

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОИСКОВ И РАЗВЕДКИ

УДК 550.343+551.1

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВАРИАЦИЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ
ПРИ ФОРМИРОВАНИИ РАЗРЫВА ПО РАЗЛОМУ ПЕРЕД ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕМ**

М.И. ШИМЕЛЕВИЧ¹, Е.А. ОБОРНЕВ¹, И.С. ФЕЛЬДМАН², В.А. НОВИКОВ²

*¹Российский государственный геологоразведочный университет
117997, Россия, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д.23; e-mail: office@mgri-rggru.ru*

*²Объединенный институт высоких температур, РАН
125412, Россия, г. Москва, улица Ижорская, дом 13, строение 2; e-mail: eugenyo@mail.ru*

Разработана двумерная (2D) геоэлектрическая модель гетерогенной геосреды с учётом представления о процессах, происходящих в геологическом объекте типа флексура, которая в результате деформаций превращается во взброснадвиговую структуру. В основу модели положена гипотеза об изменении проводимости геоматериалов в локальной зоне разлома в субкритическом напряжённо-деформированном состоянии вследствие геодинамических процессов. В области максимума сдвигового напряжения на плоскости разрыва взброснадвигового типа развивается зона повышенной трещиноватости, способствующей существенному уменьшению сопротивления за счёт заполнения трещин флюидом — так называемая проводящая щель. В результате численного моделирования показано, что при переходе от квазислоистой модели к двумерной с высокоомным экраном перераспределение плотности полного тока в среде, с учётом предполагаемых представлений о формировании зоны трещиноватости, существенно увеличивается за счёт эффекта «проводящей щели». При этом амплитуда электромагнитного (ЭМ) поля для продольной поляризации возрастает на большом удалении от зоны «проводящей щели». Полученный результат может являться основанием для разработки методики мониторинга электромагнитных полей, измеряемых на поверхности земли на удалении от эпицентра очага землетрясения и непосредственно над разломом, с целью контроля степени готовности разлома к возникновению сейсмического события.

К л ю ч е в ы е с л о в а: электромагнитное поле; численное моделирование; геоэлектрическая 2D модель; геодинамические процессы.

**NUMERICAL SIMULATION OF THE ELECTROMAGNETIC FIELDS VARIATIONS
AT THE FORMATION OF THE FAULT RUPTURE BEFORE EARTHQUAKE**

M.I. SHIMELEVITCH¹, E.A. OBOORNEV¹, I.S. FELDMAN², V.A. NOVIKOV²

*¹Russian State Geological Prospecting University
117997, Russia, Moscow, Miklouho-Maklay's street, 23; e-mail: office@mgri-rggru.ru*

*²Joint Institute for High Temperatures of Russian Academy of Sciences (JIHT)
125412, Russia, Moscow, Izhorskaya st. 13, bd.2; e-mail: eugenyo@mail.ru*

A 2D geoelectric model of a heterogeneous geological medium has been developed taking into account the processes occurred in the geological subject of flexure type which transforms into an uplift-thrust structure as a result of deformations. The model is based on a hypothesis of the variation of electrical conductivity of geomaterials in the local area of the fault under subcritical stress-state conditions due to the geodynamical processes. In the shear stress maximum area, in the plane of fracture of the uplift-thrust type, a zone of increased fracturing is developed contributing to the essential decrease of electric resistance due to filling the fractures by fluid — so named «conductive split». A numerical simulation has demonstrated that when transiting from the quasi-stratified model to a 2D model with the

high-resistive shield a redistribution of the total current density in the medium is increased essentially due to the effect of the «conductive split», taking into account the assumed formation of the zone of fracturing. In this case, amplitude of the electromagnetic (EM) field for the longitudinal polarization increases far apart from the area of the «conductive split». The result obtained may be applied as a background for the development of the monitoring technique of the electromagnetic fields measured on a surface of the Earth far apart from the earthquake epicenter and directly over the fault for the controlling of a level of the fault maturity for the occurrence of the seismic event.

Keywords: electromagnetic field; numerical simulation; 2D geoelectric model; geodynamic processes.

