

АНОМАЛЬНЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ В ВЕКОВЫХ ВАРИАЦИЯХ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ ПЕРЕД КАТАСТРОФИЧЕСКИМ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕМ В ЯПОНИИ 11.03.2011

В.С. Исмагилов, Ю.А. Копытенко, Г.М. Попов (СПбФ ИЗМИРАН, г. Санкт-Петербург,
e-mail: office@izmiran.spb.ru)

Аннотация. 11 марта 2011 г. у восточного побережья Японии произошло землетрясение с магнитудой $M=9$ - сильнейшее за весь срок сейсмических наблюдений в Японии. Эпицентр землетрясения располагался под дном моря на расстоянии ~ 130 км от берега и на глубине ~ 24 км. По данным двух магнитных станций Есаши и Мизусава, расположенных на территории Японии на расстоянии $\sim 180-200$ км от эпицентра землетрясения исследовались вековые вариации главного магнитного поля Земли. Компоненты главного магнитного поля Земли изменяются достаточно гладко в течение десятков и сотен лет. Однако в период 2000-2011 г. в районе катастрофического землетрясения на территории Японии обнаружены четыре аномалии в вековых вариациях главного магнитного поля Земли с длительностью от полугода до трех лет. Все аномалии развивались одновременно с возникновением и развитием локальных сейсмоактивных зон в пределах ~ 100 км от этих магнитных станций и предшествовали сильным землетрясениям ($M>6$). Наиболее отчетливо аномалии видны в разностях соответствующих магнитных компонент измеренных на этих двух станциях. Последняя аномалия была самой сильной и проявлялась около 3 лет перед моментом катастрофического землетрясения в Японии. Возможной причиной аномального поведения магнитного поля перед землетрясениями может быть изменение проводимости в локальной области земной коры вследствие тектонических процессов. На начальном этапе эти процессы приводят к повышению температуры и

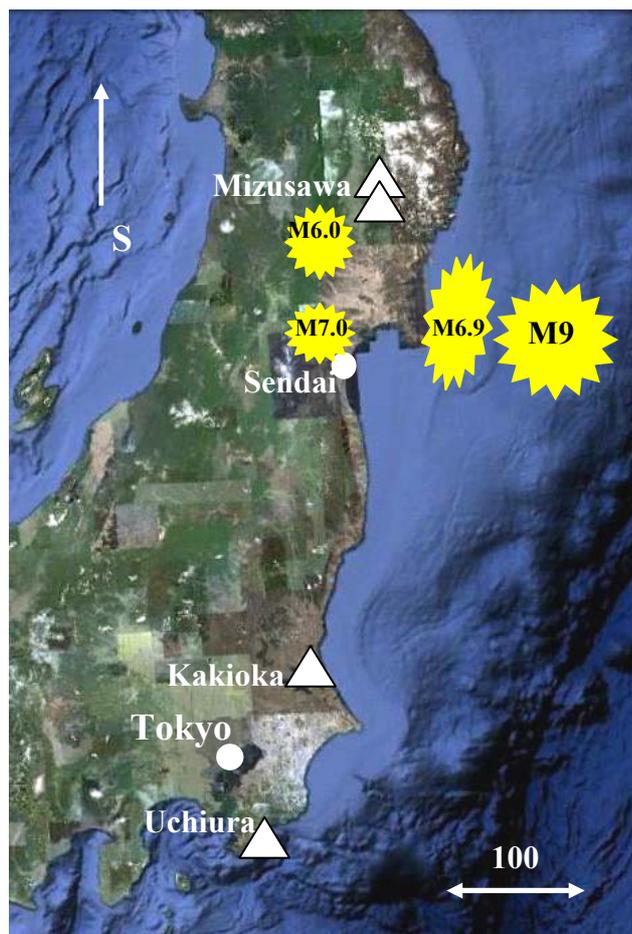


Рис. 1 Положение магнитных станций (треугольники) и районов сильной сейсмической активности (звезды) в период 01.01.2000 – 31.01.2011. В каждой звезде указана магнитуда наиболее сильного сейсмического толчка.

