

# Вариации компонент вектора индукции и горизонтального тензора перед землетрясением Тохоку 11 марта 2011 г. по данным японских геомагнитных обсерваторий

© *И. И. Рокитянский*<sup>1</sup>, *В. И. Трегубенко*<sup>2</sup>, *В. И. Бабак*<sup>1</sup>,  
*А. В. Терешин*<sup>1</sup>, 2013

<sup>1</sup>Институт геофизики НАН Украины, Киев, Украина

<sup>2</sup>Украинский государственный геологоразведочный институт,  
Киев, Украина

Поступила 20 сентября 2012 г.

*Представлено членом редколлегии В. Н. Шуманом*

Ця стаття є продовженням публікації [Бабак и др., 2013]. У вступній частині розглянуто джерела змінного магнітного поля, що спостерігається на поверхні Землі. Описані найдостовірніші випадки літосферної емісії, зареєстрованої перед сильними землетрусами в п'яти сейсмічних регіонах світу. Обговорено зміни електропровідності земної кори як провісники землетрусів. З виконаного огляду випливає перспективність використання як провісника землетрусів геомагнітних функцій відгуку (вектора індукції і горизонтального тензора), що реагують і на літосферну емісію, і на зміни електропровідності. Аналіз матеріалів 18 японських геомагнітних обсерваторій (6 з них — у радіусі 400 км від епіцентру землетрусу Тохоку) показав наявність інтенсивних шумів на періодах, менших за 500 с. Застосування для обчислення компонент функцій відгуку стійких до шумів алгоритмів тільки частково послабило їх вплив. Виконано великий обсяг обробки, у результаті створено базу даних функцій відгуку за 10—20 років для 18 японських обсерваторій. У ході обробки було знайдено різні похибки, причина яких не завжди зрозуміла. Детальна обробка секундних даних за 10 тижнів перед землетрусом Тохоку дала змогу виділити серію аномалій тимчасової поведінки функцій відгуку: за 7—9, 19—21, 33—36 і, можливо, ~ 60 діб. Моменти аномалій амплітуди і фази злегка змінюються для різних періодів варіацій, різних компонент функцій відгуку, різних станцій. Така багатопланова поведінка, з одного боку, зумовлена впливом геомагнітної активності та внеском перешкод, з іншого — явно відчувається вплив провісників і косейсмічних явищ, що може відображати міграцію літосферної емісії та/або зміни електропровідності у літосфері Землі. Розшифрування подібної інформації може дати цінний матеріал для розуміння фізики підготовки землетрусів і виникнення провісників.

This work is a continuation of a work [Babak et al., 2013]. The sources of variable magnetic field observed at the surface of the Earth are presented in the introductory part. The most reliable cases of lithospheric emission registered before strong earthquakes are described for five seismic regions of the World. The changes of electrical conductivity of the Earth's crust as a precursor of earthquakes are discussed. The review shows that geomagnetic response functions (induction vector and horizontal tensor) can be used as an earthquake precursor, which carry information both on lithospheric emission and changes in the electrical conductivity. Analysis of 18 Japanese geomagnetic observatories data (6 of them are away from the Tohoku earthquake epicenter less than 400 km) shows the presence of intense noise for periods less than 500 s. Application of noiseproof algorithms for calculation of response function components only partially reduced their influence. A large amount of processing was carried out and database of response functions for 10—20 years for 18 Japanese observatories was created. During the processing variety of record deficiencies were found, the cause of which is not always clear. Detailed processing of one-second data for 10 weeks before the Tohoku earthquake reveals anomalies of response functions temporal behavior: 7—9, 19—21, 33—36 and perhaps ~ 60 days before the event. Moments of amplitude and phase anomalies vary slightly for different periods of variations, for different components of the response functions, for different stations. This behavior is caused, on one hand, by the influence of geomagnetic activity and the contribution of noise, on the other hand, it can be the manifestation of precursors and co-seismic events, and this behavior may reflect a migration of lithospheric emission and/or changes in the electrical conductivity of the Earth's lithosphere. Decoding of this information can provide valuable information for understanding the physics of earthquake preparation and precursors formation.

Переменное электромагнитное (ЕМ) поле ( $\mathbf{E}$ ,  $\mathbf{V}$ ), наблюдаемое на поверхности Земли, является суммой полей многих источников. По местоположению их можно разделить на 3 основные группы: внешние, поверхностные, внутренние.

1. Внешние поля токов, текущих в ионосфере и магнитосфере Земли, изменяются под действием изменений солнечного ветра, земных приливов и других воздействий. Их можно условно называть магнитотеллурическими (МТ), поскольку они используются в магнитотеллурическом и магнитовариационном (МВ) методах исследования электропроводности земной коры и верхней мантии. МТ-поля ионосферно-магнитосферного происхождения охватывают диапазон периодов от 1 с до суток. К МТ-полям можно отнести также поля удаленных грозных разрядов и радиостанций, которые подчиняются закономерностям дальней зоны, периоды от секунды до ее тысячных долей. Вследствие высокой электропроводности твердой Земли и океанов по сравнению с нижней атмосферой компоненты МТ-поля ведут себя в первом приближении как вертикально падающая плоская волна — модель Тихонова — Каньяра, являющаяся теоретической основой классических МТ—МВ методов. В рамках этой модели МТ-поле над горизонтально-слоистыми по электропроводности участками Земли имеет только горизонтальные компоненты электрического и магнитного полей (нормальное МТ-поле). На горизонтально неоднородных участках Земли появляется аномальная вертикальная компонента магнитного поля, закономерно связанная с неоднородным распределением электропроводности. В результате вектор геомагнитных вариаций тяготеет ни к горизонтальной плоскости (как для нормального поля), а к наклонной плоскости. По данным трехкомпонентных геомагнитных наблюдений в одном пункте можно определить наклон этой плоскости и по нему построить вектор индукции, указывающий местоположение и направление избыточных токов внутри Земли. Горизонтальные поля  $\mathbf{E}_\tau$  и  $\mathbf{V}_\tau$  в одном пункте и одноименные поля в разнесенных пунктах связаны линейными тензорными соотношениями. Тензоры определяются только распределением электропроводности твердой и жидкой геосфер. Компоненты векторов индукции и горизонтальных тензоров являются функциями отклика (*response function* = RF) реальной Земли на приложенное внешнее поле, в идеале на поле вертикально падающей плоской волны. Если электропроводность земных недр не изменяется, RF не должны изменяться.

2. Наземные поля — это в основном поля, созданные человеком. Основные источники: электрифицированные железные дороги, заземления линий электропередач, заземленные электродвигатели, радиостанции, катодная защита трубопроводов и т. п., а также близкие молниевые разряды и другие. Они, как правило, характеризуются закономерностями ближней зоны [Ваньян, 1997]. Для перечисленных выше источников электрические компоненты существенно преобладают над магнитными (по сравнению с МТ-полем). Если же наземным источником является перемещение ферромагнитных тел (транспорта на расстоянии менее 1 км от пункта наблюдения), незаземленная или вдали от заземлений линия электропередач, то преобладают магнитные компоненты. В обоих случаях RF будут искажены по сравнению со случаем чистого МТ-поля. В первом случае импеданс будет завышен, во втором — занижен. Наземные поля являются помехами при проведении МТ—МВ исследований электропроводности Земли. Для минимизации их вредного влияния разрабатываются помехоустойчивые схемы наблюдения и обработки записанных ЕМ-полей, однако и они не помогают, если амплитуда помех значительно превышает амплитуду полезного МТ-поля. Особенно сильны помехи близ железных дорог, электрифицированных постоянным током — помехи от них оказывают влияние на расстояниях в десятки километров.

3. Внутренние поля. Если не считать электрические агрегаты шахт и скважин, то все внутренние поля можно считать естественными. Не будем относить к внутренним источникам и электрические токи, индуцированные внешними МТ-полями в проводящих слоях Земли. Поля этих токов являются вторичными полями первично внешних источников. Собственно внутренние поля будем называть общим термином "литосферная эмиссия" (ЛЭ). Эти поля несут уникальную информацию о земных недрах и о процессах, в них происходящих. Изучение ЛЭ находится в начальной стадии как в части накопления наблюдательных / экспериментальных данных, так и в смысле объяснения имеющихся наблюдений. Так, наблюдаемая высокочастотная ЛЭ (килогерцы и мегагерцы) не находила объяснения с позиций классической электродинамики и достоверность результатов наблюдения ставилась под сомнения. В последнее время появились нетрадиционные подходы [Гульельми, 2007; Шуман, 2007, 2010, 2012], привлекающие новые физические явления для объяснения парадоксальных результатов. Пе-

речень физических явлений, могущих генерировать ЕМ-поля внутри Земли, очень широк. Сейсмoeлектрический и сейсмомангнитный эффекты, электрокинетические явления и другие преобразовывают механические колебания, течения, напряжения в ЕМ-поля. Обзор этих явлений не входит в нашу задачу. Рассмотрим данные наблюдений о ЛЭ в ультранизкочастотном (УНЧ) диапазоне для периодов больше 1 с. Для этого диапазона зарегистрированы предвестники перед некоторыми землетрясениями (ЗТ).