С учётом современного развития цивилизации, возникновения мегаполисов и крупных опасных промышленных комплексов сильные землетрясения, приводящие к многочисленным человеческим жертвам и колоссальным материальным потерям, представляют собой вызов современному мировому сообществу. Наряду с долгосрочным и среднесрочным прогнозами землетрясения, результаты которых используются в сейсмостойком строительстве и планировании развития инфраструктуры, наиболее актуальным является краткосрочный прогноз (недели—дни—часы), в результате которого возможна эвакуация людей и переход в режим ожидания сейсмической катастрофы, включая перевод опасных производств в безопасный режим эксплуатации. Поскольку во время сильных землетрясений выделяется огромное количество сейсмической энергии, то многие исследователи полагают, что её накопление, особенно в субкритическом состоянии сейсмогенного разлома, не может произойти незаметно, и должны наблюдаться определённые физические явления, которые рассматриваются в качестве предвестников. В настоящее время во многих сейсмоопасных регионах созданы долговременно и непрерывно работающие системы мониторинга различных геофизических полей, однако пропуск всех сильнейших землетрясений 21 в., включая великое японское землетрясение Тохоку 11 марта 2011 г., указывает на провал данного подхода [1]. Особенно ярким примером неудачи краткосрочного прогноза является Паркфилдский эксперимент (Калифорния, США), когда землетрясение M6, ожидаемое в 1993 г., произошло в 2004 г. практически без предвестников, хотя в этом регионе было специально сосредоточено уникальное количество геофизической аппаратуры, способной регистрировать все известные к настоящему времени краткосрочные предвестники землетрясений [6].

Очевидным является то, что исследователям до сих пор не удалось выделить предвестники конкретных землетрясений. Наблюдавшиеся локальные аномалии различных полей перед землетрясениями отражали другие процессы, которые ошибочно отождествляли с процессами подготовки крупномасштабных разрывов. Такая ситуация характерна и для электромагнитных предвестников землетрясений, которые в ряду событий, предшествующих сейсмическому толчку, занимают одно из ведущих мест. В конце прошлого века появля-

лось множество публикаций об аномальных вариациях геомагнитного поля перед землетрясениями, но после детального анализа было показано, что они не связаны с процессами в очаге землетрясения, а вызваны другими источниками [7].

Отсутствие в настоящее время методики краткосрочного прогноза сейсмических катастроф обусловлено недостаточным пониманием физики процессов, происходящих в очаге землетрясения, которые могут являться источником вариаций геофизических полей, рассматриваемых в качестве предвестников. Очень часто сильные вариации геофизических полей перед землетрясением в виде хорошо выделяемых на фоновом уровне пульсаций или бухтообразных изменений априори объявляются как предвестники без должного физического обоснования. Попытки физического объяснения появления таких предвестников обычно делаются на феноменологическом уровне, при этом детальное рассмотрение таких физических моделей и механизмов с численными оценками показывают их несостоятельность с точки зрения возможности мониторинга электромагнитных сигналов, генерируемых в очаге землетрясения, на поверхности земли [9].

Авторами предлагается другой подход к анализу, который базируется на исследованиях [4, 5, 11], возможных электромагнитных предвестников землетрясения. В начале рассматривается геологическая структура (например, флексура), геоэлектрическое строение которой характерно для областей с высокой сейсмической активностью. Затем на основе полевых и лабораторных наблюдений деформационных процессов в очаге землетрясения рассматривается поведение этой геологической структуры в заключительный период подготовки сейсмического события (формирование проводящих зон в сейсмогенном разломе). С использованием такой физической модели разрабатывается математическая модель процесса возникновения электромагнитного предвестника и проводится численное исследование возможности его мониторинга на поверхности земли.

Физическая модель

Результаты полевых наблюдений [10] и лабораторных экспериментов [8] показывают, что изменение проницаемости горных пород в зоне подготовки разрыва по разлому перед землетрясением