проводимости в области будущего гипоцентра землетрясения, что приводит к перераспределению земных токов и изменению магнитного поля на земной поверхности. В дальнейшем тектонические процессы приводят к усилению трещиноватости в области будущего гипоцентра и к уменьшению проводимости перед моментом землетрясения.

Введение

В настоящее время общепризнано, что в период подготовки землетрясения на земной поверхности наблюдаются аномальные электромагнитные УНЧ ($F < 10$ Гц) литосферные эмиссии, имеющие шумовой характер [1-6]. Интенсивности этих УНЧ возмущений обычно весьма малы (< 0.1 нТл), но перед сильными землетрясениями ($M>6$) эпицентральные расстояния, на которых они наблюдаются, достигают 100 км и более [3, 5]. Современные высокочувствительные магнитометры позволяют наблюдать такие слабые сигналы, однако, обычно датчики на территории Японии регистрируют суперпозицию магнитных возмущений литосферного и ионосферного происхождения, также на естественные магнитные поля накладывается индустриальная помеха.

Естественные УНЧ геомагнитные вариации генерируются ионосферными источниками. На земной поверхности пункты регистрации геомагнитных возмущений обычно располагаются на больших расстояниях от этих ионосферных источников (многие сотни километров). Поэтому наблюдаемые вдоль земной поверхности градиенты естественных УНЧ геомагнитных возмущений ионосферного происхождения малы и зависят от величины возмущений и расстояния до источника [7, 8].

Пункты регистрации УНЧ магнитных литосферных возмущений расположены в сейсмоактивных зонах, как правило, много ближе к их локальным источникам, чем к источникам ионосферных возмущений. Поэтому градиенты УНЧ магнитных литосферных возмущений вдоль земной поверхности по величине больше, чем для УНЧ ионосферных возмущений. Для выделения УНЧ эмиссий литосферного происхождения в работах [7-10] предложен фазово-градиентный метод, являющийся одним из разновидностей дифференциальных методов. Он позволяет определять аномальное поведение градиентов и фазовых скоростей УНЧ геомагнитных возмущений во время фазы подготовки сильного землетрясения и по направлению векторов градиентов и фазовых скоростей вдоль земной поверхности определять направление на будущий эпицентр.

11 марта 2011 г. недалеко от восточного побережья Японии произошло катастрофическое землетрясение с магнитудой $M=9$ балла по шкале Японского Метеорологического Агентства. Землетрясение сопровождалось цунами высотой до 20 м, разрушившее АЭС Фукусима. В данной работе исследуются аномальные магнитные возмущения, возникшие перед этим землетрясением в вековых вариациях магнитного поля Земли (МПЗ).

