

Вариации геомагнитных функций отклика в Японии

© И. И. Рокитянский, В. И. Бабак, А. В. Терешин, 2015

Институт геофизики НАН Украины, Киев, Украина

Поступила 18 апреля 2015

Представлено членом редколлегии В. Н. Шуманом

Описано особливості вимірювання функцій відгуку (RF), подано короткий історичний огляд використання RF в Японії і загальний стан проблеми прогнозу землетрусів. Виконано аналіз великого обсягу матеріалів обробки, отриманих в умовах сильних перешкод. Виділено аномалії функцій відгуку, що з'являлися протягом декількох років до катастрофічного землетрусу Тохоку, які можна віднести до його середньострокових провідників. Виявлено аномалію електропровідності під центральною частиною півострова Босо (передмістя Токіо) в районі складного зчленування трьох літосферних плит.

Ключові слова: провідники землетрусів, електромагнітні функції відгуку, вектори індукції, електропровідність літосфери.

Введение. Настоящая работа является продолжением и развитием наших предыдущих статей [Бабак и др., 2013; Рокитянский и др., 2013], в которых изложены основы метода функций отклика (response functions — RF), обзор литературы, первые результаты нашей обработки. Поэтому для полного представления о проблеме желательно ознакомиться с упомянутыми работами.

Методы исследования электропроводности и геомагнитные RF. Наиболее глубинными, удобными, доступными, перспективными и широко применяемыми методами являются методы, использующие естественные электромагнитные (EM) поля токов, текущих в магнитосфере, ионосфере и атмосфере Земли. Эти внешние поля можно условно называть магнитотеллурическими (MT), поскольку они используются в магнитотеллурическом и магнитовариационном (MV) методах исследования электропроводности земной коры и верхней мантии. MT-поля ионосферно-магнитосферного происхождения охватывают диапазон периодов от 1 с до суток, а в расширенном диапазоне — от 10^{-3} с до 11 лет. Вследствие высокой электропроводности твердой Земли и океанов по сравнению с нижней атмосферой компоненты MT-поля ведут себя в первом приближении как вертикально падающая плоская волна — модель Тихонова—Каньяра, являющаяся теоретической основой классических MT—MV методов. В рамках этой модели MT-поле над горизонтально-слоистыми по электропроводности участками Земли имеет только

горизонтальные компоненты электрического и магнитного полей (нормальное MT-поле). На горизонтально неоднородных участках Земли появляется аномальная вертикальная компонента магнитного поля, закономерно связанная с неоднородным распределением электропроводности. В результате вектор геомагнитных вариаций тяготеет не к горизонтальной плоскости (как для нормального поля), а к наклонной. По данным трехкомпонентных геомагнитных наблюдений в одном пункте можно определить наклон этой плоскости и по нему построить вектор индукции C , указывающий местоположение и направление избыточных токов внутри Земли, которые в двумерном случае перпендикулярны к вектору:

$$C = A e_x + B e_y,$$

где e_x, e_y — единичные векторы, x указывает на север, y — на восток. Компоненты A и B определяются из линейного соотношения

$$B_z = A B_x + B B_y,$$

где B_x, B_y — горизонтальные; B_z — вертикальная компоненты магнитного поля. Поскольку переменные поля описываются комплексными числами, векторы индукции представляются парой векторов — реальным C_u и мнимым C_v .

Горизонтальные поля в двух пунктах наблюдения связаны линейными тензорными соотношениями:

$$B_x(\mathbf{r}_1) = M_{xx} B_x(\mathbf{r}_0) + M_{xy} B_y(\mathbf{r}_0),$$

$$B_y(\mathbf{r}_1) = M_{yx} B_x(\mathbf{r}_0) + M_{yy} B_y(\mathbf{r}_0),$$

где \mathbf{r}_0 и \mathbf{r}_1 — соответствуют базовой и исследуемой точкам наблюдения соответственно.

Тензоры $[M] = \begin{bmatrix} M_{xx} & M_{xy} \\ M_{yx} & M_{yy} \end{bmatrix}$ определяются только распределением электропроводности твердой и жидкой геосфер, и их отличие от единичного тензора характеризует неоднородное распределение электропроводности. Анализ решений прямых задач для различных аномальных тел показывает, что горизонтальный тензор несет более локальную информацию об аномалиях электропроводности по сравнению с векторами индукции, которые «собирают» информацию с большой площади.

Компоненты векторов индукции и горизонтальных тензоров являются функциями отклика реальной Земли на приложенное внешнее поле, в идеале — на поле вертикально падающей плоской волны. Если электропроводность земных недр не изменяется, RF не должны изменяться. Если же изменения RF происходят, то они могут нести информацию о геодинамических процессах, включая и процессы подготовки землетрясений (ЗТ), т. е. мониторинг аномальных изменений RF можно рассматривать как перспективный метод выделения предвестников ЗТ. Это в идеале.

При мониторинге использованный интервал наблюдений должен быть 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 было выяснено в результате обработки большого материала, на японских обсерваториях весьма сильны транспортные, промышленные и инструментальные помехи. В таких условиях выделение предвестников весьма затруднительно и не надежно. Выход видится в комплексном использовании вектора индукции и горизонтального тензора, поскольку они по-разному «чувствуют» изменение электропроводности и литосферную эмиссию.

Краткий обзор использования RF в Японии. Состояние проблемы прогноза ЗТ. Использование векторов индукции \mathbf{C} началось сразу после их введения в пионерских работах Паркинсона (1959), Визе (1965) и Шмукера (1972) как для исследования электропроводности литосферы, так и для мониторинга предвестников земле-

трясений в сейсмоактивных регионах (рис. 1). Японские ученые (Рикитаки, Хонкура, Янагихара, Фуджита, Фудживара и др.) в XX ст. лидировали в этих исследованиях, однако в 1990-е годы наметился кризис. С одной стороны, на записях геомагнитных обсерваторий неуклонно рос электромагнитный шум от промышленных, транспортных, коммуникационных и бытовых устройств, затрудняющий выделение полезного сигнала. Особенно сильными и далеко проникающими как по территории, так и по спектру в область длинных периодов являются помехи от электропоездов с питанием от постоянного тока (DC). В Японии движение электропоездов на многих линиях приостанавливается на ночь и интервал с 1 до 5 ч местного времени относительно свободен от сильных помех, что можно видеть на рис. 2. И. Фуджита [Fujita, 1990] в результате обширных исследований написал, что RF можно анализировать только по данным за послеполуночные часы. Но 4 ч — слишком короткий интервал для анализа, и поэтому векторы индукции в последние 20 лет мало использовались в Японии.