**Литосферная эмиссия в УНЧ диапазоне: обзор данных наблюдения. Аляска.** Наиболее ранним сообщением об ЕМ-предвестнике можно считать заметку [Mooge, 1964], в которой продемонстрирована запись на обсерватории Кодиак, оказавшейся в 30 км северо-западнее от разломной зоны, вдоль которой произошло смещение во время катастрофического ЗТ  $M 9,2$  27 марта 1964 г. на Аляске. Наиболее сильное магнитное возмущение с амплитудой до 100 нТл было зарегистрировано за 1 ч и 6 мин перед ЗТ.

**Калифорния, США.** Большой резонанс получило сообщение [Fraser-Smith et al., 1990], в котором описана запись мониторинговой системы Стенфордского университета, оказавшейся в 7 км от эпицентра ЗТ Лома — Приета  $M 7,1$  18 октября 1989 г. в Калифорнии. Мониторинговая система записывала и анализировала ЕМ-поля в частотном диапазоне 0,01—10 Гц. В систему входил компьютер, который вычислял каждые полчаса среднюю мощность в каждом из 9 узких частотных интервалов, покрывающих весь диапазон 0,01—10 Гц. Мониторинг проводился с 1987 г., нормальное поле было хорошо изучено. После 12 сентября аномальные сигналы появились в диапазонах 0,05—0,1 и 0,1—0,2 Гц, и достигли величины 1,5 нТл. К 5 октября аномальное увеличение появилось на всех частотах с максимумом на самой низкой частоте 0,01 Гц, превысив нормальный уровень в 30 раз. Последние 5 дней перед землетрясением аномалия постепенно уменьшалась, а за 3 ч до ЗТ резко увеличилась до 6 нТл. Авторы [Fraser-Smith et al., 1990] сопоставили записанные аномалии с сейсмической и геомагнитной активностью и сделали вывод, что полученные аномалии не связаны с этими активностями. Таким образом, этот результат можно рассматривать как достоверно выделенный предвестник, а использованную одноточечную мониторинговую систему можно считать непревзойденной до настоящего времени. За время работы этой системы произошло еще 2 ЗТ на

значительно большем расстоянии, предвестниковые сигналы не были записаны и систему сняли с мониторинга.

Еще одна подобная система, анализировавшая сигнал в диапазоне частот 0,1—10 Гц, разбитом на пять поддиапазонов, зарегистрировала [Dea, Voegner, 1999] небольшой аномальный сигнал перед ЗТ Northridge  $M 6,7$  17 января 1994 г. Установка находилась на расстоянии 160 км от эпицентра. Аномальный сигнал появился на самом высокочастотном диапазоне 0,1—0,5 Гц за 19 дней и позднее распространился на более высокие частоты.

**Кавказ.** На обсерватории Душети за 4 ч до Спитакского ЗТ  $M 6,9$  7 декабря 1988 г. зарегистрирован интенсивный, порядка 10 нТл, шумоподобный сигнал длительностью чуть больше часа [Molchanov et al., 1992; Kopytenko et al., 1993]. Подобный сигнал зарегистрирован через сутки перед сильным афтершоком. Расстояние до ЗТ составляло 129 км. В последующие годы работали три полевые МВ станции, на которых были записаны предвестники двух типов (шумоподобные и синусоидальные) перед ЗТ Рача  $M 6,9$  29 апреля 1991 г., его афтершоками и рядом более слабых ЗТ [Kopytenko et al., 1994]. При этом наблюдался эффект селективности, когда сигнал на более удаленной от эпицентра обсерватории имел большую амплитуду, чем сигнал на более близкой обсерватории.

**Тайвань.** 21 сентября 1999 г. ЗТ Чи-Чи (Chi-Chi)  $M 7,6$  произошло в Центральном Тайване. Одна из магнитных станций оказалась близ поверхностного разлома Челунгпу, вдоль которого произошло сильное смещение. Интенсивные импульсы магнитного поля до 200 нТл начались за 34 дня до ЗТ и продолжались ровно месяц после него и резко прекратились после другого сильного ЗТ Chia-Джи (Chia-Yi) близ другого конца разлома [Tsai et al., 2006]. В работе [Hattori et al., 2002] использовалась трехкомпонентная геомагнитная станция, по результатам наблюдений за семь месяцев аномалии поляризации  $Z/H_T$  были зарегистрированы перед двумя ЗТ:  $M 6,2$  на расстоянии 100 км и  $M 6,8$  на расстоянии 150 км.

**Греция.** Особым случаем являются наблюдения сейсмoeлектрических сигналов (SES) в Греции [Varotsos, 2005; Varotsos et al., 2011] так называемым методом VAN, названным так по фамилиям авторов метода. Для регистрации ЛЭ в Греции с 1980 г. установлены и работают от 10 до 15 станций, каждая укомплектована системой заземленных электрических диполей от 6 до 100 штук длиной от 50 м до 20 км. Система

диполей позволяет отделить ЛЭ от помех и МТ-сигнала. Варотос и соавторы за 33 года непрерывных наблюдений достоверно выделили десятки предвестников и изучили закономерности их поведения. Магнитные наблюдения проводились только на одной станции, записаны случаи синхронной регистрации *E*- и *B*-компонент ЛЭ. Важным результатом является обнаружение эффекта локальной избирательности, состоящей в том, что в некоторых (активных) пунктах предвестники хорошо наблюдаются, в других (пассивных) они не наблюдаются или имеют существенно меньшую амплитуду при одинаковом расстоянии до эпицентра.

Представленный материал позволяет сделать однозначный вывод: перед некоторыми ЗТ характерные УНЧ сигналы литосферного происхождения наблюдались и их можно считать предвестниками. Случаи их регистрации обусловлены удачным попаданием подходящей аппаратуры в зону достаточно интенсивной ЛЭ. Для мониторинга предвестников необходима развитая сеть наблюдений. Прообразом такой сети можно считать наблюдения SES в Греции.

**Вариации электропроводности в литосфере.** Электропроводность большинства горных пород обусловлена хорошо проводящей компонентой (водными растворами и поверхностными пленками, частичными расплавами, пленками углерода и т. д.), расположенной в поровом/межзерновом пространстве, окруженном кристаллическими массами породообразующих минералов. Электропроводность существенно зависит от пространственной связности хорошо проводящей компоненты, а последняя зависит от связности межзерновых/поровых пространств. При изменении напряженного состояния массива горных пород как связность, так и сам объем поровых/межзерновых пространств могут существенно изменяться. Об этом свидетельствуют расчеты [Барсуков, 1979; Ваньян, 1984], лабораторные опыты и натурные наблюдения [Барсуков, Сорокин, 1973]. Приведем примеры доказательных натуральных экспериментов, выполненных методом дипольных электрических зондирований с контролируемым источником, т. е. без использования МТ-источников, зависящих от космической погоды, геомагнитной и грозовой активности, времени суток, сезона. Глубинные дипольные зондирования с расстоянием 180 км [Saraev et al., 2002] и 950 км [Zhamaletdinov et al., 2004] выполнены на Балтийском щите. В обеих работах уверенно зарегистрированы суточные вариации кажущегося сопротивления, хорошо коррелирующиеся с верти-

кальной компонентой земных приливов. Объясняют полученные вариации изменениями нагрузок на земную кору от приливного подъема / опускания земной коры с амплитудой порядка 4 см, приводящими к притоку/оттоку электропроводных флюидов в/от поры, трещины, капилляры горных пород. При геодинамических процессах, особенно при подготовке ЗТ, накапливаются напряжения, на несколько порядков большие приливных воздействий. Например, существенные изменения уровня грунтовых вод иногда наблюдаются за сотни километров от очага ЗТ. Мониторинг кажущегося сопротивления в сейсмоактивных регионах (Средняя Азия, Байкал, Камчатка, Япония и др.) показал, что изменения электропроводности литосферы могут быть измерены на поверхности Земли [Альтгаузен, Барсуков, 1970; Барсуков, Сорокин 1973; Авагимов и др., 1988; Мороз и др., 2007; Московская и др., 2010].

Итак, ЛЭ и вариации электропроводности в литосфере сейсмически активного региона являются перспективными ЕМ-предвестниками ЗТ. Как показано выше, ЛЭ наблюдалась в редких случаях удачного попадания обсерватории в место с интенсивным сигналом, хотя при густой сети наблюдений и использовании современным методов обработки можно выделить и слабый сигнал.

