

ИССЛЕДОВАНИЕ КРАТКОСРОЧНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРЕДВЕСТНИКОВ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Ю. А. Копытенко, В. С. Исмагилов

Санкт-Петербургский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова Российской академии наук (СПбФ ИЗМИРАН)

Приводятся результаты исследований краткосрочных электромагнитных предвестников сильных землетрясений в градиентах и фазовых скоростях ультранизкочастотных ($F < 1$ Гц) геомагнитных возмущений. Градиенты и фазовые скорости вдоль земной поверхности определялись по данным группы из трёх высокочувствительных магнитных станций, которые располагались на земной поверхности треугольником на расстоянии ~ 5 км друг от друга (магнитный градиентометр). Обнаружены аномалии в градиентах и фазовых скоростях за 2–3 мес и за 2–3 дня перед сильными землетрясениями ($M > 5$).

Ключевые слова: землетрясение, краткосрочные предвестники, магнитный градиентометр.

ВВЕДЕНИЕ

Как правило, в течение сейсмоактивного периода происходит много сейсмических толчков различной магнитуды. Однако, как указывается в статье [Mogi, 1985] около 50 % сильных землетрясений происходит без форшоковой активности, поэтому исследования предвестников землетрясений несейсмического характера, в том числе ультранизкочастотных (УНЧ) электромагнитных эмиссий ($F = 10 \dots 0,001$ Гц), связанных с очагом будущей сейсмической активности, имеют большое значение для решения проблемы предсказания сильных землетрясений. В сейсмоактивных зонах проводятся многочисленные наблюдения и съёмки с целью слежения за движениями коры, сейсмичностью, геомагнетизмом, грунтовыми водами, геохимическими изменениями, выделяющимися газами и др., однако проблема предсказания разрушительных землетрясений ещё далека от своего решения.

С середины 1990-х СПбФ ИЗМИРАН проводит исследования предвестников сильных землетрясений в градиентах и фазовых скоростях ультранизкочастотных геомагнитных возмущений [Копытенко и др., 2000]. Наблюдения УНЧ-электромагнитных волн в сейсмоактивных зонах проводятся в течение последних 15–20 лет, после появления высокочувствительных магнитометров. Результаты измерений в различных сейсмически активных районах Земли показали, что, как на подготовительной стадии развития очаговых зон средних и сильных (магнитуда $M > 5$) землетрясений,

Копытенко Юрий Анатольевич — заведующий отделом, доктор физико-математических наук, профессор, office@izmiran.spb.ru

Исмагилов Валерий Сарварович — учёный секретарь, кандидат физико-математических наук, ivs@izmiran.spb.ru

так и в период афтершоковой активности, на больших расстояниях от будущего эпицентра могут наблюдаться аномальные УНЧ-электромагнитные излучения большой интенсивности. Как правило, эти эмиссии имели шумовой характер и возникали задолго до главного сейсмического толчка и продолжались в течение всей афтершоковой активности. Впервые УНЧ-электромагнитные эмиссии наблюдались перед сильными землетрясениями в Армении (Спитак, 1988) [Копытенко et al., 1990, 1993; Molchanov et al., 1992] и США (Лома Приетта, 1989) [Bernardi et al., 1991; Molchanov et al., 1992]. Увеличение интенсивности УНЧ-эмиссий наблюдалось и за несколько месяцев перед разрушительным землетрясением в Гуаме (1993, $M = 8$) [Hayakawa et al., 1996; Kawate et al., 1998], которое произошло внезапно, без форшоков.

1. ГРАДИЕНТЫ И ФАЗОВЫЕ СКОРОСТИ ГЕОМАГНИТНЫХ ВАРИАЦИЙ

Измерения параметров геомагнитных вариаций в одной точке на поверхности Земли не позволяют определить направление на источник вариаций. Для этой цели могут быть использованы дифференциальные методы измерений. Одним из таких методов стал фазово-градиентный метод, впервые предложенный в статье [Копытенко и др., 2000] для исследования УНЧ-геомагнитных вариаций. Этот метод позволяет по трём трёхкомпонентным магнитным станциям, расположенным на земной поверхности треугольником на небольшом (~ 5 км) расстоянии друг от друга (магнитный градиентометр), построить вектора градиентов и фазовых скоростей геомагнитных пульсаций вдоль земной поверхности для любой из трёх компонент магнитного поля [Исмагилов и др., 2006]. При этом мы предполагаем, что расстояние между станциями много меньше расстояния до источника геомагнитных вариаций, в этом случае градиенты магнитного поля вариаций и фазовые скорости геомагнитных волн будут близки к истинным величинам. Вектора градиентов геомагнитных волн, как правило, направлены к локальному источнику пульсаций, а вектора фазовых скоростей — от источника. Если имеются два магнитных градиентометра, разнесённых на расстояние ~ 100 км, то по пересечению направлений этих векторов можно определять местоположение источника (точнее, его проекцию на земную поверхность) — УНЧ-магнитная локация.