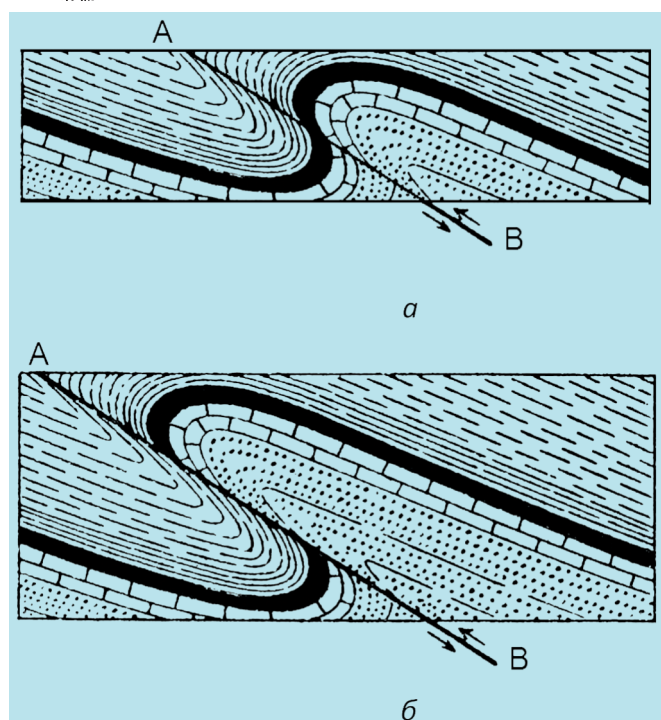


Рис. 1. Схематическая геологическая модель формирования разрыва сплошности среды — модель флексуры (*а*), которая превращается во взброснадвиг (*б*)

может влиять на флюидный режим в разломной зоне и, как следствие, вызывать вариации проводимости разлома и электромагнитного поля на поверхности земли перед сейсмическим событием. На основе анализа сейсмических и геоэлектрических разрезов земной коры сейсмоопасных регионов, за исходную геологическую модель формирования разрыва сплошности среды берётся модель флексуры, которая превращается во взброснадвиг (рис. 1).

В начальный момент формирования взброснадвига в области максимума градиента напряжения (линия АВ) возникает трещиноватость, что неизбежно приводит к заполнению трещин либо флюидом [2], при наличии свободной воды, либо более пластичными разностями таких пород, как глины, отложения солей, сланцы, особенно чёрные сланцы, обогащённые углеродистым веществом, которые создают хорошо проводящие плёнки, обеспечивая возможность скольжения по ним более жестких пластин.

При этом электрическое сопротивление в зоне трещиноватости уменьшается. В квазиодномерной среде эти изменения не будут существенны и малозаметны. Однако в двумерной модели, которая более адекватно описывает строение очага землетрясения и его развитие во времени, при обычно присутствующем высокоомном экране изменения структуры электромагнитного (ЭМ) поля естественного (ЕМПЗ) или искусственного источника будут весьма существенны. Весь ток, который эк-

ранировался 2D моделью для *H*-поляризации, тут же устремится в образовавшуюся щель. Количественно процесс регулируется величиной изменения поперечного сопротивления, которое зависит от объёма и связности образовавшихся проводящих трещин («щелевой» эффект). Данная модель может быть усложнена более точным заданием области трещиноватости и более детальным по времени описанием процесса разрушения и сдвига. Отдельно или в комплексе может быть поставлена задача триггерного эффекта и задача мониторинга сейсмического события. Для этого должны быть заданы некоторые обобщённые статистические или модельные коэффициенты (зависимости) связи между напряжением, прочностью, трещиноватостью, связной пористостью и поперечным сопротивлением.

Существование представленной модели базируется на анализе глубинных геофизической изученности сейсмогеоэлектрических разрезов, пересекающих сейсмоактивные зоны в различных регионах. Как правило, это зоны сопряжения глубоких предгорных прогибов и горно-складчатых сооружений, например, Предпатомский региональный прогиб, где в ряде случаев удается вскрыть подобные структуры глубокими скважинами (рис. 2, *а*).

Здесь на глубинах порядка от 1,7 до 2,2 км наблюдается перевернутый блок толщиной 700 м, который с точностью до морфологии каротажной кривой повторяет участок кривой в районе глубин 1,1–1,7 км, что однозначно доказывается комплексом каротажных и керновых данных и определением возраста и литологии вскрытых отложений. На рис. 2, *б* представлена интерпретационная геологическая модель надвига, вскрытого скважиной с флексурой, из материалов [3] геологической интерпретации строения Предпатомского регионального прогиба (осадочный чехол, Сибирская платформа).

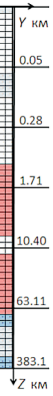
Численная модель и результаты вычислительного эксперимента

Нами рассматривается двумерная (2D) геоэлектрическая модель гетерогенной геосреды с учётом представления о процессах, происходящих в геологическом объекте типа флексура, которая в результате деформаций превращается во взброснадвиговую структуру (рис. 3). Данная структура имеет протяжённое простирание вдоль линии надвига, что отвечает условиям 2D моделирования.