С другой стороны, сильные помехи, отклонения модели МТ-поля от модели Тихонова—Каньяра [Рокитянский, 1975; Бердичевский, Дмитриев, 2009] и другие факторы создают во временных рядах функций отклика сильный фон, из которого надо выделить сигналы-предвестники ЗТ. Параметры предвестников неизвестны, поскольку физика подготовки ЗТ еще не понята, причем она, по-видимому, для разных регионов не одинакова и даже для одного места последовательные землетрясения не идентичны. Поэтому до сих пор идентификация предвестников производилась только эмпирически путем апостериорного анализа и статистической/вероятностной пространственно-временной привязки предвестников к ЗТ. Следует подчеркнуть, что однотипные аномалии RF или любого другого параметра геодинамического происхождения могут появиться один или несколько раз перед ЗТ и быть идентифицированы как предвестник, а в другой раз ЗТ (речь идет только о сильных ЗТ) может не последовать за аналогичной аномалией. Это обусловлено сложностью Земли, ее иерархической структурой [Садовский и др., 1987; Садовский, 2004]. Познать физику подготовки ЗТ в деталях вообще навряд ли возможно, поскольку получить прямую достоверную информацию с глубин, где происходит подготовка, вызревание (nucleation) ЗТ и сам разрыв, невозможно (неоднозначность обрат-

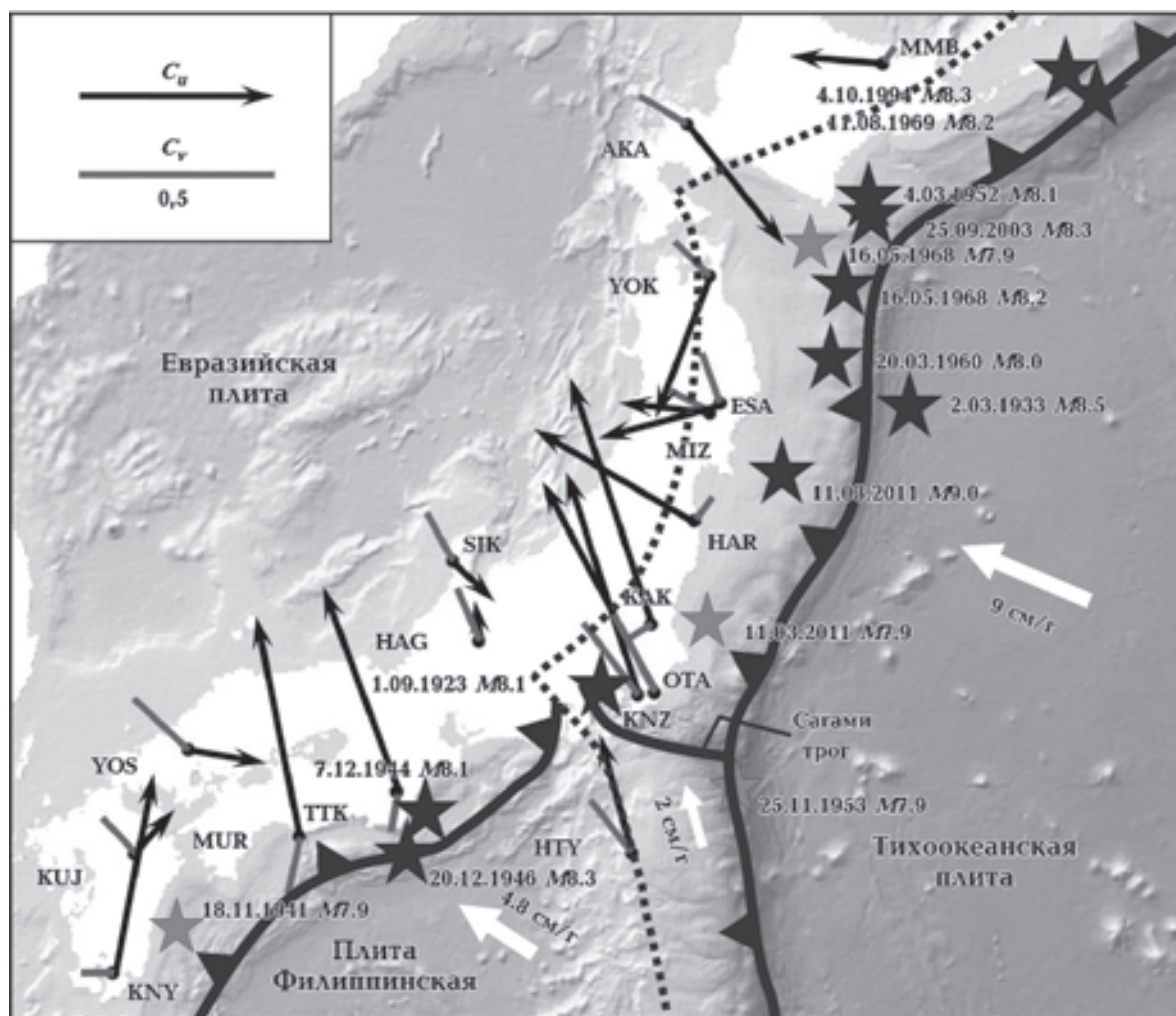


Рис. 1. Карта Японии с действительным C_u и мнимым C_v векторами индукции для периода 1 ч по данным за 2011 г. Звездами представлены эпицентры землетрясений за последние сто лет с магнитудой $M > 7,8$, для каждого выписана дата и магнитуда. Также представлены элементы плитовой тектоники: тропи/глубоководные желоба, от которых начинается субдукция, скорости плит (светлые стрелки), пунктирная линия — фронт основного вулканического пояса.

ной задачи). И, конечно, невозможно «мониторить» с достаточной точностью в реальном времени параметры, достаточные для точного детерминистического предсказания, тем более что зоной подготовки ЗТ может быть вся Земля плюс внешние космические влияния, на что указывает ряд работ, например [Прогноз..., 2014; Шуман, 2015]. Таким образом, возможно только вероятностное/статистическое предсказание ЗТ и чтобы объявить эвакуацию населения и отключение опасных объектов, вероятность должна быть достаточно высокой. Для ее повышения необходимо использовать все известные виды параметров и явлений и наблюдать их в максимально возможном числе пунктов, собирая, обрабатывая и анализируя в квазиреальном времени в региональных/мировых центрах, тесно сотрудничающих с вла-

стями, полномочными принимать решения об эвакуации. Такой прогноз требует огромных капиталовложений [Nature, 1999; Uyeda, 2013], на которые общество навряд ли раскошелится. Некоторую помощь может оказать привлечение к наблюдениям населения сейсмоопасных регионов на волонтерских началах, как произошло в единственном успешном предсказании и эвакуации (спасшей сотни тысяч жизней) при Хайченгском ЗТ 4.02.1975 на северо-востоке Китая [Wang et al., 2006]. Там был также применен метод непрерывного перехода от долгосрочных прогнозов к среднесрочным, краткосрочным и немедленным со скользящим включением дополнительных наблюдений, объявлением предварительной готовности при условии увеличения вероятности катастрофического события по совокупно-