Длина электромагнитной волны λ (в [км]) с периодом T (в [с]) в среде с удельным сопротивлением ρ (в [Ом·м]) определяется следующим образом [Ковтун, 1980]:

$$\lambda = \sqrt{10\rho T}. \quad (1)$$

Используем (1) и определим фазовую скорость (в [км/с]) распространения геомагнитных вариаций в среде следующим образом:

$$V_{ph} = \frac{w}{k} = \frac{\lambda}{T} = \sqrt{10\frac{\rho}{T}}. \quad (2)$$

Из (2) для величины удельного сопротивления среды (в [Ом·м]) получаем:

$$\rho = 0,1V_{ph}^2 T. \quad (3)$$

В геоэлектрических исследованиях для определения величины кажущегося удельного сопротивления среды часто применяют следующее выражение:

$$\rho = 0,1Z_a^2 T. \quad (4)$$

В соотношении (4) $Z_a = E/B$ — имеет размерность скорости (в [км/с]) как и в (3) и пропорциональна импедансу, который определяется как отношение E/H .

Используя выражение (3) можно определить удельное сопротивление среды, если известна фазовая скорость распространения электромагнитной волны вдоль земной поверхности. Для определения вектора фазовой скорости вдоль земной поверхности необходимо наличие трёх магнитовариационных станций расположенных треугольником и разнесённые на 3...10 км друг от друга. Фазовая скорость между парами станций в треугольнике определяется следующим образом [Исмагилов и др., 2006; Исмагилов, Першаков, 1992; Копытенко и др., 2000; Ismaguilov et al., 2002]:

$$V_{12} = \frac{2\pi f d_{21}}{\ln \frac{B_1(t)}{B_2(t + \tau_{12})}}, \quad V_{13} = \frac{2\pi f d_{31}}{\ln \frac{B_1(t)}{B_3(t + \tau_{13})}}. \quad (5)$$

Здесь f — частота вариаций; $d_{21} = x_2 - x_1$ — расстояние между двумя точками на земной поверхности; B_1, B_2 и B_3 — значения индукции магнитного поля в момент времени t ; τ_{12} и τ_{13} — фазовые задержки при использовании соответствующих пар станций в треугольнике. Зная фазовые скорости V_{12} и V_{13} можно определить вектора фазовой скорости и градиента вдоль земной поверхности:

Для вектора фазовой скорости вдоль земной поверхности азимут направления и модуль вектора:

$$\alpha = \arctg \frac{V_{12} \cos(a_1) - V_{13} \cos(a_2)}{V_{12} \sin(a_1) + V_{13} \sin(a_2)}, \quad |V| = V_{12} \cos(\alpha + a_1). \quad (6)$$

Для вектора градиента вдоль земной поверхности азимут направления и модуль вектора:

$$\alpha = \arctg \frac{G_{13} \cos(a_1) - G_{12} \cos(a_2)}{G_{12} \sin(a_1) + G_{13} \sin(a_2)}, \quad |G| = \frac{G_{12}}{\sin(\alpha + a_1)}. \quad (7)$$

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

С 1998 г. в Японии на полуостровах Изу и Босо ведётся регистрация вариаций магнитного поля и теллурических токов шестью высокочувствительными цифровыми трёхкомпонентными магнитными станциями MVC-3DS разработанными в СПбФ ИЗМИРАН [Goto et al., 2002]. На рис. 1 показано расположение магнитных станций (чёрные треугольники) на территории Японии.

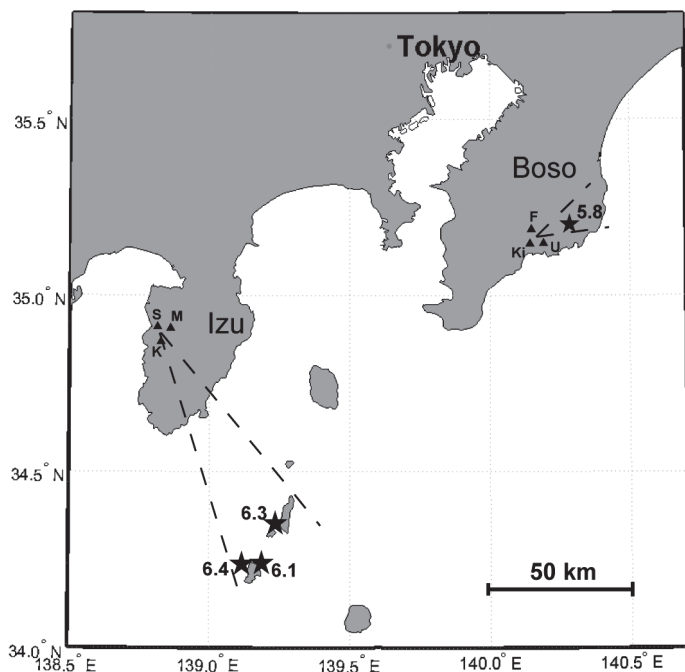


Рис. 1. Расположение магнитных станций и эпицентров землетрясений в Японии

Три станции расположены на полуострове Изу (Сейкоши, Мочикоши и Камо) и три — на полуострове Босо (Фудаго, Учиура и Киосуми). Дискретность регистрируемых данных составляла 50 Гц, а для синхронизации одновременной работы магнитных датчиков использовалась система GPS (Global Positioning System) на каждой станции. Каждая группа из трёх станций представляет собой магнитный градиентометр и станции в каждой группе расположены на расстоянии 4...7 км друг от друга. Эпицентры землетрясений показаны звёздочками. Цифры рядом с эпицентрами означают магнитуду землетрясения, определённую по 9-балльной шкале в соответствии с классификацией Японского метеорологического агентства (Japan Meteorological Agency — JMA).