Аномалии в вековых вариациях магнитного поля Земли

На рис. 1 белыми треугольниками показаны магнитные станции. Используются данные, Есаши (ESA), Мизусава (MIZ) и Какиока (КАК). Обсерватории ESA и MIZ расположены в ~170–200 км севернее эпицентра катастрофического землетрясения произошедшего 11.03.2011 г. Расстояние между ESA и MIZ составляет ~19 км, а расстояние между ESA и КАК составляет ~332 км. Самая большая желтая звезда на рис.1 схематически отмечает эпицентр землетрясения. H, D и Z компоненты постоянного поля Земли за 11-летний период с 01.01.2000 по 31.01.2011 г. приведены на рис. 2. На заданном масштабе рисунка вариации магнитного поля на станциях Есаши и Какиока очень похожи. После 2006 года Z компонента увеличивается, D компонента – уменьшается, а H компонента медленно уменьшается в течении всего 11-летнего периода. Вертикальная линия на рисунке отмечает момент катастрофического землетрясения. Очевидно, что вековая вариация главного магнитного поля Земли не связана с магнитной активностью. Разности соответствующих магнитных компонент двух пар разнесенных магнитных станций (ESA-MIZ, ESA-КАК) приведены на рис. 3. Нижняя кривая на рисунке является разностью вертикальных компонент станций Есаши и Мизусава: $dZ(EM) = Z_{esa} - Z_{miz}$. Вторая снизу кривая отображает разность вертикальных компонент станций Есаши и Какиока $dZ(EK) = Z_{esa} - Z_{kak}$ и т.д. Магнитуды землетрясений представлены в верхней части рис. 3. Использовались только землетрясения с $M > 4$ и с эпицентральным расстоянием < 150 км от станции Есаши. В дифференциальном сигнале (6 нижних кривых) отчетливо видны аномальные вариации с длительностью 1 – 3 года и амплитудой 1–5 нТл. Более отчетливо аномалии видны на второй панели сверху. Здесь показано отношение разностей вертикальных компонент к разностям горизонтальных компонент для станций Есаши и Мизусава: $dZ(EM)/dH(EM) = (Z_{esa} - Z_{miz}) / (H_{esa} - H_{miz})$. Черные стрелки под этой кривой отмечают моменты аномалий, а красные стрелки вверх отмечают моменты сейсмических толчков с магнитудой $M \geq 6$. Очевидно, что моменты сильных землетрясений имеют задержку в 1 – 3 года относительно начальных моментов аномалий. Наиболее отчетливая аномалия, предшествующая катастрофическому землетрясению, длится дольше ранних аномалий и является более интенсивной.

Области сейсмической активности, возникавшие в течение всего 11-летнего периода показаны на рис. 1 желтыми многолучевыми звездами. Магнитуды самых сильных землетрясений указаны внутри этих областей. После аномалии 2002 г. эпицентр землетрясения располагался около г. Сендай приблизительно в 100 км к югу от станции Есаши. В 2005 – 2007 г.г. эпицентр землетрясения был расположен под дном моря на расстоянии ~150-200 км к юго-востоку от Есаши. В 2008 г. эпицентр располагался очень близко от станций Есаши и Мизусава (~50 км к юго-западу от станции Есаши). После 2009 г. сейсмичность проявилась под дном моря, где и произошло землетрясение с $M=9$.

Обсуждение результатов

Исследования динамической модели источников главного магнитного поля в работе [11] показали, что наиболее близкие к Японии геомагнитные полюса расположены в восточной Сибири и в Тихом Океане. Медленное смещение этих полюсов приводит к широкомасштабным изменениям вековых магнитных вариаций на территории Японии. Сравнивая шесть нижних кривых на рис. 2, можно заключить, что пространственный масштаб этих вариаций должен быть очень большим. Следовательно, аномалии представленные на рис. 3 являются локальными и расположены близко к станциям Есаши и Мизусава. Черные стрелки под второй сверху кривой (отношение dZ/dH для станций Есаши и Мизусава) на рис. 3 отмечают четыре обнаруженные аномалии. Красные стрелки отмечают моменты сейсмических толчков с магнитудой $M \geq 6$. Очевидно, что моменты сильных землетрясений имеют задержку в 1–3 года относительно стартов аномалий. Более того, эти землетрясения располагались в различных сейсмических зонах (желтые звезды на рис. 1). Сейсмическая зона с магнитудой $M=7.0$ появилась после возникновения магнитной аномалии в 2002 г. Средняя глубина сейсмических гипоцентров составляла ~37 км (мы рассматриваем толчки с $M \geq 4$). Магнитная аномалия 2005 г. ($M=6.9$) возникла перед началом сейсмической активности под

дном моря. Средняя глубина сейсмических гипоцентров составляла ~54 км. В 2008 г. эпицентры сейсмических толчков располагались близко к станциям Есаши и Мизусава и средняя глубина сейсмических гипоцентров составляла ~18 км. После 2009 г. сейсмическая активность проявилась под дном моря восточнее зоны активности в 2005-2007 гг. и средняя глубина сейсмических гипоцентров составляла ~36 км. Сейсмическая активность в 2005-2007 гг. и 2009 г. и, по-видимому, была связана с движением Тихоокеанской тектонической плиты [12]. Почти во всех зонах субдукции сейсмическая активность проявляется ранее на больших глубинах в земной коре, а затем на меньших [13].