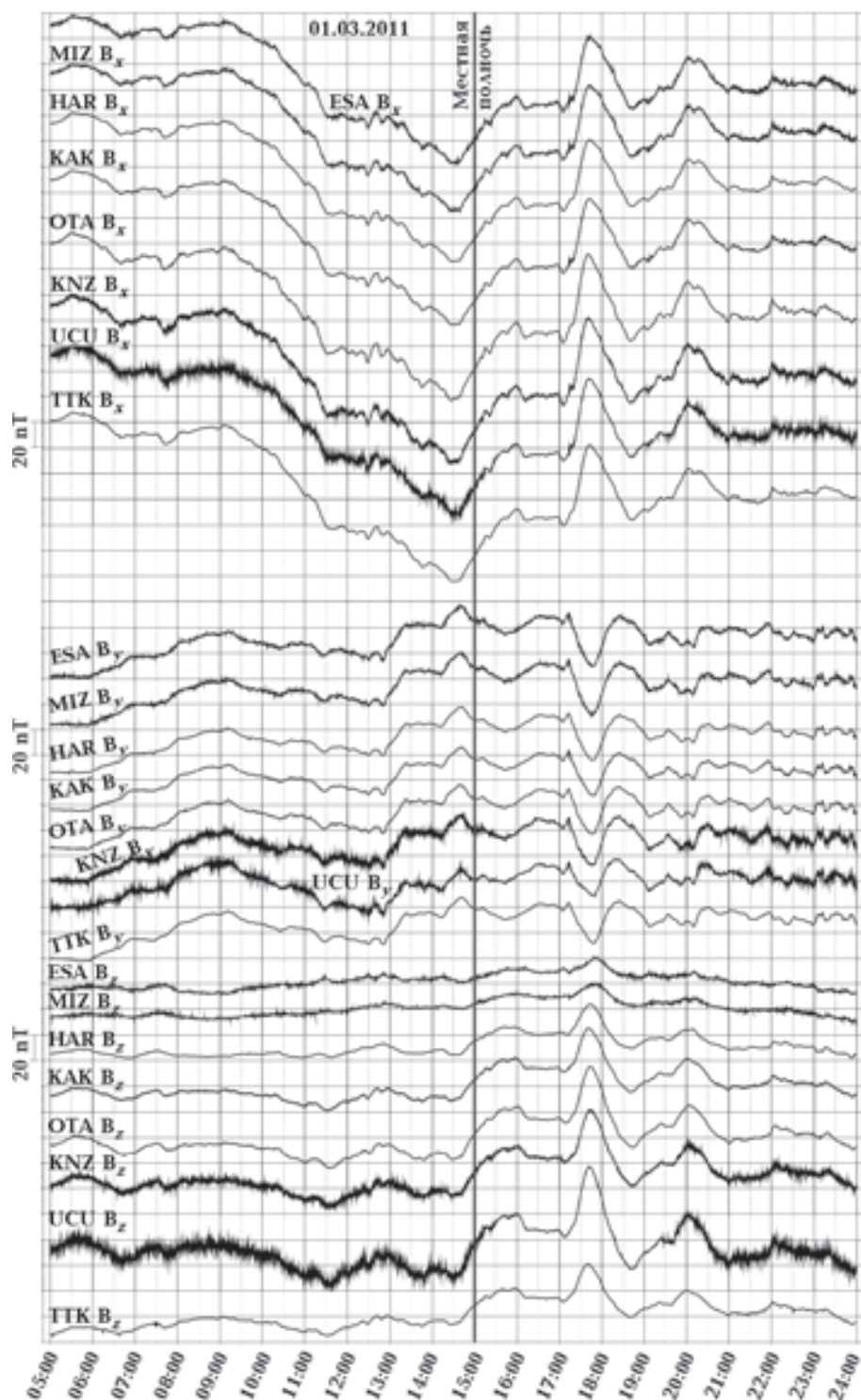


Рис. 2. Синхронная запись 8 японских геомагнитных обсерваторий длительностью 20 часов 10 дней до Тохоку ЗТ. Планетарный трехчасовой индекс геомагнитной активности K_p был равен в интервал 6—9 ч мирового времени UT: $K_p=3-$; в интервале 9—12: $K_p=4-$; в интервале 12—15: $K_p=4-$; в интервале 15—18: $K_p=5+$; в интервале 18—21: $K_p=5-$; в интервале 21—24: $K_p=4-$.

сти данных. Этот метод должен быть основой методологии прогноза.

В 1990-е годы в результате отсутствия успе-

хов в предсказании ЗТ (несмотря на значительные усилия) в научном сообществе возобладали глубокий скептицизм относительно