Трёхкомпонентные магнитные станции показаны чёрными треугольниками (S, M, K — Сейкоши, Мочикоши и Камо на полуострове Изу; F, Ki, U — Фудаго, Киосуми и Учиура на полуострове Босо). Эпицентры землетрясений показаны звёздочками. Цифры рядом с эпицентрами означают магнитуду землетрясения. Землетрясения с $M > 6$ произошли в 2000 г., а с $M = 5,8$ — в 2003 г.

Сейсмически активный период, в ходе которого произошло три землетрясения с магнитудой больше шести, начался 26.06.2000 г. и продолжался затем более трёх месяцев. Самый сильный сейсмический толчок произошёл 1.07.2000 г. и имел магнитуду $M = 6,4$. Эпицентр этого землетрясения был расположен на глубине ~ 15 км под морской поверхностью на расстоянии ~ 85 км к юго-востоку от магнитных станций, размещённых на полуострове Изу и на расстоянии ~ 140 км к юго-западу от магнитных станций,

расположенных на полуострове Босо (см. рис. 1). По мнению [Uyeda и др., 2002] сейсмическая активность была спровоцирована подъёмом магмы в окрестностях о. Миякеджима (~85 км к юго-востоку от магнитных станций, размещённых на полуострове Изу). В дальнейшем сейсмическая активность была вызвана миграцией магмы на северо-запад вдоль дна моря.

Сейсмическая активность в районе полуострова Босо развивалась в течение всего 2003 г. и характеризовалась большим количеством слабых и средних сейсмических толчков ($M < 4$) вокруг магнитных станций, установленных здесь. Самый сильный толчок имел магнитуду 5,8 балла (по шкале JMA) и произошёл 20.09.2003 г. на глубине ~60 км. Эпицентр его находился в ~15 км к северо-востоку от станции Киосуме (см. рис. 1).

На рис. 2 показано anomalous поведение градиентов и фазовых скоростей геомагнитных эмиссий в частотном диапазоне $F = 0,1 \dots 0,4$ Гц.

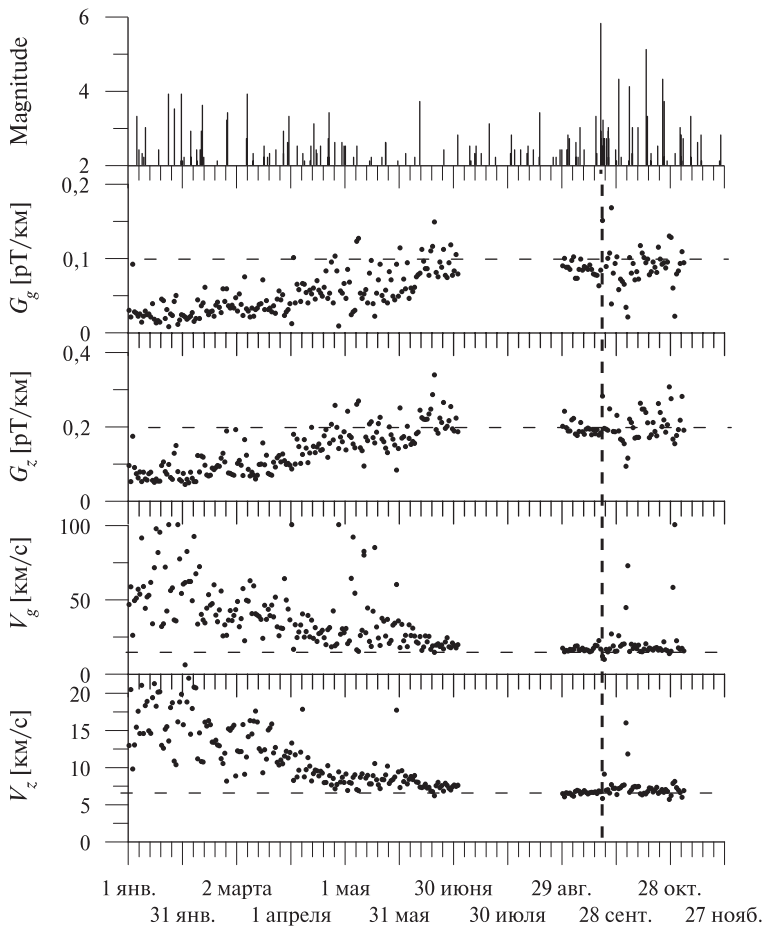


Рис. 2. Градиенты и фазовые скорости геомагнитных эмиссий ($F = 0,1 \dots 0,4$ Гц) до и после землетрясения $M = 5,8$ на полуострове Босо (Япония) в 2003 г. V_g, V_z, G_g, G_z — фазовые скорости и градиенты в полной горизонтальной и вертикальной компонентах магнитного поля. Магнитуды сейсмических толчков ($M > 2$) в окрестности до 50 км от магнитных станций представлены на верхней панели рисунка