Для выделения предвестников одним из перспективных методов обработки геомагнитных вариаций является использование RF. Здесь надо отметить следующий аспект. Определение RF основано на линейных связях между компонентами геомагнитного поля. Линейность сохраняется для определенной конфигурации (набора конфигураций, например, для МТ-поля — для источников, удовлетворяющих условию дальней зоны или, другими словами, условию частотного зондирования [Ваньян, 1997; Рокитянский, 1975; Светов, 1991, 1992], сводящемуся к модели плоской волны Тихонова — Каньяра). При использовании поля другой конфигурации (например, гармоник суточной вариации, полей локальных гроз, транспортных и индустриальных источников, литосферной эмиссии и т. д.) для каждой конфигурации линейность полей сохраняется, но коэффициенты линейной связи, т. е. компоненты RF, будут свои для каждой конфигурации (условие частотного зондирования не выполняется). Ситуацию, возникающую при наложении полей различной конфигурации, принято называть "нарушением линейности" в соотношениях между компонентами наблюдаемого суммарного поля. Представ-

ляется, что этот термин не вполне удачен. Ведь если суммарное поле некоторого набора конфигураций изменится в некоторое число раз при сохранении соотношения между конфигурациями, то коэффициенты (RF) не изменятся. Фактически, в природе соотношение конфигураций, т. е. вклада полей различных источников, непрерывно изменяется: МТ-поле непрерывно изменяется (см.  $K_p$  индекс на рис. 6 и 7), помехи изменяются, ЛЭ и близкие грозы вообще появляются эпизодически. В геоэлектрике, изучающей электропроводность недр Земли, выбирается некоторая базовая конфигурация источника (плоская волна в классической магнитотеллурике, поле линий электропередач, токи растекания от электропоездов и др.), а все остальные источники рассматриваются как помехи, влияние которых минимизируется или статистическими методами, или путем выбора временных интервалов, с благоприятным соотношением сигнал/шум путем многооконного взвешивания и отбраковки. В результате функции отклика получают постоянные в течение всего использованного интервала наблюдений. Это в геоэлектрике.

При мониторинге использованный интервал наблюдений желательно иметь как можно короче. При оперативном слежении за литосферной погодой в сейсмическом регионе с целью краткосрочного прогноза интервал наблюдений для каждого определения RF желательно сократить до 1 дня или нескольких часов. Для статистики не остается места. Да и выделять один источник весьма рискованно: предвестником могут быть как изменения электропроводности, так и ЛЭ с существенно различным поведением RF.

Как выяснено в результате обработки большого материала, на японских обсерваториях весьма сильны транспортные, промышленные и инструментальные помехи. В таких условиях выделение предвестников весьма затруднительно и ненадежно. Выход видится в комплексном использовании вектора индукции и горизонтального тензора, поскольку они по-разному "чувствуют" изменение электропроводности и ЛЭ.

До недавнего времени для выделения предвестников использовались только векторы индукции и их компоненты. Ряд обнадеживающих результатов опубликован в литературе. Их краткий обзор, а также формулы, определяющие векторы индукции и горизонтальный магнитный тензор, представлены в предыдущей работе [Бабак и др., 2013].

### Описание использованных материалов.

От четырех японских организаций получены трехкомпонентные записи геомагнитного поля с дискретностью 1 мин для 17 обсерваторий (рис. 1). Обработка по программе [Климкович, 2009] (являющейся модификацией программы Семенова для целей мониторинга) была выполнена для каждого дня за весь период полученных данных с 1996/2001 по 2011 гг. включительно. Полученные компоненты вектора индукции характеризуются значительным разбросом. Для их сглаживания и компактного представления многолетних данных вычислялись среднемесячные значения, по ним строились графики четырех компонент вектора индукции  $A_u, B_u, A_v, B_v$  в зависимости от времени. Пример такого построения дан в работе [Бабак и др., 2013]. На некоторых компонентах четко видна вариация с периодом 1 год, на других она значительно меньше и не прослеживается на фоне нерегулярных вариаций. Перед ЗТ Тохоку на четырех станциях KNZ, КАК, ОТА, НАР юго-западнее эпицентра на коротких периодах  $T < 20$  мин зарегистрированы долговременные (3—6 лет) изменения векторов индукции [Бабак и др., 2013]. На рис. 1 представлены векторы индукции для самого длинного и самого короткого (из обработанных по программе Климкович) интервалов периодов, средние за 2001 и 2011 гг. На станциях KNZ, ОТА и НАР на периодах короче 20 мин заметно изменение векторов индукции в 2011 г. по сравнению с 2001г., наибольшее изменение наблюдается на самых коротких периодах 2,5—5 мин. Выделить еще более короткие периоды по 1-минутным данным не было возможности, хотя, как видно из приведенного обзора, ЛЭ максимальна на периодах 1—100 с. Поэтому мы стали искать данные с отсчетом каждую 1 с. К настоящему времени удалось получить данные станций KNZ, КАК, MIZ, ESA из числа представленных на рис. 1, а также станции UCU и KYS (за 2001 г.) на п-ве Босо (Boso) недалеко от KNZ (см. рис. 5). На коротких периодах обнаружались сильные помехи, особенно на п-ве Босо. На рис. 2 представлены синхронные копии магнитограмм пяти обсерваторий.

Самая чистая запись на обсерватории КАК. На расположенных северо-западнее от эпицентра ЗТ Тохоку обсерваториях MIZ и ESA видна небольшая, не исчезающая даже ночью, помеха с амплитудой 0,1—0,3 нТл и преобладающими периодами 2—5 с. На северной ( $B_x$ ) компоненте на этих трех обсерваториях видны синхронные квазисинусоидальные МТ-ва-

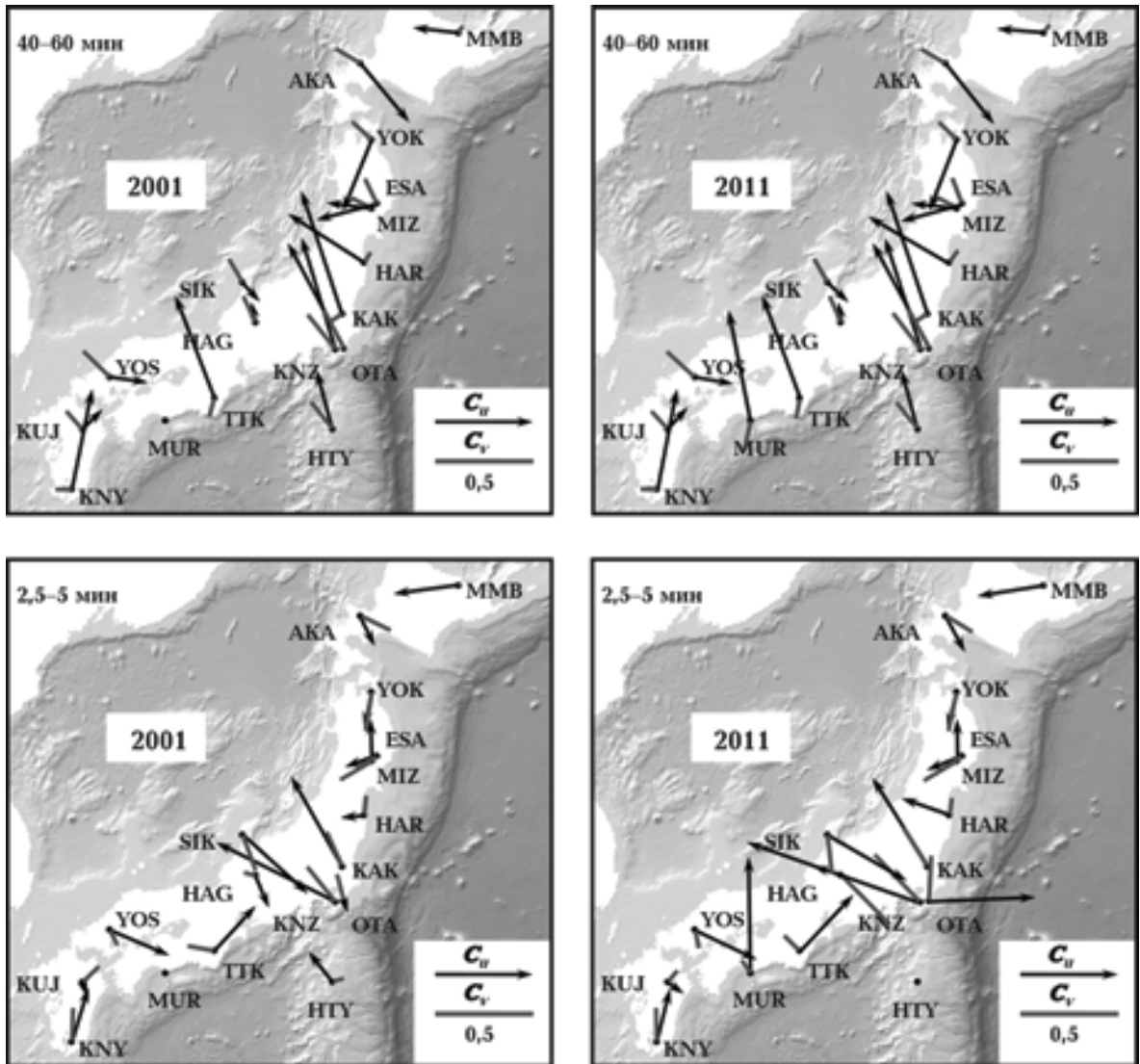


Рис. 1. Средние за 2001 и 2011 гг. векторы индукции на 17 обсерваториях Японии для двух диапазонов периодов 40—60 и 2,5—5 мин. Черными стрелками обозначены действительные векторы  $C_u$ , без стрелок линиями — мнимые  $C_v$ . Обработка выполнена по программе Т. А. Климкович.

