of

- the Spitak ($M_s=6.9$) and Loma Prieta ($M_s=7.1$) earthquakes: Comparative analysis // Geophysical research letters. 1992. Vol. 19. № 14. P. 1495–1498.
16. *Hattori K., Takahashi I., Hayakawa M., Isezaki N., Yumoto K., Nagao T. and Uyeda S.* ULF Geomagnetic Changes Associated with Crustal Activity: Summary of RIKEN-NASDA Project and the Latest Results. Papers of Technical Meeting on Electromagnetic Compatibility. 2003. Vol. EMC-03. № 25–30. P. 23–28.
 17. *Ida Y., Hayakawa M., and Timashev S.* Application of different signal analysis methods to the ULF data for the 1993 Guam earthquake // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 2007. № 7. P. 479–484.
 18. *Kotsarenko A., Molchanov O., Hayakawa M., Koshevaya S., Grimalsky V., Perez Enriquez R., and Lopez Cruz-Abeyro J. A.* Investigation of ULF magnetic anomaly during Izu earthquake swarm and Miyakejima volcano eruption at summer 2000 // Japan Natural Hazards and Earth System Science. 2005. Vol. 5. P. 63–69.
 19. *Akinaga Y., Hayakawa M., Liu J. Y., Yumoto K., and Hattori K.* A precursory ULF signature for the Chi-Chi earthquake in Taiwan // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 2001. № 1. P. 33–36.