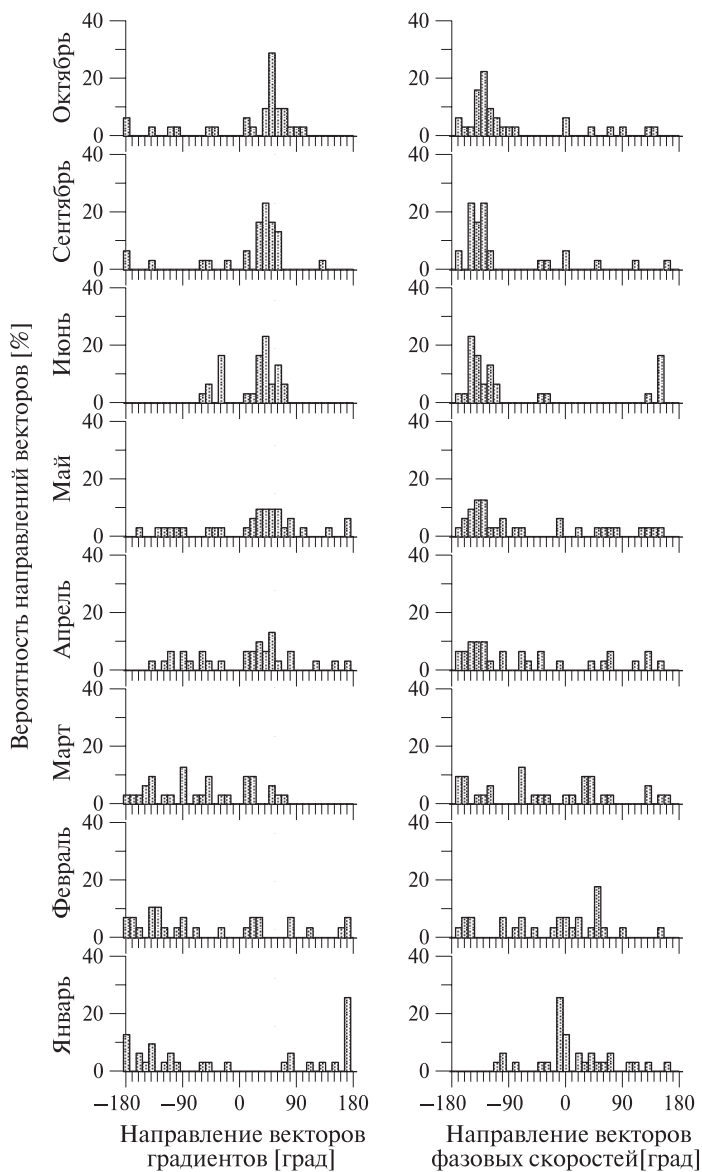


Рис. 3. Вероятности направлений векторов градиентов и фазовых скоростей УНЧ-геомагнитных возмущений ($F = 0,03 \dots 0,1$ Гц) до и после землетрясения ($M = 5,8$), полуостров Босо, Япония, 2003 г. Левая часть рисунка — среднемесячные значения вероятностей направлений векторов градиентов, правая часть рисунка — среднемесячные значения вероятностей направлений векторов фазовых скоростей. Цифры на нижних горизонтальных осях означают: 0° — направление на север (географический), $+90^\circ$ — на восток, -90° — на запад, $\pm 180^\circ$ — на юг. Заштрихованная вертикальная полоса соответствует направлению на будущую сейсмоактивную область и соответствует 30° конусу локации, показанному на рис. 1 пунктирными линиями

Из рис. 2 видно, что в 2003 г. на полуострове Босо примерно за полгода до момента землетрясения с магнитудой $M = 5,8$, отмеченного на рис. 2 вертикальной пунктирной линией, градиенты в полной горизонтальной и в вертикальной компоненте магнитного поля начинают возрастать и достигают своего максимума за 2–3 мес до землетрясения. В это же время фазовые скорости уменьшаются, и минимальные значения наблюдаются перед землетрясением. Такое же, но менее выраженное anomальное поведение градиентов и фазовых скоростей наблюдается также и в более низкочастотном диапазоне УНЧ-геомагнитных возмущений ($F < 0,1$ Гц). К сожалению, данные за июль и август 2003 г. отсутствуют. Похожее anomальное поведение градиентов и фазовых скоростей УНЧ-геомагнитных вариаций наблюдалось также и перед землетрясениями 2000 г. возле полуострова Изу и описано нами ранее в работах [Ismaguilov et al., 2001, 2002; Kopytenko et al., 2001, 2002].