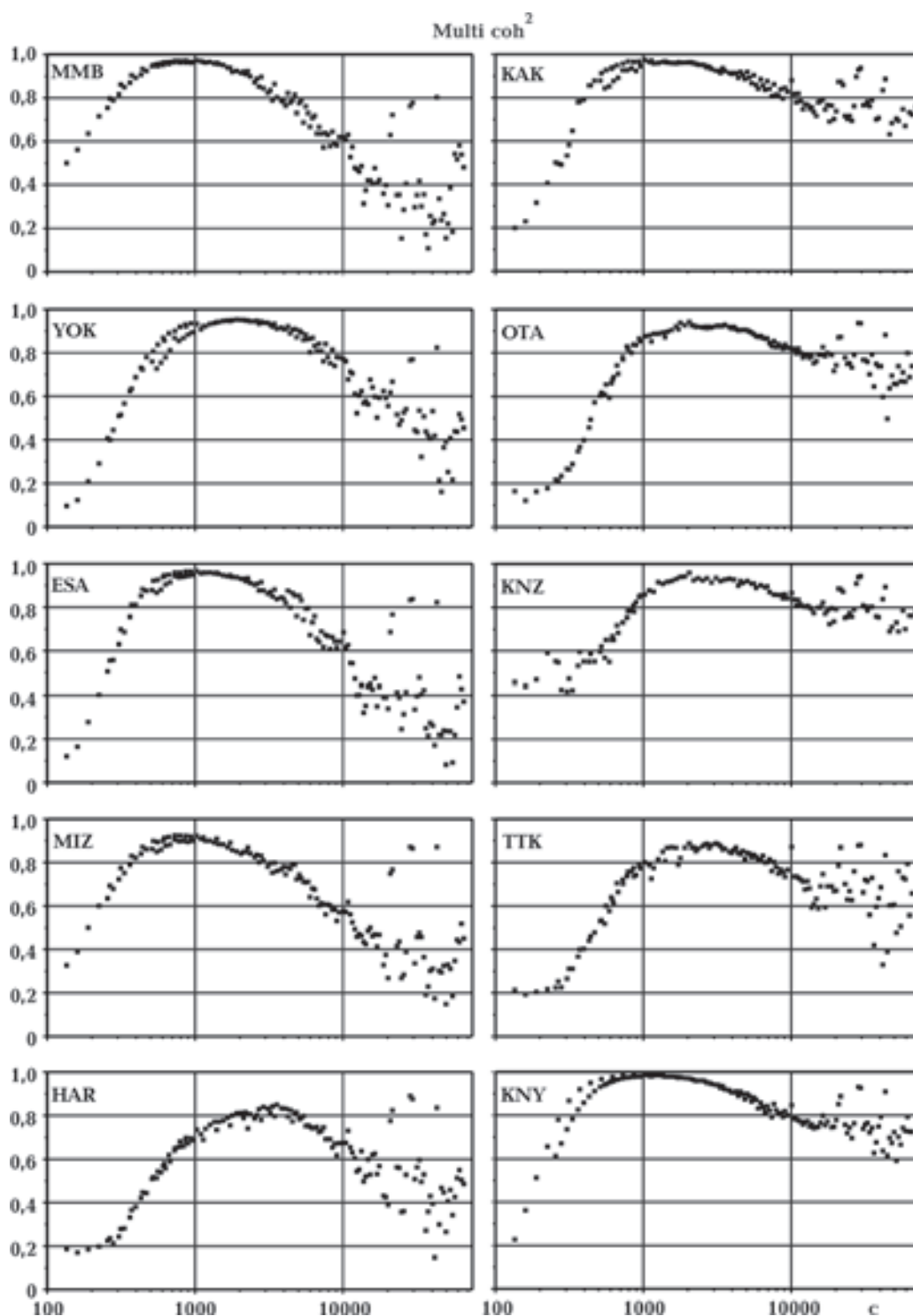


Рис. 3. Квадрат множественной когерентности между V_z и (V_x, V_y) – Coh2M на 10 обсерваториях по минутным данным за полный 2001 год в зависимости от периода.

возможности предсказания ЗТ и достоверной идентификации предвестников. Это привело к резкому сокращению ассигнований на прогноз, но мониторинг, к счастью, продолжался и апостериорный анализ позволил в последние годы

прийти к обнадеживающему выводу — прогноз ЗТ возможен [EMSEV, 2014], но для него необходимо привлечение всех возможных предвестников, в том числе наблюдаемых в космосе и из космоса [Прогноз ..., 2014; Шуман, 2015].

Геомагнитные предвестники, в частности RF, считаются одними из перспективных, поэтому приостановка их использования в Японии в последние годы из-за помех не представляется убедительной.

Располагая современными программами обработки и данными 18 японских обсерваторий (см. рис. 1), авторы включились в поиск предвестников мега-ЗТ Тохоку 11.03.2011. Недостаточное знание местных условий, параметров установок и источников помех, а также геологических и геофизических работ (они на японском языке и недоступны на Украине и из интернета) затрудняет работу, но мы шаг за шагом подключаем к анализу данных дополнительные параметры и выделяем новые сигналы/аномалии, которые, можно предполагать, являются предвестниками. Доказательств, что это предвестники, нет и, как показано выше, быть не может. Вероятность того, что это все-таки предвестники, невысокая, но и ненулевая и по мере дальнейшего усовершенствования анализа может быть повышена и RF-предвестники могут явиться полезным «кирпичиком» в здании предвестников всех видов. Попутно получают интересные методические результаты, такие как влияние геомагнитной активности на определение RF; временные вариации RF, влияющие на результаты геоэлектрических исследований коры и мантии Земли; а также новые явления, такие как периодические вариации RF, которые, по меньшей мере частично, представляют собой дополнительный канал информации из недр Земли.

Анализ среднесрочных аномалий/предвестников. Описание результатов обработки. Обработка производилась по программам Семенова—Климкович [Семенов, 1985; Климкович, 2009] и многооконой, робастной программе [Varentsov, 2007]. Для оценки, взвешивания и отбраковки данных программы используют когерентный анализ. Малая входная Input-когерентность $\text{coh}2I(B_x, B_y)$ означает богатый набор поляризаций горизонтального поля и, следовательно, хорошую определяемость RF, ее квадрат не должен быть больше значений 0,4—0,5, что хорошо выполняется для большинства обсерваторий на периодах короче 10 000 с. Исключение составляет KNZ, на которой при обработке 1-секундных данных на периодах 35 и 250 с входная когерентность имеет два максимума и достигает граничных значений 0,45, подобные максимумы до значений 0,3 нечетко намечаются и в КАК.

Высокая (больше 0,6) множественная Multi-

когерентность $\text{coh}2M(B_z/B_x, B_y)$ является признаком хорошего качества данных, она характеризует степень выполнения линейных связей и устойчивость определения RF. Эта величина, полученная по минутным данным, представлена на рис. 3. На периодах от 3—5 мин (разрешимых по 1-минутным данным) до 2—3 ч (пока проводимость Земли достаточна для выполнения условий модели Тихонова—Каньяра) $\text{coh}2M(B_z/B_x, B_y) > 0,6$, достигая в максимуме 0,95 на периоде 15—30 мин. Различия в уменьшении на коротких периодах, по-видимому, обусловлены различаем помех и, возможно, коэффициентов линейной связи. Для обсерваторий КАК и KNZ проанализированы когерентности по 1-секундным данным, множественные когерентности остаются высокими до 8 с.

В работе [Бабак и др., 2013, рис. 2—3] представлены два графика вариаций среднемесячных значений вектора индукции для четырех обсерваторий за 11 лет, полученных в результате обработки по программе Семенова—Климкович, и сделано предположение о том, что на этих обсерваториях за несколько лет до ЗТ Тохоку наблюдались предвестниковые вариации. В настоящее время выполнен большой объем дополнительной обработки данных двумя программами и проведен статистический анализ некоторых факторов, создающих аномалии RF негеодинамической природы. Получен большой объем взаимодополняющих друг друга графиков, однако полной уверенности, что программы преодолели помехи, нет. Поэтому был использован простой дающий надежные результаты, хотя и не точный, метод визуального анализа.

Визуализация. Несмотря на обилие компьютерных программ и математических методов, целесообразно наглядное представление как исходных данных, так и результатов обработки и анализа. Это может помочь убедиться в достоверности выполненных расчетов, стимулировать работу интуиции, что немаловажно при отсутствии теории изучаемого явления.

Рассмотрим запись трех компонент геомагнитного поля восьми обсерваторий восточной части Японии за 10 дней до Тохоку ЗТ в день, когда произошла геомагнитная буря выше средней интенсивности и были записаны интенсивные геомагнитные вариации значительно большей амплитуды, чем фон помех (см. рис. 2). Рассмотрим и измерим вариацию с доминирующим периодом примерно 80 мин в 17—18 ч. Ее амплитуда в KNZ больше, чем на других обсерваториях: B_x на 15 %, B_y на 7 %. На

близлежащих станциях ОТА и UCSU горизонтальные компоненты также слегка аномальны. При компьютерной обработке главные компоненты горизонтального тензора M_{xx} и M_{yy} увеличивались с уменьшением периода до сотен секунд на 40 и 30 % соответственно (рис. 4). Но на этих же периодах увеличивалась и помеха от близлежащих железных дорог, и у нас не было доказательств, что многооконная робастная программа Варенцова успешно справилась с исключением помех (которые японские ученые считали непреодолимыми). Визуально было измерено еще несколько интенсивных вариаций. Например, 9.03.2011 в 12.00—12.30 UT вариация с периодом порядка 1000 с имела амплитуду V_x на всех станциях ≈ 4 нТл, на KNZ и ОТА $\approx 5,6$ нТл, т. е. на 40 % больше, как и по машинной обработке на этом периоде (на V_y эта вариация была мала). Так просто было получено недостающее доказательство, т. е. убедительное подтверждение реальности обнаруженной аномалии электропроводности под KNZ в средней части п-ова Босо.