Аномалии в магнитном поле, возникающие перед землетрясениями наблюдались и ранее [14]. Этот эффект объясняется изменением электрической проводимости в локальных областях земной коры. Действительно, тектонические движения приводят к увеличению температуры и повышению проводимости в очагах будущих землетрясений. Теллурические токи перераспределяются возле локальной аномалии проводимости и создают аномалию в магнитном поле на земной поверхности. Знак этой аномалии зависит от местоположения магнитной станции относительно аномалии.

Тектонические процессы во время периода подготовки землетрясения могут привести к изменению угла наклона земной поверхности, на которой расположена магнитная станция. Изменение ориентации магнитных датчиков дополнительно может быть возможной причиной изменения показаний магнитометра. Например, наклон датчика на 0.01° на территории Японии приводит к изменению показаний прибора на 6.6 нТл в горизонтальной магнитной компоненте. Как видно из рис. 3 аномалии после возникновения сначала усиливаются, а затем уменьшаются и перед сильным землетрясением практически исчезают. Возможно, нагрев локальной области в земной коре вследствие тектонических процессов приводит к повышению проводимости в этой области, возникновению и развитию аномалии, а затем, дальнейшее развития тектонических процессов приводит к повышению уровня трещиноватости, следовательно, к уменьшению проводимости и исчезновению аномалии проводимости.

Тектонические процессы во время периода подготовки землетрясения могут привести к изменению угла наклона земной поверхности, на которой расположена магнитная станция. Изменение ориентации магнитных датчиков дополнительно может быть возможной причиной изменения показаний магнитометра. Например, наклон датчика на 0.01° на территории Японии приводит к изменению показаний прибора на 6.6 нТл в горизонтальной магнитной компоненте.

Как видно на рис. 3 аномалии после возникновения сначала усиливаются, а затем уменьшаются и перед сильным землетрясением практически исчезают.

Таким образом, в течение периода 2000-2011 гг. в районе катастрофического землетрясения на территории Японии обнаружены четыре аномалии в вековых вариациях главного магнитного поля Земли. Все магнитные аномалии предшествуют сильным землетрясениям и наиболее отчетливо видны в разностях соответствующих магнитных компонент разнесенных магнитных станций. Последняя аномалия была самой сильной и существовала около 3 лет перед моментом катастрофического землетрясения.

Выводы

Получены следующие результаты:

- В течение периода 2000-2011 гг. в районе катастрофического землетрясения на территории Японии обнаружены четыре аномалии в вековых вариациях главного магнитного поля Земли.

- Все аномалии предшествуют сильным землетрясениям и наиболее отчетливо видны в разностях соответствующих магнитных компонент разнесенных магнитных станций.