На рис. 3 показаны гистограммы распределений вероятностей направлений векторов градиентов и фазовых скоростей УНЧ-вариаций в диапазоне частот $F = 0,03...0,1$ Гц (среднемесячные значения) за период январь — октябрь 2003 г. Гистограммы построены по данным магнитных станций, расположенных на полуострове Босо. Распределения строились также по полной горизонтальной компоненте магнитного поля. Как указывалось выше, сейсмоактивная область располагалась северо-восточнее полуострова Босо. Из рис. 3 видно, что за 5–6 мес до сильного сейсмического толчка с магнитудой $M = 5,8$ в распределении направлений векторов градиентов УНЧ-возмущений появилось направление на область предстоящего сильного землетрясения. Это направление отмечено на рис. 3 заштрихованной вертикальной полосой, соответствующей 30° -конусу локации, показанному на рис. 1 на полуострове Босо пунктирными линиями. Так же, как и в предыдущем случае, вектора фазовых скоростей направлены в противоположную сторону по сравнению с градиентами и в распределении их направлений также появилось направление от будущей сейсмоактивной зоны.

На полуострове Изу в 2000 г. за 2–3 мес до начала сейсмической активности в распределении направлений векторов градиентов УНЧ-возмущений также появилось направление на область будущей сейсмической активности [Исмагилов и др., 2006]. В 2003 г. на полуострове Босо направления векторов градиентов и фазовых скоростей УНЧ-вариаций, связанные с будущей сейсмоактивной областью, проявились чётче и на несколько месяцев ранее, чем в 2000 г. на полуострове Изу. По-видимому, это связано с тем, что на полуострове Босо очаг землетрясения располагался значительно ближе к магнитным станциям, чем на полуострове Изу.

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Градиенты естественных геомагнитных вариаций по данным трёх магнитовариационных станций впервые были определены в работе [Исмагилов и Першаков, 1992]. Работы по определению фазовых скоростей естественных геомагнитных пульсаций проводились ранее Д. Н. Четаевым [Четаев,

1970] в средних широтах с использованием одной пары далеко разнесённых магнитовариационных станций. Оценки фазовых скоростей длиннопериодных геомагнитных вариаций (в том числе и связанных с сильным землетрясением) были сделаны также в работах [Сорокин, 1986, 1988; Alperovich, Zheludev, 1999]. Фазовые скорости геомагнитных пульсаций исследовались ими по фазовым задержкам геомагнитных волн, определённым между двумя пунктами наблюдений, расположенными на большом расстоянии друг от друга. Однако фазовая скорость геомагнитных волн, найденная по двум точкам на земной поверхности, может быть сколь угодно большой по величине в зависимости от угла прихода фронта волны на линию, соединяющую пункты наблюдения. Только по трём хорошо синхронизованным магнитным станциям, расположенным на небольшом расстоянии друг от друга, можно точно определить величину и направление фазовой скорости геомагнитных волн вдоль земной поверхности.

На рис. 2 момент землетрясения с $M = 5,8$ отмечен вертикальной пунктирной линией. Как видно из этого рисунка, примерно за 6 мес до землетрясения началось аномальное увеличение величины градиентов в вертикальной и полной горизонтальной компоненте магнитного поля и уменьшение величины фазовой скорости в этих же компонентах. Работы [Ismaguilov et al., 2001, 2002; Kopytenko et al., 2001, 2002] посвящены исследованиям градиентов и фазовых скоростей УНЧ-геомагнитных вариаций перед землетрясениями 2000 г. возле полуострова Изу (см. рис. 1). В этих работах высказывается предположение о том, что аномальное увеличение величин градиентов связано с двумя процессами в области очага будущего землетрясения — образуется аномалия повышенной проводимости, и возникают широкополосные УНЧ-электромагнитные излучения. Аномалия повышенной проводимости может возникнуть как вследствие тектонических движений, так и вследствие подъёма магмы к поверхности земной коры [Mogi, 1985; Uyeda et al., 2002]. Один из возможных механизмов возникновения широкополосных электромагнитных излучений связан с активизацией процесса образования микротрещин в области очага будущего землетрясения [Molchanov, Hayakawa, 1998]. Высокочастотные электромагнитные излучения сильно затухают в земной коре, и на поверхности мы наблюдаем, в основном, ультранизкочастотные излучения.

Наблюдаемые на земной поверхности УНЧ-геомагнитные вариации являются суперпозицией двух волн — падающей из атмосферы и отражённой в земной коре. В сейсмически активных зонах в точку наблюдения дополнительно ещё приходят естественные УНЧ-излучения, отражённые от развивающейся в области будущего очага аномалии проводимости, а также и аномальные литосферные УНЧ-излучения, о которых речь шла выше. Поэтому развитие тектонических процессов в области будущего очага землетрясения приводит к увеличению амплитуд измеряемых геомагнитных возмущений и, соответственно, их градиентов. Естественные УНЧ-геомагнитные пульсации ионосферного происхождения имеют в средних широтах очень маленькие градиенты, как видно на рис. 2 (январь-март 2003 г.). Фазово-градиентный метод, применяемый нами для определения градиентов и фазовых скоростей возмущений, позволяет на фоне естественных геомагнитных вариаций выделить градиенты от локаль-

ных литосферных источников, расположенных ближе к используемым магнитным станциям, чем ионосферные источники пульсаций. Как мы видим, в распределении направлений векторов градиентов за несколько месяцев до землетрясения появились направления на очаг будущего землетрясения.