В основу модели положена гипотеза об изменении проводимости геоматериалов в локальной зоне [4, 5] разлома в субкритическом напряженно-деформированном состоянии вследствие геодинамических процессов [7]. В области максимума сдвигового напряжения на плоскости разрыва



6



проведения мониторинговых зондирований

взбросо-надвигового типа развивается зона повышенной трещиноватости, способствующей существенному уменьшению удельного сопротивления за счёт заполнения трещин флюидом или хорошо проводящим материалом (далее эта область нами называется «проводящая щель»).

Для проведения вычислительного эксперимента, как показано в [11], предлагается рассмотреть два варианта геоэлектрической модели среды: базовый, который соответствует ненарушенному состоянию проводящих зон, и изменённый, где появляется зона трещиноватости и возникает «щелевой эффект», соединяющий глубинный проводящий слой — графитизированные сланцы (удельное сопротивление $\rho = 3 \text{ Ом м}$), с хорошо проводящей верхней частью разреза, осложнённой разломами и флюидонасыщенными, минерализованными блоками разной проводимости ($\rho = 10 \text{--} 100 \text{ Ом м}$).

Ось OY на рис. 3 направлена вдоль профиля (протяжённость 82,4 км), а ось OX поперёк профиля вдоль простираения «двумерности». Область «проводящей щели» в модели (увеличенный фрагмент слева на рис. 4) представляет собой тонкие субвертикальные структуры (на глубине от 0,9 км, мощностью до 2,36 км) чередования проводящих ($\rho = 3 \text{ Ом м}$) и экранирующих — $\rho = 1 \cdot 10^5 \text{ Ом м}$ элементов модели. Ширина ячеек конечно-разностной сетки модели по горизонтали меняется от 0,8 у краевых областей до 0,4 км в центральной части, а в зоне образования и открытия «проводящая щель» составляет 1 м. Таким образом, моделируются локальная группа параметров, по аналогии с исследованиями [4, 5], тонкие протяжённые разломные области, которые могут соответствовать глубинным зонам складчатости, где возникает или закрывается эффект типа «проводящей щели».

Основой предлагаемого исследования является использование в процессе моделирования и последующего «полевого» мониторинга стандартной аппаратуры и методики обработки измерений методом магнитотеллурического зондирования (МТЗ).

В методе МТЗ рассматривается источник типа «плоская волна», который создаётся в результате взаимодействия изменяемого магнитного поля Земли и ионизированной ионосферы на высотах от 100 до 300 км, что, по мнению авторов, является неоспоримым преимуществом для использования данного метода в целях мониторинга. В этой связи исследуется не само поле во времени: $U(t) = U(w)e^{i(\omega t - \varphi)}$ (где U — амплитуда одной из компонент E , H напряжённости электромагнитного поля во временной или частотной области, $e^{i(\omega t - \varphi)}$ — гармонический закон (формула Эйлера), ω — соответственно круговая частота, время и фаза гармонического процесса), которое регистрируется приборами, а значение полного комплексного импеданса среды. Импеданс рассчитывается,

как отношение ортогональных компонент для двух поляризаций, меняющихся по гармоническому закону: $Z_{xy} = E_x / H_y$ — E -поляризованное (TE -мода), $Z_{yx} = E_y / H_x$ — H -поляризованное (TM -мода) ЭМ-поле на сетки периодов $T = 2 \cdot 10^{-4}$ от 0,01 до 10000 с. В виду комплексной величины импеданса при интерпретации традиционно рассматривают модуль $|Z|$ и фазу $\arg(Z)$ этого числа для каждой поляризации, которые рассчитываются следующим образом:

$$\text{модуль } |Z| = 0,2 \frac{|Z|^2}{\rho_0},$$

$$\text{фаза } \arg(Z),$$

где $|Z|$ — модуль (математический) комплексного числа, $\rho_0 = 4 \cdot 10^7$ — магнитная постоянная (магнитная проницаемость в вакууме).

Рассматривается задача расчёта ЭМ полей для базового и изменённого состояния модели (рис. 3). Базовая модель известна на основе предыдущих исследований и интерпретаций. Необходимо на основе анализа компонент импеданса обнаружить локальные зоны изменения модели типа «проводящая щель» и оценить удалённость возможного места проведения мониторинга на основе отношения изменений МТ-поля в данной зоне. Измеренные и обработанные данные в методе МТЗ для 2D случая представляют собой в каждой точке профиля два элемента основной диагонали тензора импеданса для двух взаимно ортогональных направлений поляризации МТ-поля, т. е. четыре независимых векторных величины.