риации с периодом 15—25 с и амплитудой до 0,3 нТл. Они есть и на станциях KNZ и UCU, но трудно различимы на фоне сильных помех. Кроме того, на обеих горизонтальных компонентах наблюдаются МТ-вариации с периодом 250—400 с и амплитудой до 1 нТл. На вертикальной компоненте МТ-вариации проявляются на каждой обсерватории по-своему, отражая различные геоэлектрические условия в окрестности обсерватории, характеризующиеся векторами индукции. Станции KNZ и UCU расположены на п-ве Босо недалеко от Токио, поблизости от этих станций проходит железная дорога, питаемая, по всей видимости, постоян-

ным током. Помехи на этих станциях наблюдаются в широком диапазоне периодов от единиц до 500 с, обуславливая искажения результатов обработки данных.

В этих условиях была использована многофункциональная многооконная программа, разработанная И. М. Варенцовым, Е. Ю. Соколовой и другими в Институте геоэлектроманнитных исследований ИФЗ РАН [Варенцов и др., 2003]. Однако применение помехоустойчивых алгоритмов и критериев когерентности не улучшили существенно результаты на п-ве Босо для периода 500 с и короче. Высокая множественная когерентность считается признаком хоро-

шего качества данных. Эта величина на коротких периодах менее 500 с оказалась (рис. 3) меньше допустимого критерия для обсерватории КАК, но вполне удовлетворительной для станции KNZ, где, как это видно на рис. 2, помеха существенно больше, чем в КАК. По-видимому, в КАК помеха и "полезный" (для вычисления RF) сигнал имеют сопоставимую амплитуду и, будучи некоррелированными, эти две составляющие обуславливают низкую когерентность суммарного поля. В KNZ помеха обычно значительно больше "полезного" МТ-сигнала (см. рис. 2), поэтому когерентность остается высокой, но основной вклад в наблюдае-

мое на коротких периодах поле вносит уже не вертикально падающая плоская волна МТ-поля, а блуждающие токи растекания от электропоездов и питающих их подстанций с закономерностями ближней или промежуточной зоны источника. На рис. 3 даны частотные характеристики входной  $S_0(B_x, B_y)$  и множественной  $S_0(B_z/B_x, B_y)$  когерентностей для четырех обсерваторий. Малая  $S_0(B_x, B_y)$  означает богатый набор поляризаций горизонтального поля и, следовательно, хорошую определяемость RF, большая величина (близкая к 1)  $S_0(B_z/B_x, B_y)$  характеризует хорошее качество линейной связи между вертикальной и горизонтальными ком-

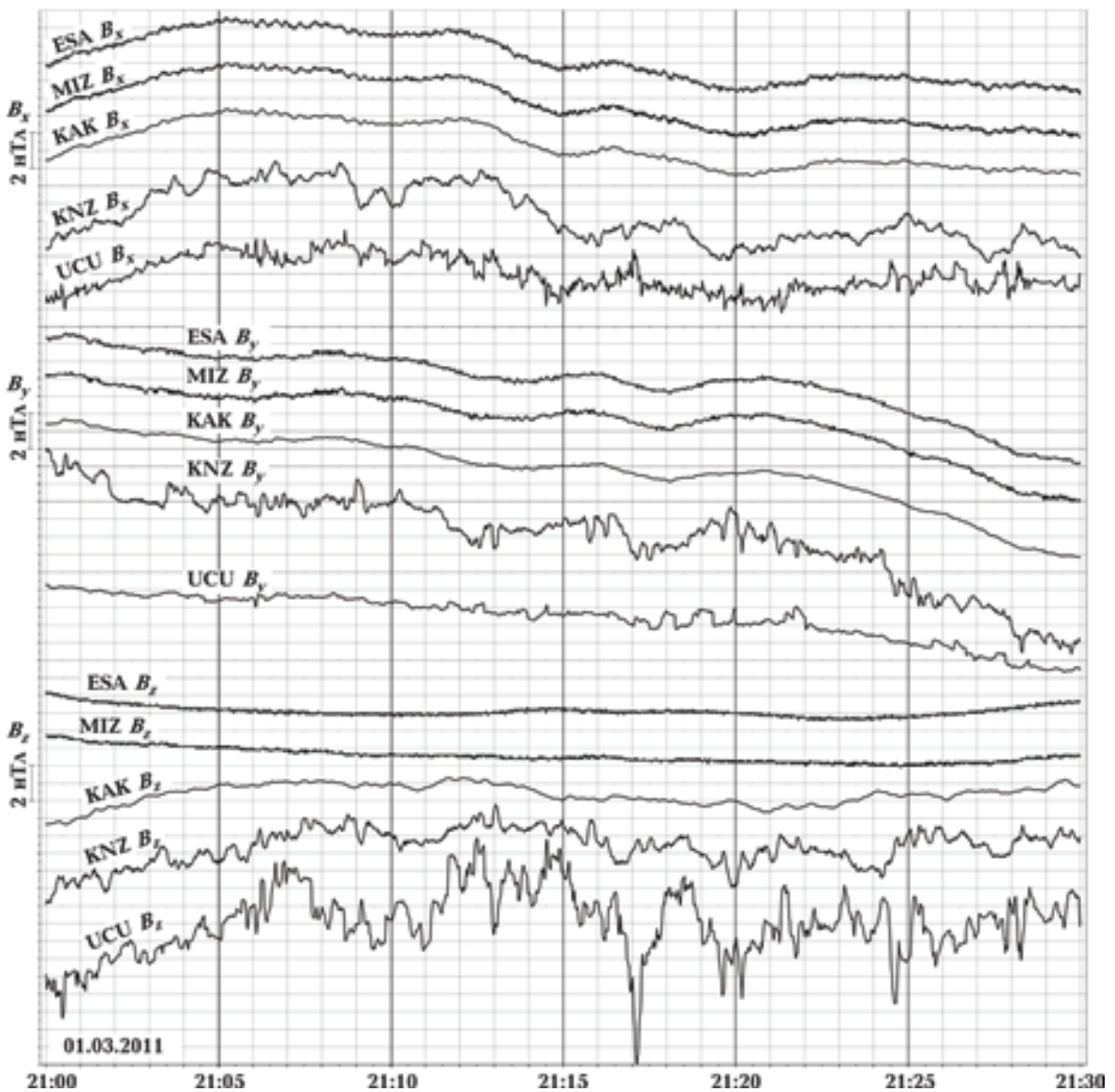


Рис. 2. Пример синхронных записей на пяти японских обсерваториях ESA, MIZ, KAK, KNZ, UCU.

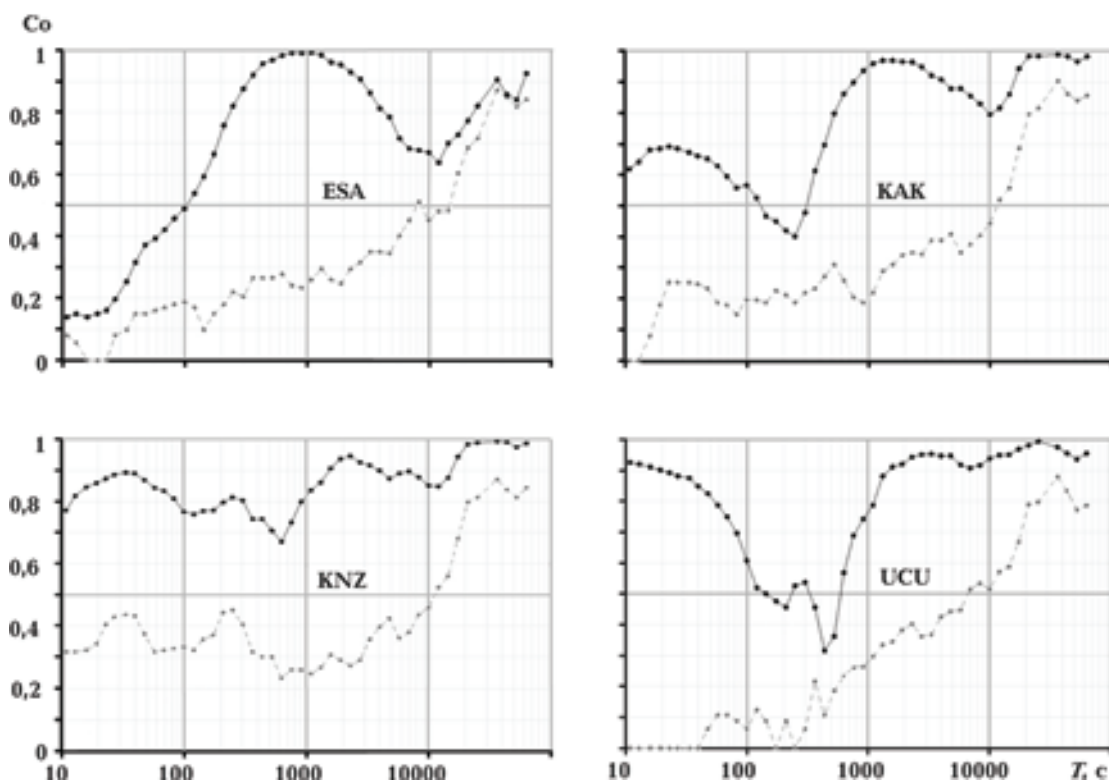


Рис. 3. Частотные характеристики входной (бледная кривая с ромбиками)  $Co(B_x, B_y)$  и множественной (черная кривая с кружочками)  $Co(B_z/B_x, B_y)$  когерентностей для четырех обсерваторий.