Из множества способов визуализации результатов обработки, а именно временных вариаций RF, было использовано следующее: 1) непосредственно векторы индукции для всех фиксированных (интервалов) периодов (рис. 5); 2) графики отдельных компонент также для фиксированных периодов и интервалов осреднения/сглаживания (рис. 6, 7); 3) векторы индукции на всем наборе периодов для отдельных интервалов мониторинга, естественно, с малой временной разрешимостью; 4) для наглядного представления изменений RF на разных периодах использовались частотные характеристики за ряд фиксированных интервалов мониторинга (см. рис. 4); 5) коэффициенты корреляции с K_p -индексом; 6) коэффициенты корреляции между отдельными компонентами RF; 7) коэффициенты корреляции компонент RF, записанных в разных местах (результаты по пунктам 5—7 будут описаны в следующей статье); 8) коэффициенты корреляции вариаций RF с другими предвестниками — это наиболее интересная, емкая и важная для целей прогноза ЗТ часть, которая, однако, выходит за рамки настоящей статьи и за пределы наших возможностей.

Обсуждение полученных результатов. В результате обработки данных 18 геомагнитных обсерваторий Японии за 2001—2012 гг. установлено, что аномалии RF, которые могут претендовать на роль среднесрочных предвестников (в дальнейшем будем их называть про-

сто предвестниками) Тохоку ЗТ, наблюдались только на обсерваториях вдоль юго-восточного побережья острова Хонсю: HAR, KAK, ОТА, KNZ и ТТК. На самых близких к ЗТ обсерваториях MIZ и ESA аномалии практически не видны (эффект пространственной избирательности предвестников!), поэтому в дальнейшем изложении будем рассматривать только пять обсерваторий и эпизодически две последних. На рис. 5, а на самых коротких периодах видны очень сильные синхронные вариации векторов индукции на самых удаленных друг от друга (на 620 км) обсерваториях HAR и ТТК и менее сильные на остальных обсерваториях, наиболее четко на восточной компоненте. Односекундные данные удалось достать только для KAK и KNZ. На рис. 5, б видна четкая аномалия на всех периодах за месяц до ЗТ, которая относится к краткосрочным предвестникам. В долговременном аспекте KNZ ведет себя относительно спокойно, тогда как наименее зашумленная помехами KAK обнаруживает сильнейшую вариабельность: глубокий минимум в 2003 г. перед и во время ЗТ Хоккайдо с эпицентром в 700 км от обсерватории и сложные интенсивные аномалии за 3—4 года до Тохоку ЗТ.

От среднемесячных данных, представленных на рис. 3 в работе [Бабак и др., 2013], попытаемся перейти к сильно зашумленным ежедневным данным. На рис. 6 дана компонента V_u на двух станциях. Исходные графики сильно зашумлены и в них трудно разобраться. Для выбора оптимальной визуализации эти графики были усреднены за 5, 7 и 10 дней и подвергнуты скользящему сглаживанию по 3-, 5- и 10-дневным интервалам. Результат представлен на рис. 6, по которому был выбран визуально наглядный и достаточно информативный вариант скользящего сглаживания по 5 дням. Именно так получен рис. 7 и на нем видно появление мало изученной квазипериодической вариации с периодом ≈ 27 и ≈ 14 дней (например, на KNZ в конце и в начале 2007 г.), соответствующей лунному месяцу или/и периоду осевого вращения Солнца. Указанные периоды не проявляются при 10-дневном осреднении/сглаживании. В 2008, 2009 и 2010 гг. на обсерваториях HAR и ТТК на обоих компонентах, на KAK — только на V_u наблюдалось усиление годовой вариации с наложением «высокочастотной бороды» в течение примерно полугода. Подобное менее четко видно в KNZ и совсем нечетко в ОТА и MIZ. K_p -индекс весьма сильно изменяется за эти годы и в нем намечается годичная периодичность. Начаты расчеты коэф-