Электромагнитные волны, приходящие на земную поверхность из атмосферы имеют скорость распространения электромагнитной волны в воздухе и почти не вносят вклад в наблюдаемую между двумя магнитными станциями фазовую задержку. Поэтому величины фазовых скоростей УНЧ-геомагнитных вариаций, наблюдаемые на земной поверхности, определяются, в основном, проводимостью земной коры [Ковтун, 1980]. На рис. 2 и 4 видно, что за несколько месяцев до землетрясения фазовые скорости УНЧ-волн начали уменьшаться, а в направлениях векторов фазовых скоростей одновременно появилось направление от очага будущего землетрясения. Вероятно, регистрируемые на полуострове Босо УНЧ-электромагнитные волны, возникающие в районе очага будущего землетрясения, распространяются в земной коре по таким трассам от очага до магнитных станций на полуострове Босо, вдоль которых интегральное удельное сопротивление земной среды в несколько раз меньше, чем для трасс, существовавших задолго до момента землетрясения. По результатам исследований землетрясений 2000 г. в районе полуострова Изу [Ismaguilov et al., 2001, 2002; Копытенко et al., 2001, 2002] получены схожие результаты по градиентам и фазовым скоростям.

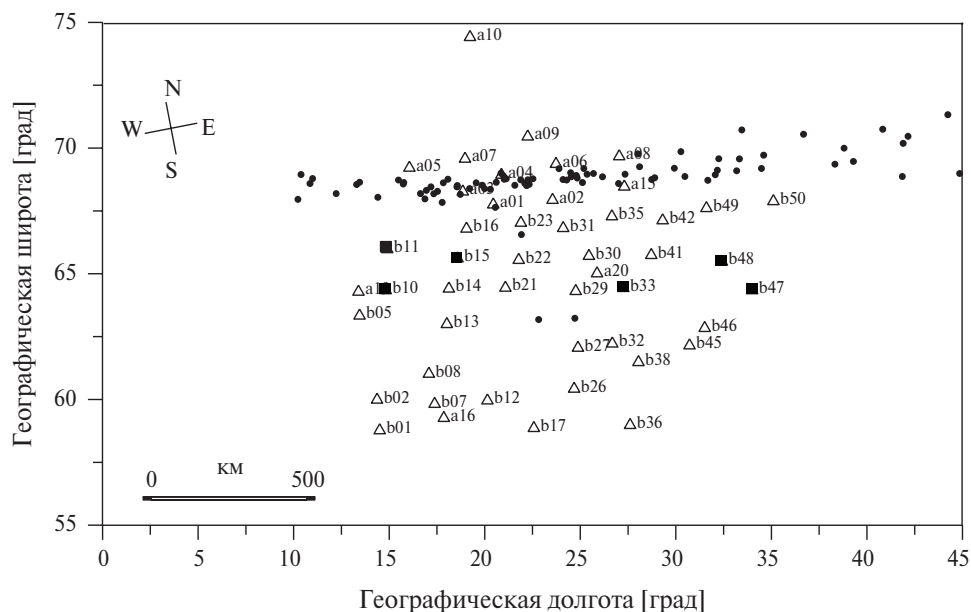


Рис. 4. Положение источников геомагнитных пульсаций 14.06.1998 г. (03–08 UT — Universal Time). Чёрные точки — местоположение источников геомагнитных пульсаций; треугольники — магнитные станции; чёрные квадраты — станции, использованные для определения местоположения источников

В работе [Ковтун, 1980] показано, что при изотропной, слоисто-однородной земной коре горизонтальная компонента однородной плоской падающей волны практически удваивается, а вертикальная компонента уменьшается практически до нуля почти независимо от угла падения первичной волны, поскольку коэффициент преломления для УНЧ-электромагнитных волн в земной среде намного (на 4-5 порядков) больше, чем коэффициент преломления воздуха. При этом преломлённая волна будет иметь практически только горизонтальные магнитные компоненты. При наличии в земной коре аномалий электрической проводимости (возникающие также в зоне очага будущего землетрясения), либо, если падающая волна не является однородной, на земной поверхности появляется заметная вертикальная компонента, в гораздо меньшей степени, но также изменяется горизонтальная компонента магнитного поля пульсаций [Ковтун, 1980; Рокитянский, 1975]. Яркий пример — так называемый «береговой эффект». Поэтому исследование предвестников сильных землетрясений предпочтительнее проводить по вариациям вертикальной компоненты магнитного поля, а исследования ионосферных источников — по горизонтальным компонентам.