На рис. 4, 5 представлены графики зондирования в двух точках профиля (точки № 1, № 2, рис. 3) для двух состояний модели. Чёрный цвет графика соответствует «базовой» модели без эффекта, а красный цвет — «изменённой» модели, с включением эффекта «проводящей щели». E -поляризованное поле будет отражено на графиках с синим фоном, а H -поляризованное на графиках с красным фоном.

Графики на рис. 4, а для расчётного E -поляризованного поля (TE -мода) в удалённой на 22,8 км от изменений точке № 1 (рис. 3) не реагируют на появление эффекта «щели» в изменённой модели. Расчёты для E -поляризации (TM -мода) показывают, что начиная с периодов от 1 МТ-поля расходятся. Таким образом, при достижении глубины около 1 км расположения «щели» компоненты МТ-поля начинают реагировать на изменение модели и кривые на графиках (рис. 4, б) расходятся. Амплитуда изменения достигает порядка 30 %, что позволяет с большой вероятностью, даже при наличии помехи от 10 до 15 %, фиксировать эти изменения при проведении периодических МТ-зондирований на поверхности земли. Дополнительно

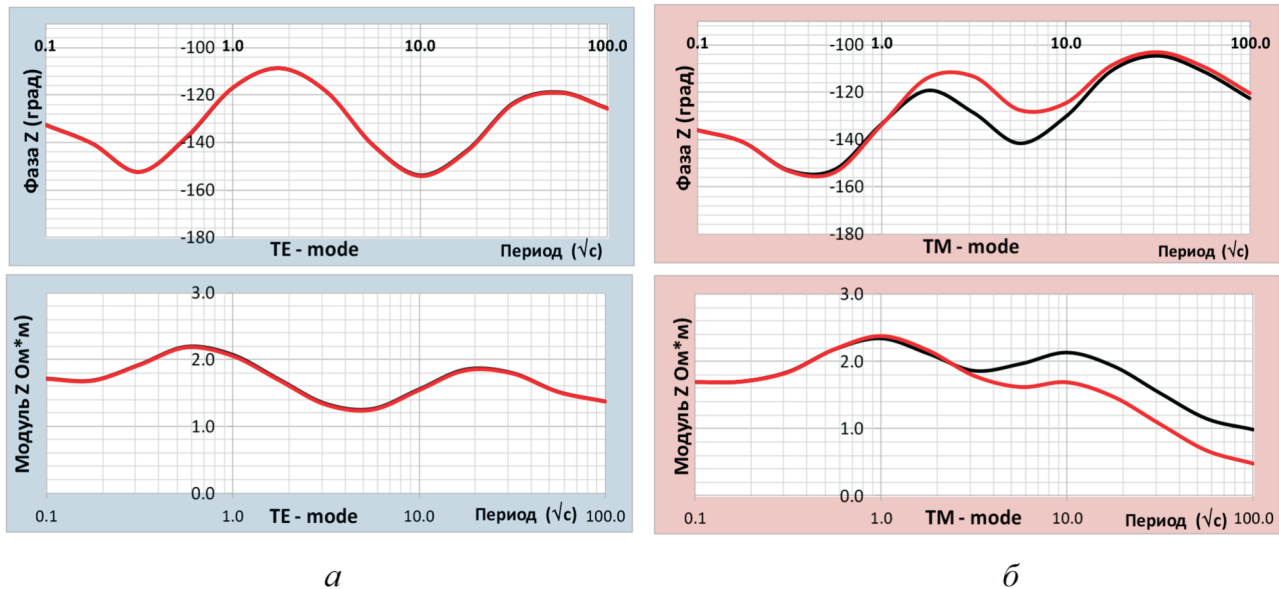


Рис. 4. Мониторинг в точки № 1 (см. рис. 3) слева от «щели» на расстоянии 22,8 км: а – E -поляризация (TE -мода), б – H -поляризация (TM -мода)