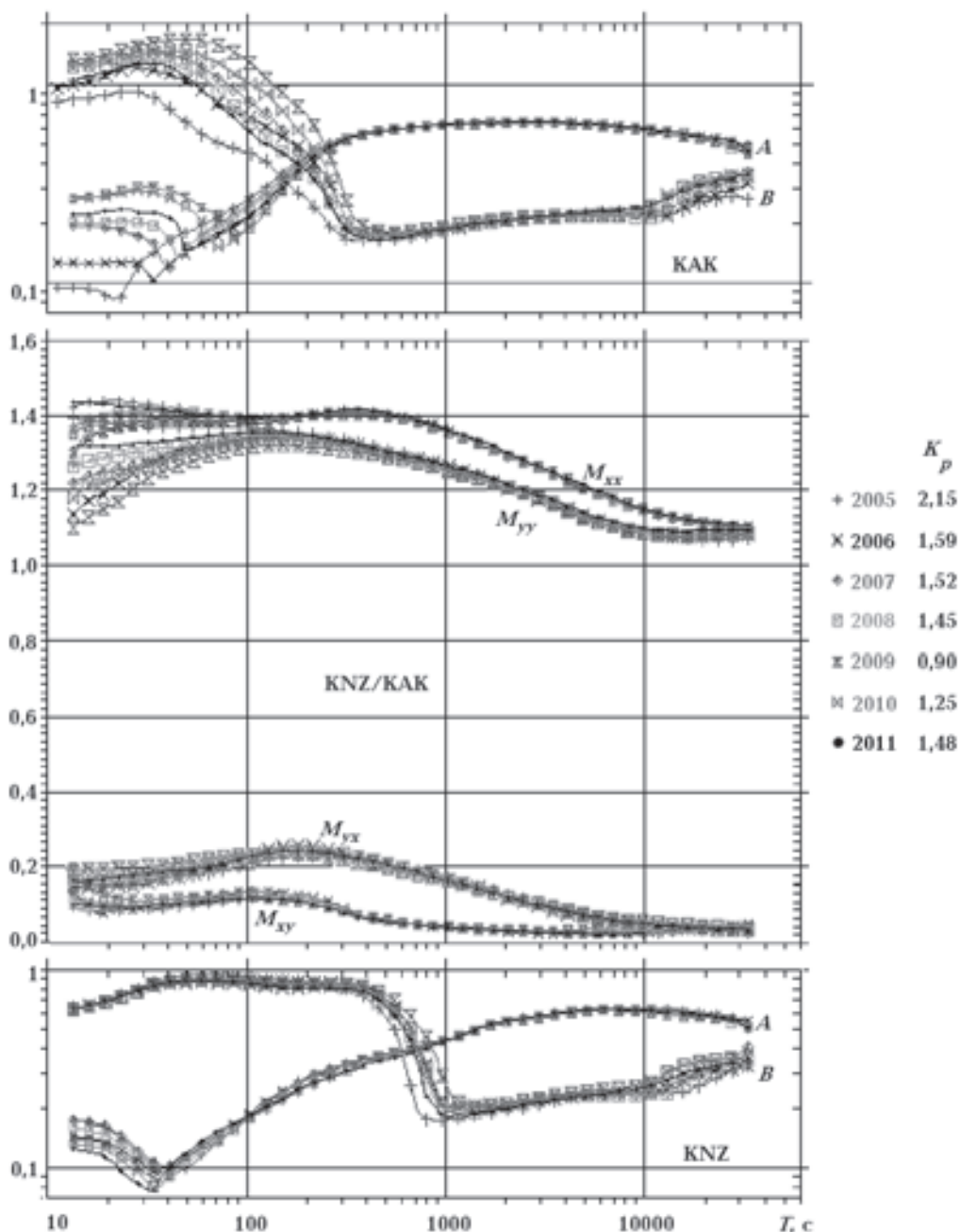


Рис. 4. Среднегодовые частотные характеристики за 2005—2011 гг.: компонент магнитного тензора [M] для обсерватории KNZ относительно базовой обсерватории КАК (средний график), северной и восточной компонент модуля вектора индукции (верхний и нижний графики). Справа даны среднегодовые значения трехчасовых индексов магнитной активности.

фициентов корреляции различных компонент RF с K_p -индексом.

Выводы. 1. Дан краткий исторический обзор использования функций отклика в Японии и описаны особенности измерения RF. Кратко представлено состояние проблемы прогноза землетрясений.

2. Выполнен анализ большого материала

обработки, полученного в условиях сильных помех. Выделены аномалии функций отклика, происходившие в течение нескольких лет до катастрофического ЗТ Тохоку, которые можно предположительно отнести к среднесрочным предвестникам этого ЗТ.

3. Обнаружена аномалия электропроводности под центральной частью п-ова Босо (при-

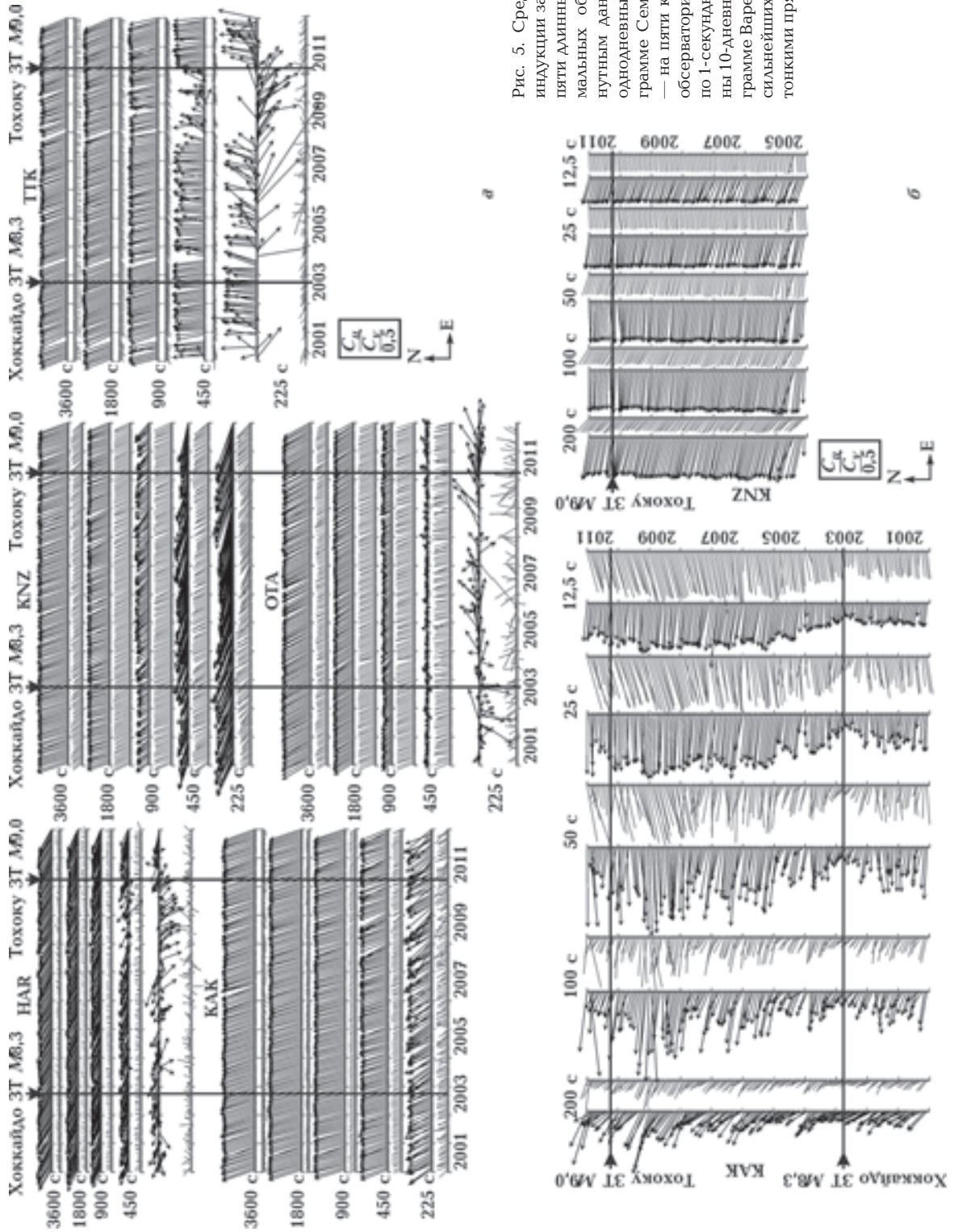


Рис. 5. Среднемесячные векторы индукции за 2001—2011 гг.: а — на пяти длинных периодах для 5 аномальных обсерваторий по 1-минутным данным (обрабатывались однократные реализации по программе Семенова—Климкович), б — на пяти коротких периодах для 1-секундным данным (обработаны 10-дневные реализации по программе Варенцова). Моменты двух сильнейших ЗТ даны сплошными тонкими прямыми линиями.