понентами. Входная когерентность увеличивается с увеличением периода. На фоне этого монотонного увеличения на обсерватории KNZ наблюдаются два локальных максимума на периодах 35 и 250 с, соответствующих местной помехе, на обсерватории KAK они тоже есть, но выражены слабее. В зоне этих максимумов наблюдаются повышенные значения множественной когерентности, однако в данном случае они не свидетельствуют о хорошем качестве определения функций отклика, поскольку на этих периодах помехи преобладают и полученные RF характеризуют не распределение электропроводности, а параметры источника помех. Приведенное наглядно иллюстрирует поведение векторов на п-ве Босо.

На рис. 4 даны векторы индукции на п-ве Босо для 6 периодов. На периодах 1000 с и более длинных все действительные векторы согласно направлены на ССВ, т. е. от глубокого моря и границы между Филиппинской и Охотской плитами с максимумом на периодах порядка 4000—8000 с. На этих же периодах мнимый вектор изменяет направление на примерно противоположное, что подтверждает адек-

ватность полученных векторов геоэлектрическому строению района работ. На более коротких периодах векторы резко изменяют направление и величину, не оставляя возможности подобрать геоэлектрическую структуру, объясняющую поведение векторов на всех периодах. Очевидно влияние помех, в большинстве дней существенно превышающих МТ-поле (см. рис. 2). Во время геомагнитных бурь результаты на коротких периодах отличаются от полученных средних данных, поскольку увеличивается отношение сигнала (МТ-поле) к шуму, но утверждать, что эти результаты не искажены помехами, пока нет оснований. На станциях KAK, KNZ, UCU, KYS с секундными записями векторы на коротких периодах направлены к источнику помехи — электрифицированной железной дороге (см. рис. 4), однако на станциях ESA и MIZ, расположенных совсем близко от железной дороги, векторы имеют малую величину и не направлены к железной дороге. Вероятно, питание поездов осуществляется там не постоянным током.

На рис. 5 даны частотные характеристики двух реальных компонент вектора индукции,



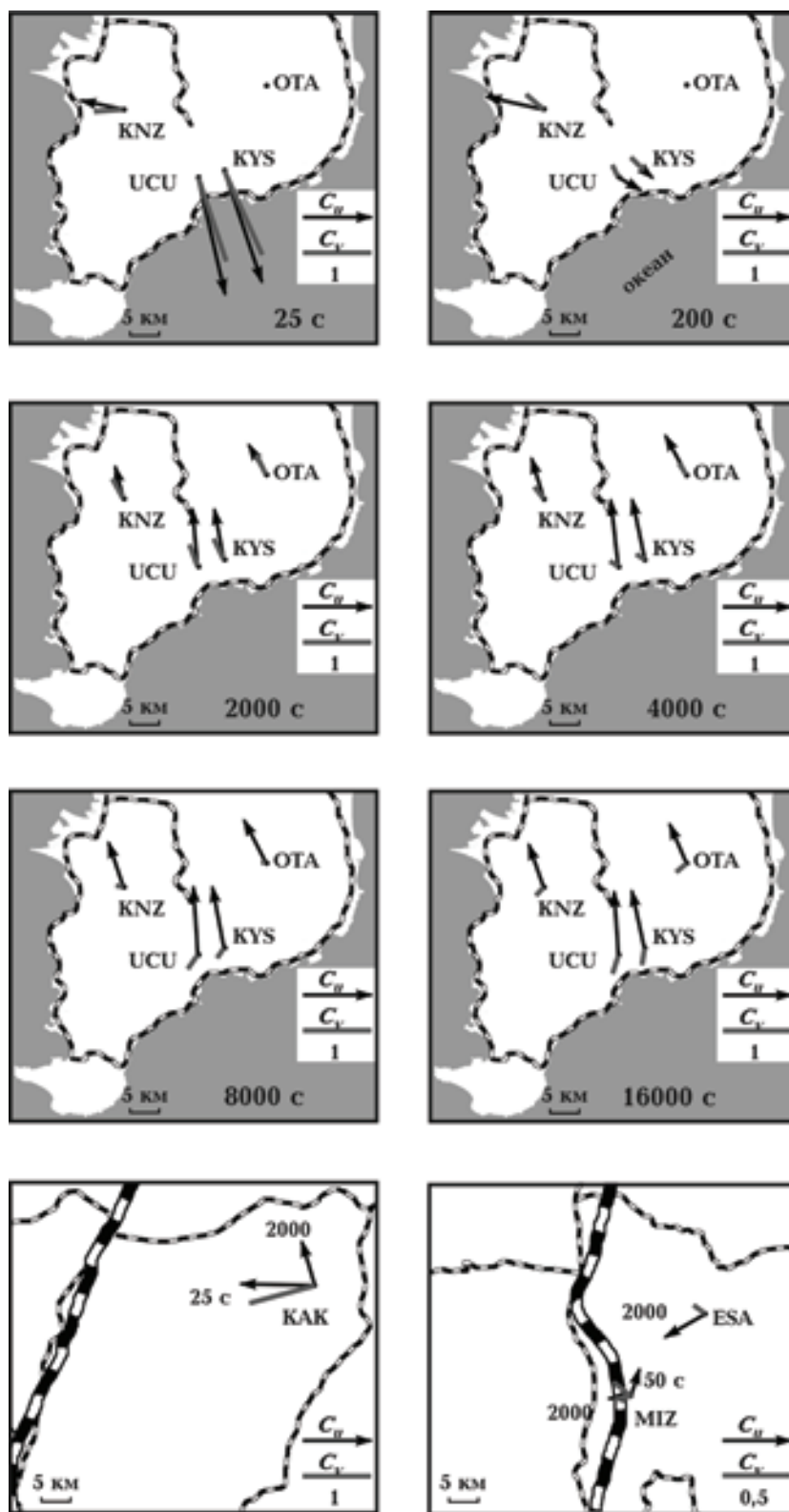


Рис. 4. Векторы индукции на четырех станциях п-ва Босо для шести периодов (три верхних ряда), а также на обсерваториях КАК и МИЗ/ЕСА (нижний ряд). Темным цветом показан Тихий океан с заливами, прерывистой линией — железные дороги, жирной прерывистой — магистральная.