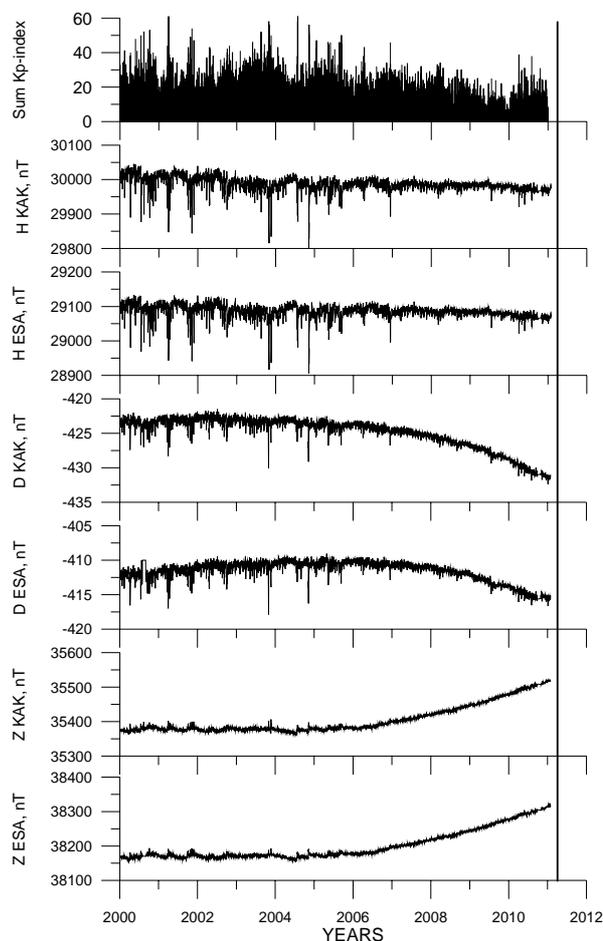


Рис. 2 Суммарные за сутки Кр-индексы (верхняя панель) и компоненты вековых вариаций главного магнитного поля Земли для станций Есаши и Какиока для периода 01.01.2000 – 31.01.2011. Вертикальная линия отмечает момент катастрофического землетрясения.