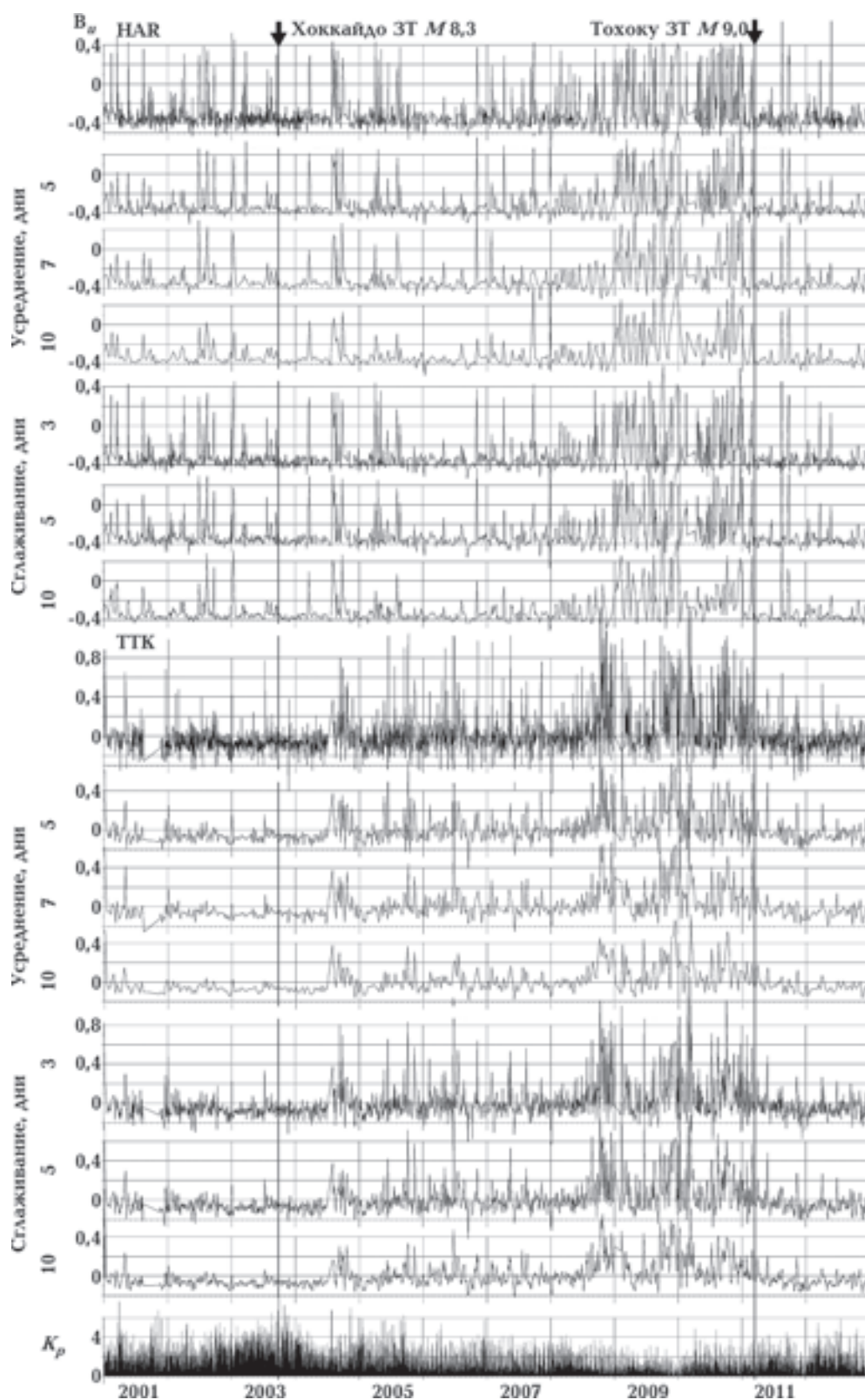


Рис. 6. Варианты улучшения визуализации зашумленных исходных временных рядов скользящим сглаживанием по 3, 5 и 10 дням и усреднением за 5, 7 и 10 дней. Исходные ежесуточные данные изображены вверху под названиями обсерваторий HAR и TTK, они получены по программе Семенова—Климкович на периоде 450 с по компоненте B_v .