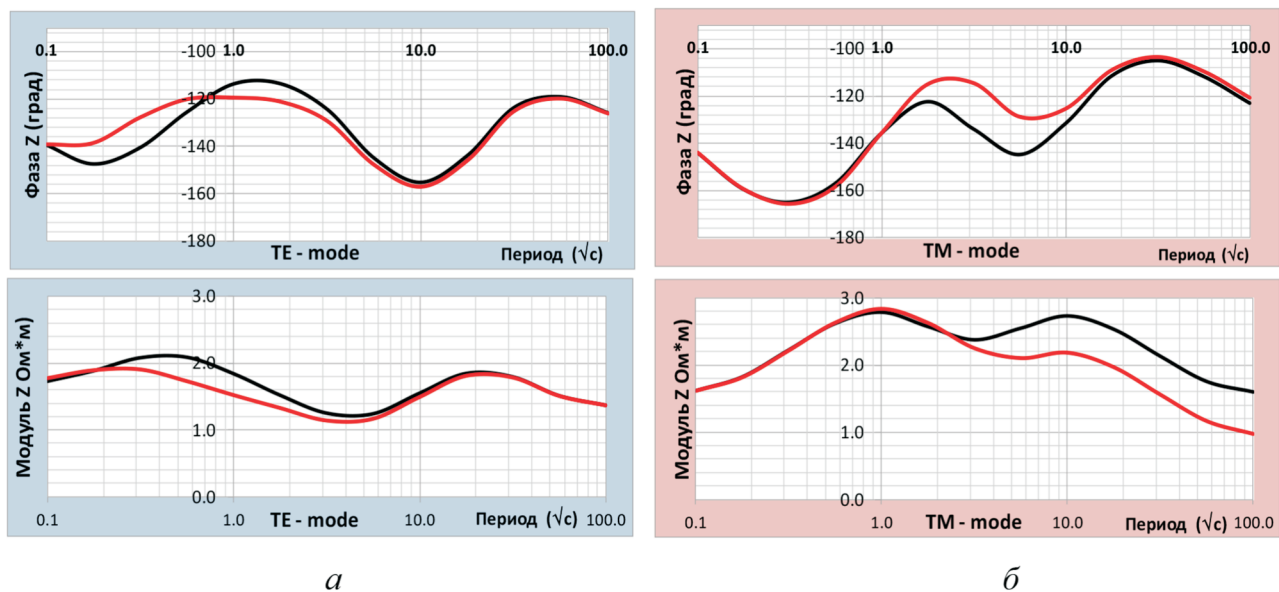


Рис. 5. Мониторинг в точки № 2 (см. рис. 3) слева от «щели» на расстоянии 1,2 км: а – E -поляризация (TE -мода), б – H -поляризация (TM -мода)

ным признаком является тот факт, что графики фазы изменённой модели (см. верхний график, рис. 4, б) становится больше, а графики для модуля меньше значений базовой модели (см. нижний график, рис. 4, б).

Вблизи, на расстоянии 1,2 км «слева от щели» (точка № 2 на рис. 3) расчётное E -поляризованное поле начинает реагировать на появление эффекта «щели» в модели с самых ранних периодов (рис. 5, а). При этом фаза (рис. 5, а, верхний блок) меняет знак и в интервале 0,01–1 с изменённые значения МТ-поля больше базовых, а затем для пе-

риодов 1–50 с они становятся меньше, а модуль (рис. 5, а нижний блок) строго меньше на всех периодах изменения. Компоненты H -поляризованного поля остаются по форме аналогичными таковым на рис. 4, но при этом амплитуда модуля импеданса увеличивается (рис. 5, б), и расхождения достигают 40 %.

Данные графики показывают, что МТ-поле имеет достаточно особенностей, которые позволяют обнаружить появление (или открытие) «проводящей щели» в удалении от места возникновения геодинамического нарушения. Это может служить

обоснованием проведения регулярного мониторинга на основе предложенной методики.

Заключение

В результате численного моделирования показано, что для двумерной модели с высокоомным экраном и хорошо проводящим слоем перераспределение плотности полного тока в среде, с учётом предполагаемых представлений о формировании зоны трещиноватости, существенно увеличивается за счёт эффекта «проводящей щели». При этом ам-

плитуда электромагнитного поля для продольной поляризации возрастает на большом удалении от зоны «проводящей щели».