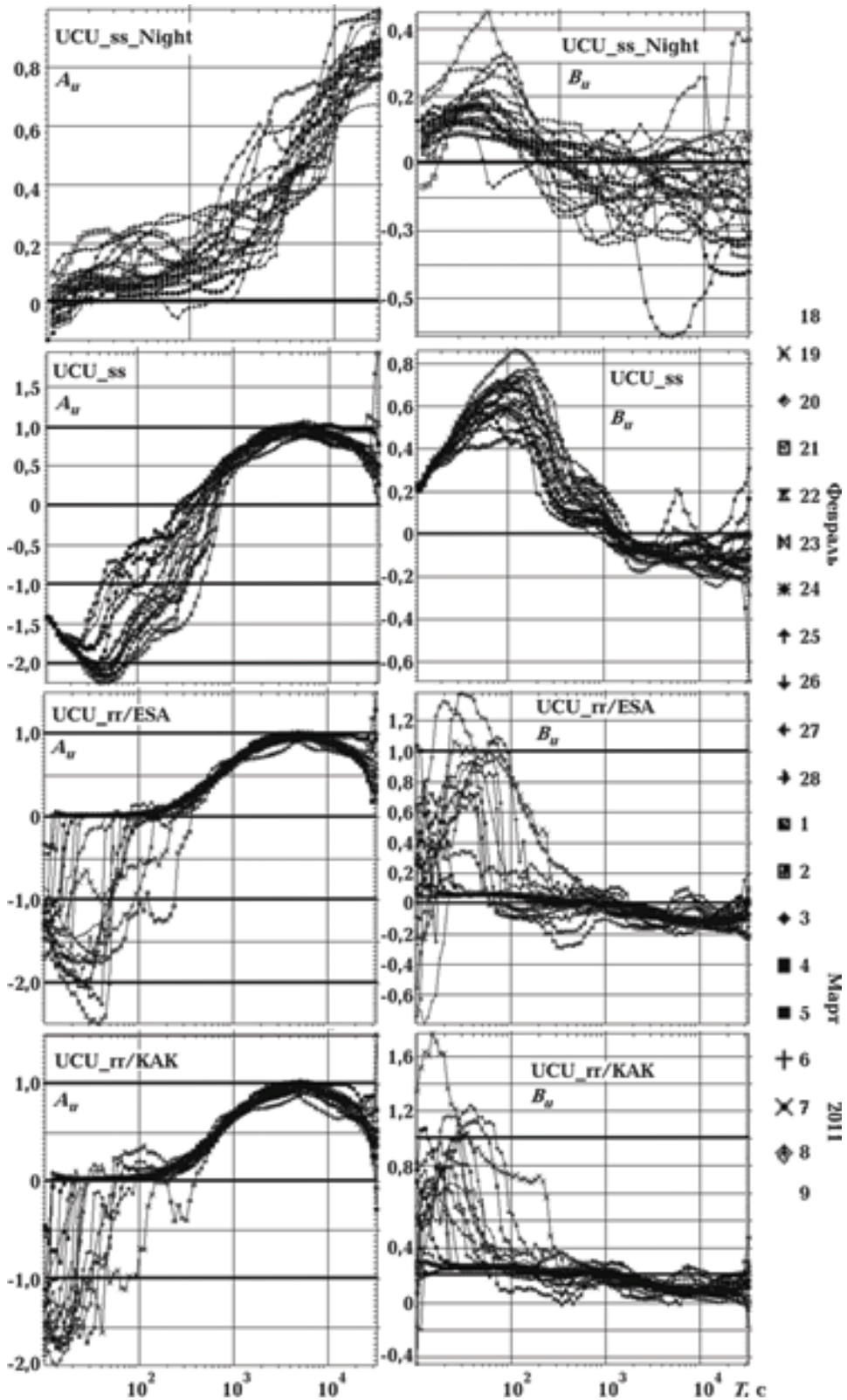


Рис. 5. Частотные характеристики компонент вектора индукции на обсерватории UCU при четырех вариантах обработки: два верхних ряда — ss (single station), два нижних — rr (remote reference) относительно станций ESA и КАК соответственно. Самые верхние кривые получены по четырем послеполуночным часам (1—5 ч местного времени). Три нижних ряда получены путем обработки данных за 3 дня с маркировкой к среднему дню. Вся совокупность относится к 20-дневному интервалу перед ЗТ Тохоку 11.03.2011.

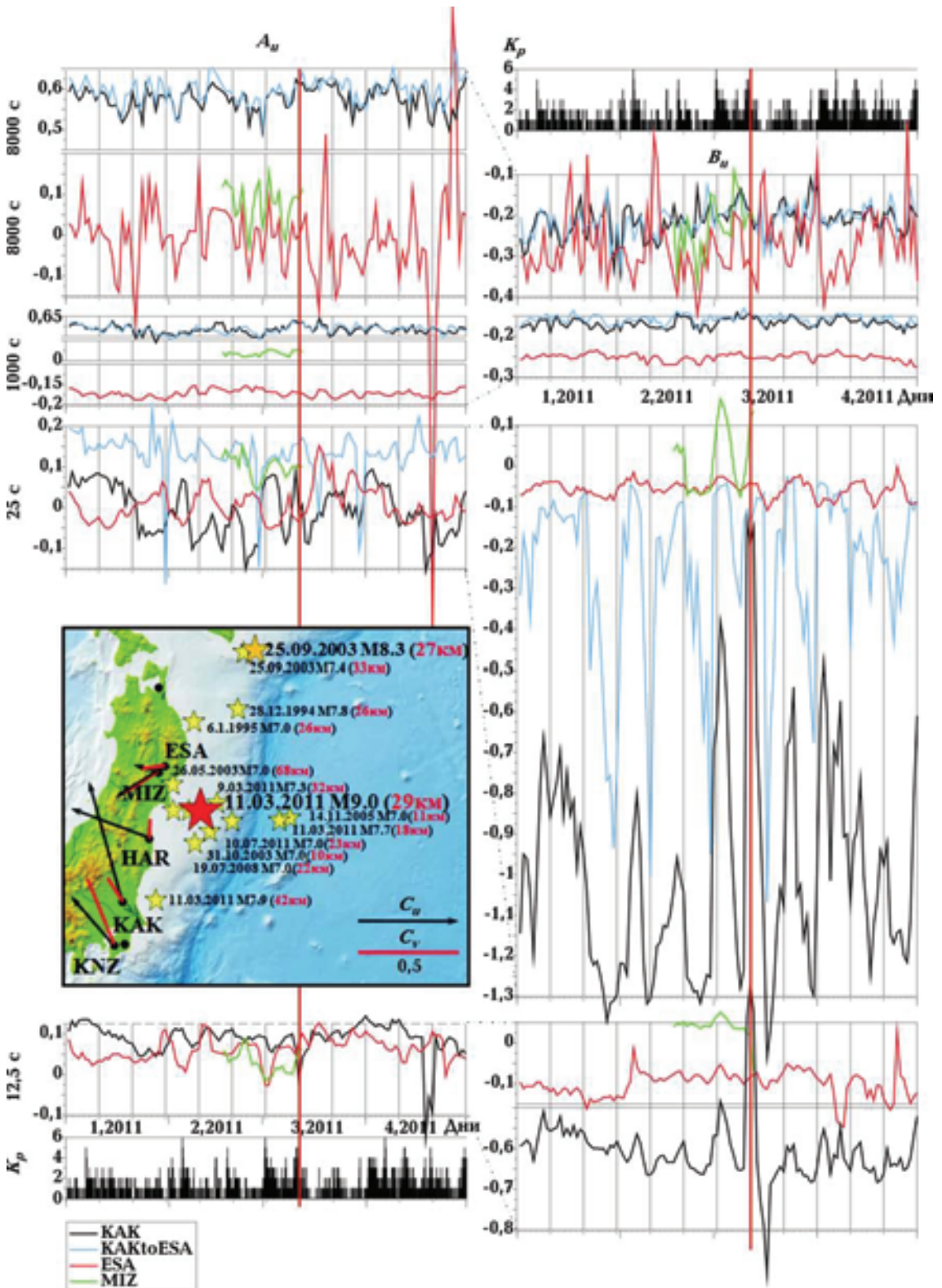


Рис. 6. Аномальные изменения компонент вектора индукции на четырех обсерваториях MIZ, ESA, KAK, KAK/ESA, KNZ для четырех диапазонов периодов перед ЗТ 11.03.2011 (обработка выполнена по программе И. М. Варенцова). Вертикальной линией показан момент ЗТ 11.03.2011, а также изменения планетарного индекса магнитной активности  $K_p$  за каждые 3 ч. На вкладке представлена карта расположения станций с векторами индукции для периодов 10–20 мин по данным 2011 г. и эпицентры ЗТ с указанием даты, магнитуды  $M$  и глубины гипоцентра (в скобках).