Пример локации источников геомагнитных возмущений по полной горизонтальной компоненте показан на рис. 4. Здесь нанесено местоположение источников геомагнитных вариаций за 5-часовой период 14.06.1998 г. (03–08 UT). Данные были предварительно отфильтрованы полосовым фильтром в полосе частот 0,01...0,2 Гц. На рис. 4 местоположение источников нанесено чёрными точками, треугольниками — положение всех магнитных станций, задействованных в эксперименте BEAR (Baltic Electromagnetic Array Research), чёрными квадратами — станции, использованные для определения местоположения источников (два градиентометра). Как видно на рисунке, источники пульсаций в диапазоне периодов 5...100 с в течение 5-часового интервала располагались примерно вдоль геомагнитной параллели (в левом верхнем углу рисунка показано направление геомагнитных параллелей и меридианов) и, по-видимому, статистически они отражают положение южной кромки аврорального овала. Источники пульсаций строились для каждого 5-минутного интервала в течение всего 5-часового интервала времени, т. е. мы находили местоположение источников с 5-минутным усреднением.

ВЫВОДЫ

Метод УНЧ-магнитной локации, разработанный в СПбФ ИЗМИРАН, позволяет определять местоположение источников геомагнитных возмущений как ионосферного, так и литосферного происхождения. Нами показано, что за несколько месяцев до сильных землетрясений ($M > 5$) величины градиентов и фазовых скоростей начинают аномально изменяться. По данным трёх магнитовариационных станций, расположенных на небольшом расстоянии друг от друга (магнитный градиентометр) определено, что в распределении направлений векторов градиентов появляются направления на очаги этих будущих землетрясений, а в распределении направле-

ний векторов фазовых скоростей появляются направления от очагов будущих землетрясений. Если имеются два магнитных градиентометра, разнесённых на расстояние ~100 км, то по направлениям этих векторов можно определять местоположение источника (точнее, его проекцию на земную поверхность).

Проблема прогноза сильных землетрясений очень сложна и должна решаться комплексно, с привлечением разных видов наблюдений. Градиенты и фазовые скорости УНЧ-геомагнитных возмущений могут быть использованы в качестве одного из факторов для осуществления краткосрочного прогноза сильных землетрясений.

ЛИТЕРАТУРА

- [Исмагилов, Першаков, 1992] *Исмагилов В. С., Першаков Л. А.* К вопросу об измерениях градиентов геомагнитных пульсаций // Хранение и обработка экспериментальных данных. Математическое моделирование. Апатиты: ПГИ, 1992. С. 114–119.
- [Исмагилов и др., 2006] *Исмагилов В. С., Копытенко Ю. А., Хаттори К., Хаякава М.* Использование градиентов и фазовых скоростей УНЧ геомагнитных возмущений для определения местоположения очага будущего сильного землетрясения // Геомагнетизм и аэрономия. 2006. Т. 46. № 3. С. 423–430.
- [Ковтун, 1980] *Ковтун А. А.* Использование естественного электромагнитного поля при изучении электропроводности Земли. Л.: Изд. Ленгосуниверситета, 1980. 195 с.
- [Копытенко и др., 2000] *Копытенко Ю. А., Исмагилов В. С., Копытенко Е. А., Воронцов П. М., Зайцев Д. Б.* Магнитная локация источников геомагнитных возмущений // Доклады Академии наук (ДАН). Геофизика. 2000. Т. 371. № 5. С. 685–687.
- [Рокитянский, 1975] *Рокитянский И. И.* Исследование аномалий электропроводности методом магнитного профилирования. Киев: Наукова думка, 1975. 280 с.
- [Сорокин, 1986] *Сорокин В. М.* О роли ионосферы в распространении геомагнитных пульсаций // Геомагнетизм и аэрономия. 1986. № 4. Т. 26. С. 646–652.
- [Сорокин, 1988] *Сорокин В. М.* Волновые процессы в ионосфере, связанные с геомагнитным полем // Изв. ВУЗов. Радиофизика. 1988. Т. 31. № 10. С. 1169–1179.
- [Четаев, 1970] *Четаев Д. Н.* О структуре поля гелмагнитных пульсаций и магнитотеллурических зондированиях // Изв. АН СССР. Сер. «Физика Земли» 1970. № 2. С. 52–56.
- [Alperovich, Zheludev, 1999] *Alperovich L. S., Zheludev V. A.* Long-period geomagnetic precursors of the Loma-Prieta Earthquake discovered by wavelet method // Atmospheric and ionospheric electromagnetic phenomena associated with earthquakes / Ed. M. Hayakawa. Tokyo: TERRAPUB, 1999. P. 123–135.
- [Bernardi et al., 1991] *Bernardi A., Fraser-Smith A. C., McGill P. R., Villard O. G.* ULF magnetic field measurements near the epicenter of the M_s 7.1 Loma Prieta earthquake // Phys. Earth Planet. Interiors. 1991. V. 68. P. 45–63.
- [Goto et al., 2002] *Goto T.-N., Sayanagi K., Mikada H.* Calibration and running test of torsion magnetometer made in Russia // Rep. of Japan Marin Sci. and Tech. Center (JAMSTEC). 45 (March, 2002). 2002. P. 41–53.