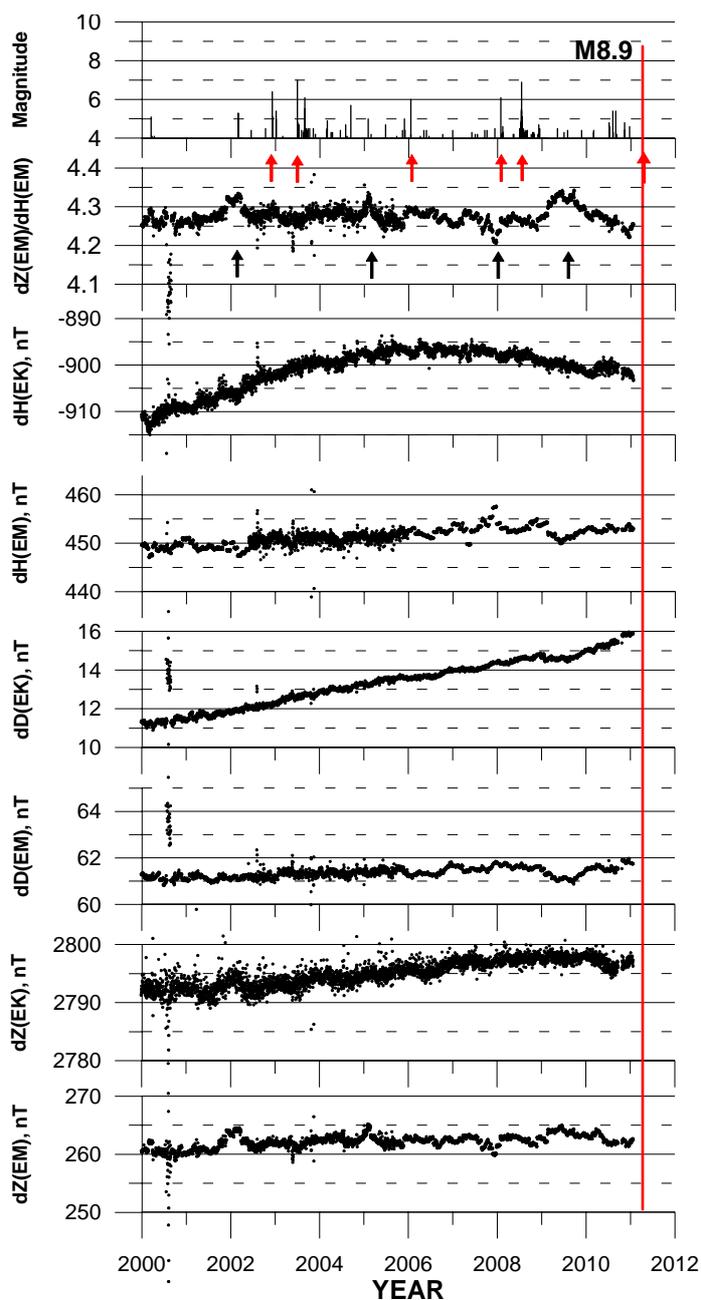


Рис. 3 Магнитуды землетрясений ($M \geq 4$) (верхняя панель) в течении периода 01.01.2000 – 31.01.2011. Разности (dH , dD , dZ) соответствующих магнитных компонент пар разнесенных магнитных станций ESA-MIZ (EM) и ESA-KAK (EK) – шесть нижних кривых. Отношение dZ/dH для станций Есаши и Мизусава (вторая кривая сверху). Черные стрелки под этой кривой отмечают моменты аномалий, а красные стрелки отмечают моменты сейсмических толчков с магнитудой $M > 6$.

Secular variations in the main geomagnetic field within the scope of the dynamic model of field source, *Geomagnetism and Aeronomy*, 48, 542-550, 2008.

12. Simon M., Minson S.E., Sladen A., Ortega F., Jiang J., Owen S.E., Meng L., Ampuero J-P., Wei S., Chu R., Helmberger D.V., Kanomari H., Hetland E., Moore A.W., Webb F.H., The 2011 magnitude 9.0 Tohoku-oki earthquake: Mosaiking the megathrust from seconds to centuries, *Scienceexpress*, P.5, 19 May, 2011.

13. Molchanov O.A., Underlying mechanism of precursory activity from analysis of upward earthquake migration, *Natural Hazards Earth Sys. Sci.*, 11, 135-143, 2011.

14. Mogi K., *Earthquake Predictions*, Academic Press, Japan, 166 p, 1985.

- Последняя аномалия была самой сильной и существовала около 3 лет перед моментом катастрофического землетрясения с магнитудой $M=9$.

Список литературы

1. Fraser-Smith A.C., The ultralow-frequency magnetic fields associated with preceding earthquakes, "Electromagnetic Phenomena Associated with Earthquakes", Ed. by M. Hayakawa, Transworld Research Network, Kerala, India, 1-20, 2009.

2. Hayakawa M., Hattori K., Ohta K., Monitoring of ULF (ultra-low-frequency) geomagnetic variations associated with earthquakes, *Sensors*, 7, 1108-1122, 2007.

3. 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 Earth Sys. Sci.*, 20, 1-5, 2002.

4. Kopytenko Yu.A., Ismaguilov V.S., Hattori K., Hayakawa M., Gradients and phase velocities of ULF geomagnetic pulsations before and during seismic active period, *Geophys. Res. Abstracts*, V.5, 06751, EGS, Nicca, 2003.

5. Molchanov O.A., Hayakawa M., On the generation of ULF seismogenic electromagnetic emissions, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 105, 201-210, 1998.

6. 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 Аэрномия*, т.46, №3, стр.423-430, 2006.

7. 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 Earth Sys. Sci.*, 1, 1-9, 2001.

8. Kopytenko Yu.A., Ismaguilov V.S., Kopytenko E.A., Voronov P.M., Zaitsev D.B., Magnetic location of geomagnetic disturbance sources, *DAN, series "Geophysics"*, 371, № 5, 685-687, 2000.

9. Kopytenko Yu.A., Ismaguilov V.S., Hattori K., Hayakawa M., Gradients and phase velocities of ULF geomagnetic pulsations before and during seismic active period, *Geophys. Res. Abstracts*, V.5, 06751, EGS, Nicca, 2003.

10. 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 Аэрномия*, т.46, №3, стр.423-430, 2006.

11. Demina I.M., Nikitina L.V., Farafonova Yu.G.,