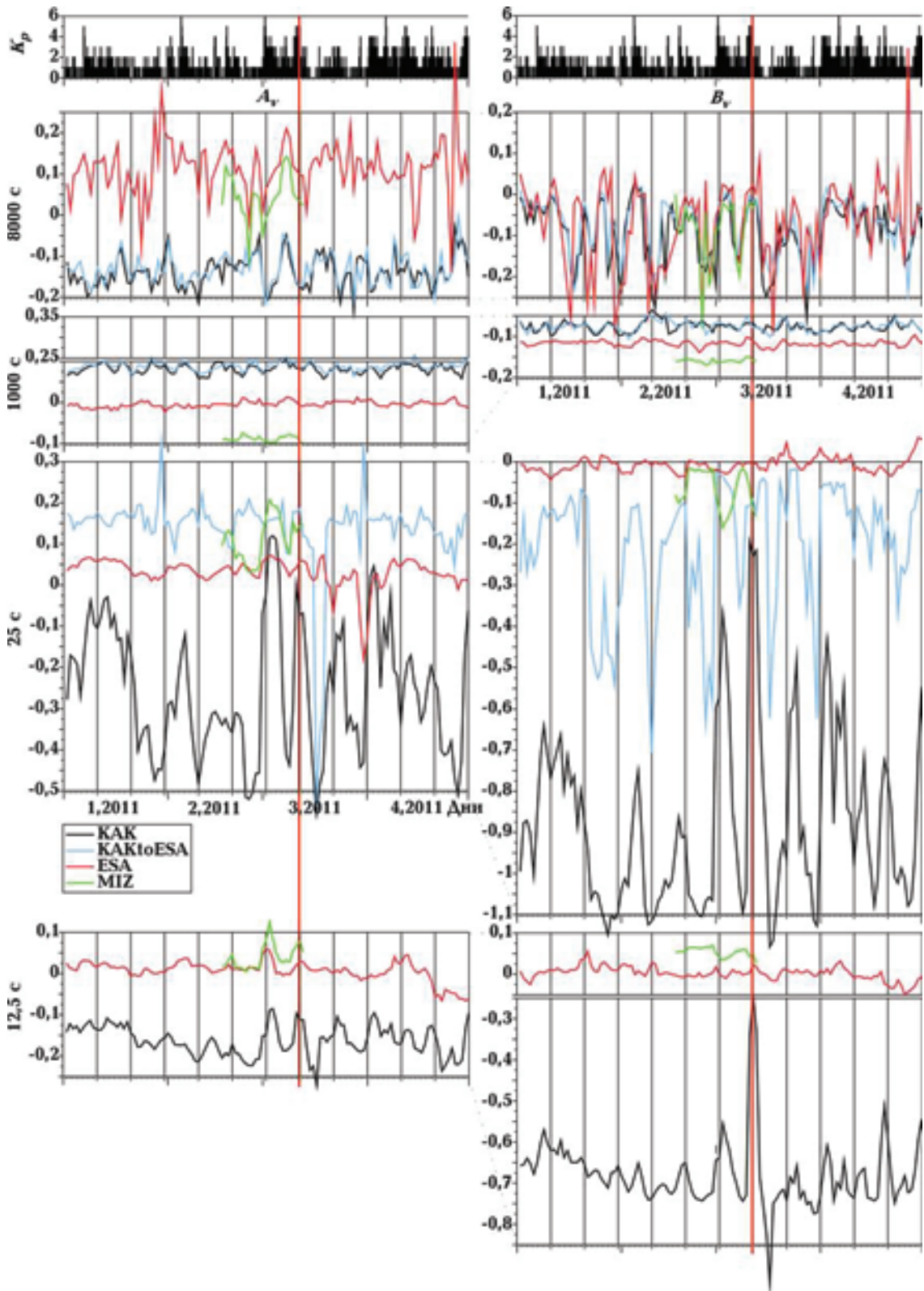


Рис. 6, б (окончание рис. 6).

полученные для каждого из 20 дней перед ЗТ Тохоку. Подобные графики были построены (и для мнимых компонент) для всех 5 станций с секундными отсчетами за 10 недель до ЗТ Тохоку и 7 недель после него. Можно считать, что на периоде 1000 с и более помехи несущественны, векторы индукции правильно отражают геоэлектрическое строение региона, и если наблюдаются изменения функций отклика ото дня ко дню, то они могут быть предвестниками ЗТ. На компоненте  $A_u$  такие характерные изменения наблюдались на периодах 1000—10000 с за 14 и 5 дней до ЗТ, на компоненте  $B_u$  — за 13 и 4 дней. На коротких периодах вектор, определенный по данным одной станции (график "ss"), изменяет величину и направление, несовместимое с какой-либо геоэлектрической структурой. При обработке только четырех послеполуночных часов (графики "night"), когда помехи минимальны, результат получен при лучшем соотношении сигнал (МТ-поле)/шум и он существенно другой, однако разброс результатов остается большим и по понятной причине — недостаточности данных (слабый МТ-сигнал и короткий интервал). При обработке по методике мульти-ремут-референс (rr) [Варенцов и др., 2003] результаты по части дней (преимущественно когда уровень МТ-поля высок, см.  $K_p$ -индекс) образуют жирную линию, по-видимому, близкую к истинному поведению компонент. В остальные дни компоненты векторов изменяются на периодах короче 500 с, весьма по-разному в различные дни. Это преимущественно дни с пониженной магнитной активностью, когда МТ-поле меньше помех. Однако и в этом случае, если предвестниковый сигнал существует (изменение электропроводности и/или ЛЭ), они могут быть выделены в результате тщательного анализа.

На рис. 6 приведены временные изменения всех компонент вектора индукции для четырех наиболее характерных периодов за 4 первых месяца 2011 г. Характерные изменения наблюдались за разные, неодинаковые для разных компонент и периодов, промежутки времени перед землетрясением. Такая миграция возможна как для предвестниковых сигналов, так и для помех.

На рис. 7 представлены аналогичные кривые для компонент горизонтального магнитного тензора для станции ESA относительно КАК. Здесь со значительно большей вероятностью можно предполагать, что полученные перед ЗТ Тохоку изменения являются предвестниками. На коротких периодах центры характерных

экстремумов появлялись за 9, 21 и 36 дней до ЗТ и на другой день после ЗТ, на длинных периодах — за 7, 19 и 33 дня до ЗТ.

**Выводы.** 1. Рассмотрено многообразие источников электромагнитного поля, наблюдаемого на поверхности Земли. Отмечена сложность достоверного выделения литосферной эмиссии, в том числе предвестников землетрясений, на фоне этого многообразия. Обоснована перспективность использования электромагнитных функций отклика для выделения предвестников.

2. В результате критического обзора большого количества литературных источников отобрано и описано несколько наиболее достоверных случаев наблюдения УНЧ предвестников землетрясений: Аляска, Калифорния, Кавказ, Греция.
3. Краткосрочные УНЧ предвестники в зависимости от региона, магнитуды, глубины очага, расстояния до пункта наблюдения, частоты и т. д. появляются за недели, дни, часы до сильного землетрясения.
4. Данные предыдущих пунктов убедительно показывают перспективность мониторинга УНЧ электромагнитного поля для оперативной оценки сейсмической опасности.
5. Анализ материалов 18 японских геомагнитных обсерваторий (6 из них в радиусе 400 км от эпицентра землетрясения Тохоку) показал наличие интенсивных помех в трехкомпонентных записях вариаций геомагнитного поля. Применение для вычисления компонент функций отклика помехоустойчивых алгоритмов статистического робастного оценивания и многооконного спектрального анализа записей позволило выделить перед землетрясением Тохоку серию аномалий временного поведения функций отклика: за 7—9, 19—21, 33—36, ~ 60 дней. Моменты аномалий амплитуды и фазы слегка изменяются для разных периодов вариаций, разных компонент функций отклика, разных станций. Такое многоплановое поведение может отражать миграцию ЛЭ и / или изменения электропроводности в литосфере Земли. Расшифровка такой информации даст ценный материал для понимания физики подготовки землетрясений и возникновения предвестников. Для реализации такой возможности потребуется дополнительное подтверждение результатов обработки путем ее усовершенствования, моделирование отклика геоэлектрических структур и, возможно, более густая сеть наблюдений.