- [Hayakawa et al., 1996] *Hayakawa M., Kawate R., Molchanov O. A., Yumoto K.* Results of Ultra-low-frequency magnetic field measurements during the Guam earthquake of 8 August 1993 // *Geophys. Res. Lett.* 1996. V. 23. P. 241–244.
- [Ismaguilov et al., 2001] *Ismaguilov V. S., Kopytenko Yu. A., Hattori K., Voronov P. M., Molchanov O. A., Hayakawa M.* ULF Magnetic Emissions Connected with Under Sea Bottom Earthquakes // *Natural Hazards and Earth Sys. Sci.* 2001. V. 1. P. 1–9.
- [Ismaguilov et al., 2002] *Ismaguilov V. S., Kopytenko Yu. A., Hattori K., Hayakawa M.* Variations of phase velocity and gradient values of ULF geomagnetic disturbances connected with the Izu strong earthquakes // *Natural Hazards and Earth Sys. Sci.* 2002. V. 20. P. 1–5.
- [Kawate et al., 1998] *Kawate R., Molchanov O. A., Hayakawa M.* Ultra — low — frequency magnetic fields during the Guam earthquake of 8 August 1993 and their interpretation // *Phys. Earth Planet. Interiors.* 1998. V. 105. P. 229–238.
- [Kopytenko et al., 1990] *Kopytenko Yu. A., Matiashvily T. G., Voronov P. M., Kopytenko E. A., Molchanov O. A.* Discovering of ultra-low-frequency emissions connected with Spitak earthquake and his aftershock activity on data of geomagnetic pulsations observations at Dusheti and Vardzija: Preprint. M.: IZMIRAN, 1990. No. 3(888). 27 p.
- [Kopytenko et al., 1993] *Kopytenko Yu. A., Matiashvily T. G., Voronov P. M., Kopytenko E. A., Molchanov O. A.* Detection of Ultra-Low Frequency emissions connected with the Spitak Earthquake and its aftershock activity based on geomagnetic pulsations data at Dusheti and Vardzia observatories // *Phys. Earth and Planet. Interiors.* 1993. V. 77. P. 85–95.
- [Kopytenko et al., 2001] *Kopytenko Y., Ismagilov V., Hayakawa M., Smirnova N., Troyan V., Peterson T.* Investigation of the ULF electromagnetic phenomena related to earthquakes: contemporary achievements and the perspectives // *Annali di Geofisika.* 2001. V. 44. No. 2. P. 325–334.
- [Kopytenko et al., 2002] *Kopytenko Yu. A., Ismaguilov V. S., Hattori K., Voronov P. M., Hayakawa M., Molchanov O. A., Kopytenko E. A., Zaitsev D. B.* Monitoring of the ULF electromagnetic disturbances at the station network before EQ in seismic zones of Izu and Chiba peninsulas // *Seismo Electromagnetics: Litosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling / Eds. M. Hayakawa, O. A. Molchanov.* Tokyo: TERRAPUB, 2002. P. 11–18.
- [Mogi, 1985] *Mogi K.* Earthquake predictions. Japan: Academic Press, 1985. 166 p.
- [Molchanov, Hayakawa, 1998] *Molchanov O. A., Hayakawa M.* On the generation of ULF seismogenic electromagnetic emissions // *Phys. Earth and Planet. Interiors.* 1998. V. 105. P. 201–210.
- [Molchanov et al., 1992] *Molchanov O. A., Kopytenko Yu. A., Voronov P. M., Kopytenko E. A., Matiashvily T. G., Fraser-Smith A. C., Bernardy A.* Results of ULF magnetic field measurements near the epicenters of the Spitak (MS = 6.9) and the Loma-Prieta (MS = 7.1) earthquakes: Comparative analysis // *Geophys. Res. Lett.* 1992. No. 19. P. 1495–1498.
- [Uyeda et al., 2002] *Uyeda S., Hayakawa M., Nagao T., Molchanov O., Hattori K., Orihara Y., Gotoh K., Akinaga Y., Tanaka H.* Electric and magnetic phenomena observed before the volcano-seismic activity in 2000 in the Izu Island Region, Japan // *Proc. US Nat. Acad. Sci.* 2002. V. 99. No. 11. P. 7352–7355.

INVESTIGATIONS OF SHORT-TIME PRECURSORS OF STRONG EARTHQUAKES

Yu. A. Kopitenko, V. S. Ismaguilov

Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation of Russian Academy of Sciences (SPbF IZMIRAN)

Investigation of short-time precursors of strong earthquakes (EQ) in gradient and phase velocity values of ULF magnetic disturbances ($F < 1$ Hz) is presented. The gradient and phase velocity along the Earth's surface were determined using a group of three high sensitive three-component magnetic stations situated in angles of a triangle at ~ 5 km distances (magnetic gradientometer). We found anomaly of the gradient and phase velocity values 2–3 months and 2–3 days before strong EQs ($M > 5$).

Keywords: earthquake, short-time precursors, magnetic gradientometer.

Копытенко Yuri Anatolevich — head of department, doctor of physical and mathematical sciences, professor, office@izmiran.spb.ru

Исмагилов Valery Sarvarovich — central administration, PhD, ivs@izmiran.spb.ru