Полученный результат может являться базой для разработки методики мониторинга электромагнитных полей, измеряемых на поверхности земли на удалении от очага землетрясения и непосредственно над разломом, с целью контроля степени готовности разлома к возникновению сейсмического события, что открывает новые возможности для прогноза землетрясений на основе электромагнитных предвестников.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гуфельд И.Л., Матвеева М.И., Новоселов О.Н. Почему мы не можем осуществить прогноз сильных коровых землетрясений // Геодинамика и тектонофизика. 2011. Т. 2. № 4. С. 378–415.
2. Киссин И.Г. Фильтрационные эффекты — новая разновидность предвестников землетрясений // Докл. АН. 2014. Т. 459. № 2. С. 232–236.
3. Соколов Б.А., Егоров В.А., Накаряков В.Д., Битнер А.К., Жуков Ю.А., Кузнецов Л.Л., Скоробогатых П.П., Захарян А.З. Геолого-геохимические условия формирования нефтегазовых месторождений в древних толщах Восточной Сибири / Под ред. Б.А. Соколова. М.: Изд-во МГУ, 1989. 192 с.
4. Шимелевич М.И., Оборнев Е.А. Быстрая нейросетевая инверсия МТ данных в задачах мониторинга параметров геоэлектрических разрезов // Тез. док. 3-го Межд. симп. «Геодинамика и геоэкология высокогорных регионов в XXI веке». Бишкек, 24.10–30.10 2005. Бишкек, 2005. С. 145–146.
5. Шимелевич М.И., Оборнев Е.А., Гаврюшов С.А. Применение нейросетевой аппроксимации для решения задач мониторинга параметров геоэлектрических разрезов // Изв. вузов. Геология и разведка. 2003. № 4. С. 70–71.
6. Bakun W.H., Aagaard B., Dost B., Ellsworth W.L., Hardebeck J.L., Harris R.A., Ji C., Johnston M.J.S., Langbein J., Lienkaemper J.J., Michael A.J., Murray J.R., Nadeau R.M., Reasenberg P.A., Reichle M.S., Roeloffs E.A., Shakal A., Simpson R.W., Waldhauser F. Implications for prediction and hazard assessment from the 2004 Parkfield earthquake // Nature. 2005. Vol. 437. No 13. P. 969–974.
7. Gershenzon N., Bambakidis G. Modeling of seismo-electromagnetic phenomena // Russian Journal of Earth Sciences, 2001, No. 3(4), P. 247–275.
8. Giger S.B., Tenthorey E., Cox S.F., and FitzGerald J.D. Permeability evolution in quartz fault gouges under hydrothermal conditions // J. Geophys. Res. 2007, 112, B07202, DOI: 10.1029/2006JB004828.
9. Johnston M.J.S. Review of Electrical and Magnetic Fields Accompanying Seismic and Volcanic Activity // Surv. In Geophys. 1997. V.18. P. 441–475.
10. McCaig A.M. Deep fluid circulation in fault zones // Geology. 1988. 16(10). P. 867–870.
11. Shimelevich M.I., Osborne E.A., Gavryushov S. Rapid neuronet inversion of 2D magnetotelluric data for monitoring of geoelectrical section parameters // Annals of Geophysics. 2007. Vol. 50. N. 1, Febr. P. 105–109.

К 550.34.06; 550.34.01

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЭПИЦЕНТРАЛЬНОЙ ЗОНЫ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ (КУМАМОТО, ЯПОНИЯ) 16 АПРЕЛЯ 2016 Г. М 7,3

В.Н. МОРОЗОВ, А.И. МАНЕВИЧ

Геофизический центр РАН

119296, Россия, г. Москва, ул. Молодежная, д. 3; e-mail: v.morozov@gcras.ru, ai.manevich@yandex.ru

Землетрясение 16 апреля 2016 г. с М 7,3, в префектуре Кумамото (остров Кюсю, Япония) является сильнейшим за последние 30 лет в этом районе. За сутки перед главным толчком было зарегистрировано два форшока с М 6,4. В течение семи дней после главного толчка афтершоковая активность распространилась на северо-восток и юго-запад, большинство гипоцентров афтершоков с М < 6,4 локализовано в пределах сейсмогенерирующего слоя на глубинах от 5 до 10 км. Авторами смоделировано напряженно-деформированное состояние (НДС) эпицентральной зоны до землетрясения и после него. С этой целью используется программный комплекс, позволяющий в 2D постановке (условие плоского напряженного состояния) моделировать НДС блочной гетерогенной среды, нарушенной системой разломов. Разломы моделируются в виде протяженных зон диспергированного геоматериала, упругий модуль которых существенно ниже упругого модуля окружающей среды. Используется структурно-тектоническая схема района землетрясения Кумамото. Выполнен анализ результатов моделирования НДС района площадью 30 40 км² до и после землетрясе-