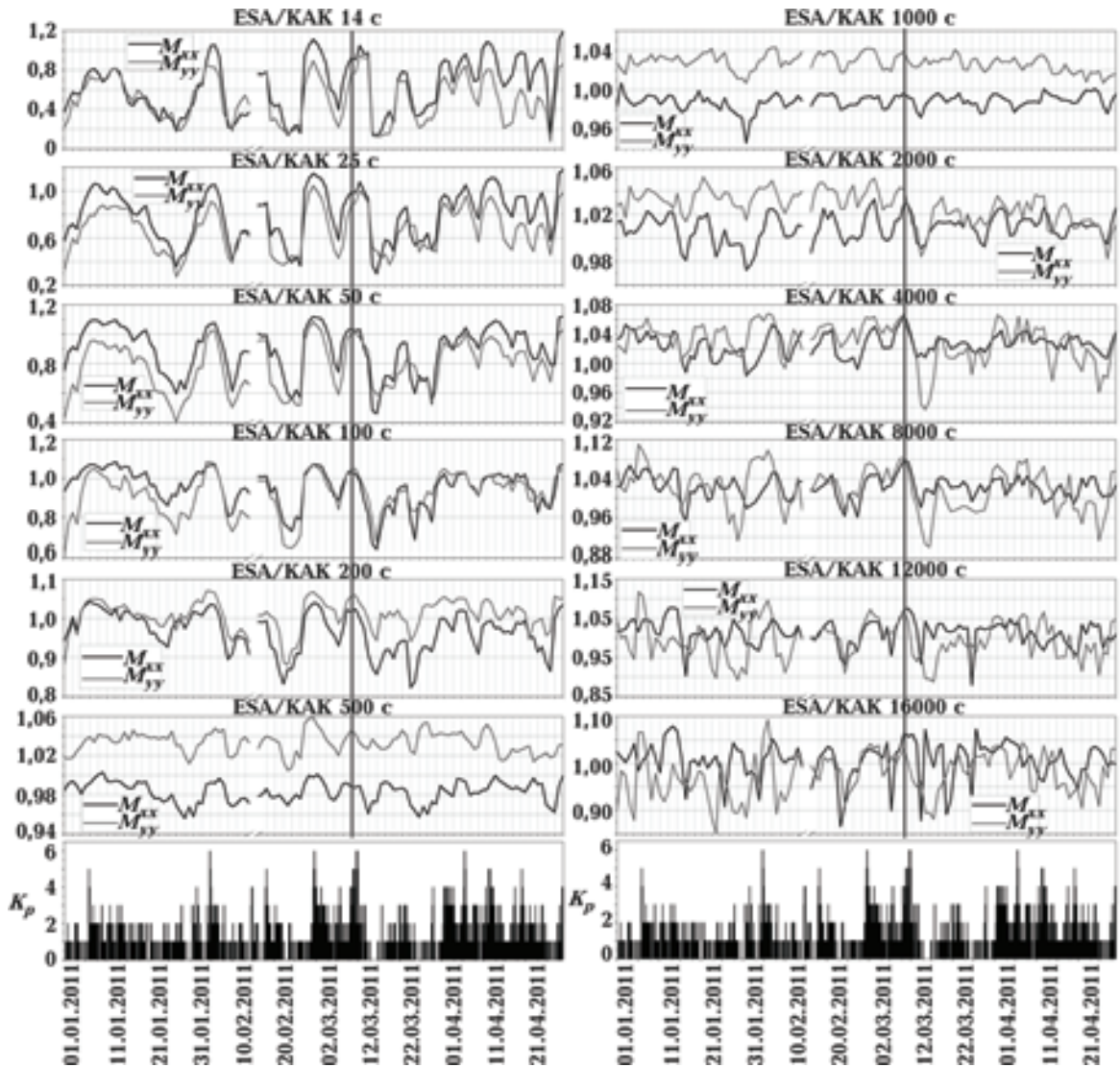


Рис. 7. Изменения основных компонент модулей  $M_{xx}$  и  $M_{yy}$  горизонтального геомагнитного тензора на обсерватории ESA относительно КАК за четыре месяца 2011 г. Вертикальной линией показан момент ЗТ 11.03.2011 и изменения планетарного индекса магнитной активности  $K_p$  за каждые 3 ч.

**Благодарность.** Авторы выражают благодарность сотрудникам геомагнитных обсерваторий и организациям Японии по сбору и хранению информации (Geospatial Information Authority of Japan (GSI), Kakioka Magnetic Observatory, Japan Meteorological Agency (КМО-ЈМА), World Data Center for Geomagnetism, Kyoto), а также проф. Катсуми Хаттори за предоставление данных. Мы также благодарим И. М. Варенцова, Е. Ю. Соколову и Т. А. Климович за программы обработки данных.

### Список литературы

Авагимов А. А., Атаев А. К., Атаев С. А., Кузьмин Ю. О., Эфендиев М. И. Связь аномальных изменений электросопротивления горных по-

род в разломной зоне с приливными деформациями земной коры // Изв. АН ТССР, сер. ФТХГН. — 1988. — № 5. — С. 50—52.

- Альтгаузен Н.М., Барсуков О.М. О временных вариациях электропроводности // Физические основания поисков методов прогноза землетрясений / Отв. ред. М.А. Садовский. — Москва: Наука, 1970. — С. 104—110.
- Бабак В.И., Климкович Т.А., Рокитянский И.И., Терешин А.В. Вариации вектора индукции в Японии // Геофиз. журн. — 35, № 1. — 2013. — С. 153—158.
- Барсуков О.М. Возможная причина электрических предвестников землетрясений // Физика Земли. — № 8. — 1979. — С. 85—90.
- Барсуков О.М., Сорокин О.П. Изменение кажущегося сопротивления горных пород в Гармском сейсмоактивном районе // Физика Земли. — 1973. — № 10. — С. 100—102.
- Ваньян Л.Л. Электропроводность земной коры в связи с ее флюидным режимом // Коровые аномалии электропроводности. — Ленинград: Наука, 1984. — С. 27—35.
- Ваньян Л.Л. Электромагнитные зондирования. — Москва: Научный мир, 1997. — 219 с.
- Варенцов И.М., Соколова Е.Ю., Мартанус Е.Р., Наливайко К.В. и рабочая группа проекта BEAR. Система передаточных операторов электромагнитного поля для массива синхронных зондирований BEAR // Физика Земли. — 2003. — № 2. — С. 30—61.
- Гульельми А.В. Ультранизкочастотные волны в коре и в магнитосфере Земли // Успехи физ. наук. — 2007. — 177, № 12. — С. 1257—1276.
- Климкович Т.А. Особливості часових змін аномального магнітного поля та векторів індукції у закарпатському сейсмоактивному прогині: Дис. ... канд. фіз.-мат. наук / ІГФ НАНУ. — Київ, 2009. — 195 с.
- Мороз Ю.Ф., Мороз Т.А., Моги Т. Методика и результаты мониторинга естественного электрического поля Земли в Байкальской рифтовой зоне // Физика Земли. — 2007. — № 11. — С. 37—49.
- Московская Л.Ф., Копытенко Ю.А., Хаякава М. Магнитотеллурический и сейсмический мониторинг в зоне субдукции Японии // Вопросы геофизики. — 2010. — № 43. — С. 108—125.
- Рокитянский И.И. Исследование аномалий электропроводности методом магнитовариационного профилирования. — Киев: Наук. думка, 1975. — 296 с.
- Светов Б.С. Передаточные функции электромагнитного поля // Физика Земли. — 1991. — № 1. — С. 119—128.
- Светов Б.С. Электромагнитный мониторинг сейсмотектонических процессов // Изв. ВУЗ. Геология и разведка. — 1992. — 12. — С. 99—115.
- Шуман В.Н. Концепция динамически неустойчивой геосреды и сейсмoeлектромагнитный шум литосферы // Геофиз. журн. — 2010. — 32, № 6. — С. 101—118.
- Шуман В.Н. Электромагнитная эмиссия литосферы: всегда ли мы адекватно трактуем то, о чем как будто знаем? // Геофиз. журн. — 2012. — 34, № 2. — С. 4—19.
- Шуман В.Н. Электромагнитные сигналы литосферного происхождения в современных наземных и дистанционных зондирующих системах // Геофиз. журн. — 2007. — 29, № 2. — С. 3—16.
- Dea J. Y., Boerner W. M. Observations of anomalous ULF signals preceding the Northridge earthquake of January 17, 1994 // Atmospheric and ionospheric electromagnetic phenomena associated with earthquakes / Ed. M. Hayakawa. — Tokyo: Terrapub, 1999. — P. 137—145.
- Frather-Smith A. C., Bernardi A., McGill P. R., Ladd M. E., Helliwell R. A., Villard O. G. Jr. Low-frequency magnetic field measurements near the epicenter of the  $M_s = 7.1$  Loma Prieta earthquake // Geophys. Res. Lett. — 1990. — 17, № 9. — P. 1465—1468.
- Hattori K., Takahashi I., Yoshino C., Nagao T., Liu J. Y., Shieh C. F. ULF geomagnetic and geopotential measurement at Chia-Yi, Taiwan // J. Atmospher. Electr. — 2002. — 22, № 3. — P. 217—222.
- Kopytenko Yu. A., Matiashvili T. G., Voronov P. M., Kopytenko E. A. Observation of electromagnetic ultralow-frequency lithospheric emission in the Caucasian seismically active zone and their connection with earthquakes // Electromagnetic phenomena related to earthquake prediction / Eds M. Hayakawa, Y. Fujinawa. — Tokyo: Terrapub, 1994. — P. 175—180.
- Kopytenko Yu. A., Matiashvili T. G., Voronov P. M., Kopytenko E. A., Molchanov O. A. Detection of ultra-low-frequency emissions connected with Spitak earthquake and its aftershock activity, based on geomagnetic pulsations data at Dusheti and Vardzia observatories // Phys. Earth Planet. Int. — 1993. — 77. — P. 85—95.
- Molchanov O. A., Kopytenko Yu. A., Voronov P. M., Kopytenko E. A., Matiashvili T. G., Fraser-Smith A. C.,

- 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 // *Geophys. Res. Let.* — 1992. — **19**, № 14. — P. 1495—1498.
- Moore G.W.* Magnetic Disturbances preceding the 1964 Alaska Earthquake // *Nature.* — 1964. — **203**. — P. 508—509. — DOI:10.1038/203508b0.
- Saraev A.K., Pertel M.I., Malkin Z.M.* Correction of the electromagnetic monitoring data for tidal variations of apparent resistivity // *J. Appl. Geophys.* — 2002. — **49**, № 1. — P. 91—100.
- Tsai Y.B., Liu J.Y., Ma K.F., Yen H.Y., Chen K.S., Chen Y. I., Lee C.P.* Precursory phenomena associated with the 1999 Chi-Chi earthquake in Taiwan as identified under the ISTEP program // *Phys. Chem. Earth.* — **31**. — 2006. — P. 365—377.
- Varotsos P.A., Sarlis N.V., Skordas E.S.* Natural Time Analysis: The new view of time. Precursory Seismic Electric Signals, Earthquakes and other Complex Time-Series. — Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2011. — 476 p.
- Varotsos P.* The Physics of Seismic Electric Signals. — Tokyo: Terrapub, 2005. — 338 p.
- Zhamaletdinov A.A., Mitrofanov F.P., Tokarev A.N., Shevtsov A.N.* The influence from luni-solar EM monitoring for the seismic activity // Presentation at 32 International Geological Congress, Florence, August 2004. — 2004.