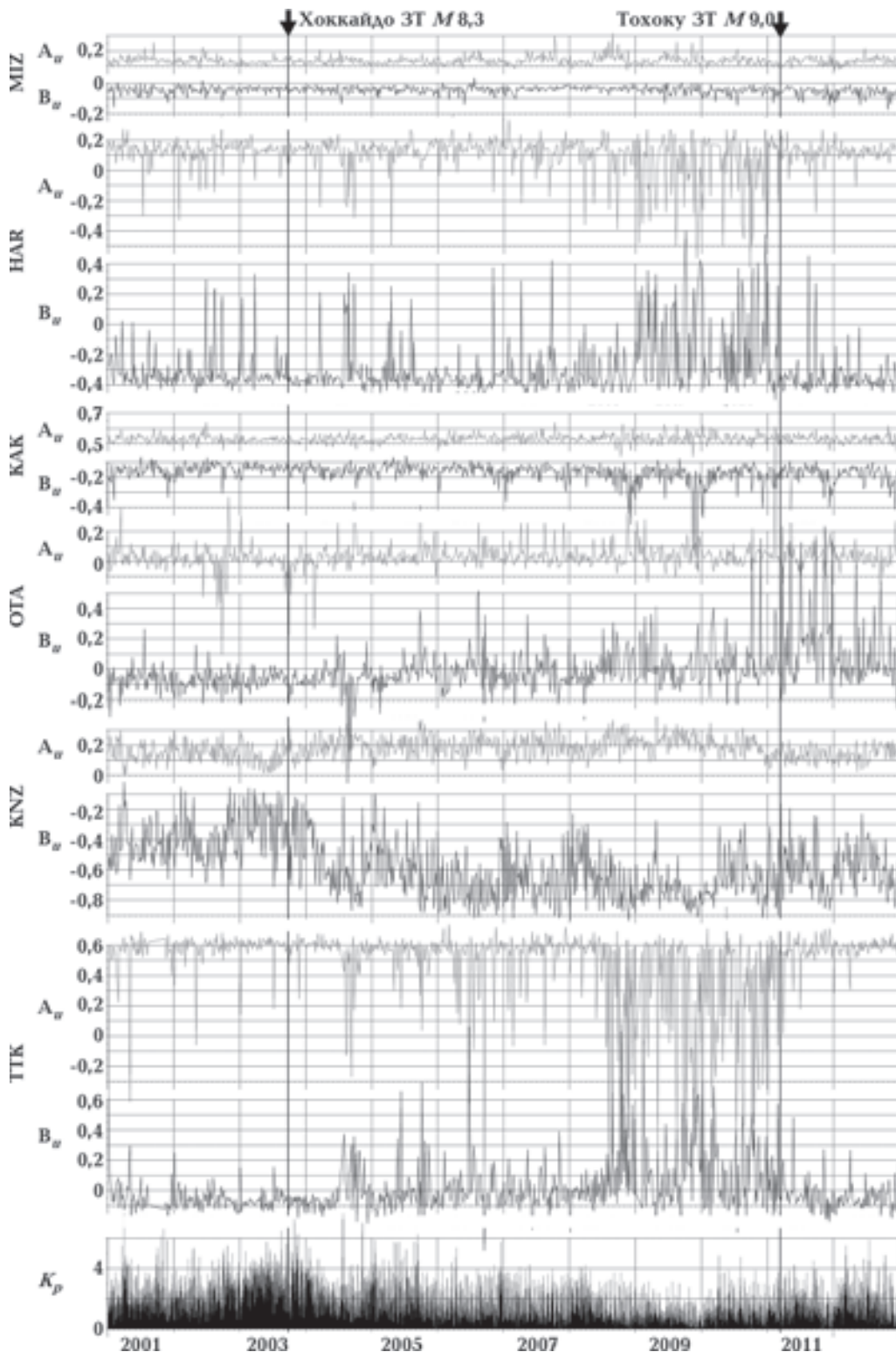


Рис. 7. Ежедневные (с усреднением по 5 дней) изменения действительных компонент вектора индукции за 2001—2011 гг. на шести обсерваториях (MIZ, HAR, KAK, OTA, KNZ и TTK) для диапазона периодов 5—10 мин (обработка выполнена по программе Семенова—Климкович). Вертикальными линиями даны моменты ЗТ Хоккайдо 25.09.2003 и Тохоку 11.03.2011. Средний за каждые сутки планетарный трехчасовой индекс геомагнитной активности K_p дан на нижнем графике.

город Токио) в районе сложного сочленения трех литосферных плит.

Благодарность. Авторы выражают благодарность сотрудникам геомагнитных observa-

торий и организациям по сбору и хранению информации (Geospatial Information Authority of Japan (GSI), Kakioka Magnetic Observatory,

Japan Meteorological Agency (КМО-ЖМА), World Data Center for Geomagnetism, Kyoto) за предоставление качественных данных.

Список литературы

- Бабак В. И., Климкович Т. А., Рокитянский И. И., Терешин А. В. Вариации вектора индукции в Японии. *Геофиз. журн.* 2013. Т. 35. № 1. С. 153—158.
- Бердичевский М. Н., Дмитриев В. И. Модели и методы магнитотеллурики. Москва: Научный мир, 2009. 680 с.
- Климкович Т. А. Особливості часових змін аномального магнітного поля та векторів індукції у закарпатському сейсмоактивному прогині: Дис. канд.... фіз.-мат. наук. Київ, 2009. 195 с.
- Прогноз землетрясений возможен?! Под ред. С. А. Пулинца. Москва: Тривант, 2014. 144 с.
- Рокитянский И. И. Исследование аномалий электропроводности методом магнитовариационного профилирования. Киев: Наук. думка, 1975. 296 с.
- Рокитянский И. И., Трегубенко В. И., Бабак В. И., Терешин А. В. Вариации компонент вектора индукции и горизонтального тензора перед землетрясением Тохоку 11 марта 2011 г. по данным японских геомагнитных обсерваторий. *Геофиз. журн.* 2013. Т. 35. № 3. С. 115—130.
- Саговский М. А. Геофизика и физика взрыва. Москва: Наука, 2004. 440 с.
- Саговский М. А., Болховитинов Л. Г., Писаренко В. Ф. Деформирование геофизической среды и сейсмический процесс. Москва: Наука, 1987. 104 с.
- Семенов В. Ю. Обработка данных магнитотеллурического зондирования. Москва: Недра, 1985. 133 с.
- Шуман В. Н. Нелинейная динамика, сейсмичность и аэрокосмические зондирующие системы. *Геофиз. журн.* 2015. Т. 37. № 2. С. 38—55.
- EMSEV 2014, Electromagnetic effects of the earthquakes and volcanoes, Workshop, Konstancin Jeziorna, Poland, 22—26 September. 152 p.
- Fujita S., 1990. Monitoring of time changes of conductivity anomaly transfer functions at Japanese magnetic observatory network. *Memoirs of the Kakioka Magnetic Observatory*, 23(2), 53—87.
- Nature debates. 1999. http://helix.nature.com/debates/earthquake/equake_5.html
- Uyeda S., 2013. On earthquake prediction in Japan. *Proc. Jpn. Acad., Ser. B*, 89, 391—400.
- Varentsov Iv. M., 2007. Arrays of simultaneous EM soundings: design, data processing and analysis. EM sounding of the Earth's interior. In: *Methods in geochemistry and geophysics*. 40, Elsevier, P. 263—277.
- Wang K., Chen Q., Sun S., Wang A., 2006. Predicting the 1975 Haicheng Earthquake. *Bull. Seismol Soc Amer.* 96(3), 757—795. doi: 10.1785/0120050191.

Variations of geomagnetic response functions in Japan

© I. I. Rokityansky, V. I. Babak, A. V. Tereshyn, 2015

Peculiarities of measurements have been described for response functions (RF), historical review of RF application in Japan has been given together with general condition of earthquake forecast (EQ). Detailed analysis of vast material of processing obtained under conditions of strong disturbances has been fulfilled. Anomalies of response functions have been distinguished, which occurred during several years before catastrophic EQ Tohoku, which might be probably recognized as medium-term precursors of that EQ. Anomaly of electric conductivity has been revealed under the central part of Boso peninsula (Tokyo suburb) in the area of complicated junction of three lithosphere plates.

Key words: earthquake precursors, electromagnetic response functions, vectors of induction, electric conductivity of lithosphere.

References

- Babak V. I., Klymkovych T. A., Rokityansky I. I., Tereshyn A. V.*, 2013. Variations of induction vector in Japan. *Geofizicheskiy zhurnal* 35(1), 153—158 (in Russian).
- Berdichevskiy M. N., Dmitriev V. I.*, 2009. Models and methods of magnetotellurics. Moscow: Nauchnyy Mir, 680 p. (in Russian).
- Vanyan L. L.*, 1997. Electromagnetic soundings. Moscow: Nauchnyy Mir, 219 p. (in Russian).
- Klymkovych T. A.*, 2009. Peculiarities of temporal variations of anomalous magnetic field and induction vectors in the Transcarpathian seismic-active trough. Dissertation of the candidate phys. and mathem. sci. Kiev, 195 p. (in Ukrainian).
- Earthquake prediction is possible?! Ed. S. A. Pulinets*, 2014. Moscow: Trovant, 144 p. (in Russian).
- Rokityansky I. I.*, 1975. Investigation of the electrical conductivity anomalies by magnetovariational profiling method. Kiev: Naukova Dumka, 279 p. (in Russian).
- Rokityansky I. I., Tregubenko V. I., Babak V. I., Tereshyn A. V.*, 2013. Variations of induction vector components and horizontal tensor before the Tohoku earthquake of March 11, 2011 according to Japanese geomagnetic observatories data. *Geofizicheskiy zhurnal* 35(3), 115—130 (in Russian).
- Sadovskiy M. A.*, 2004. Selected works: Geophysics and physics of explosion. Moscow: Nauka, 440 p. (in Russian).
- Sadovskiy M. A., Bolkhovitinov L. G., Pisarenko V. F.*, 1987. Deformation of the geophysical medium and the seismic process. Moscow: Nauka, 104 p. (in Russian).
- Svetov B. S.*, 1991. Transfer functions of the electromagnetic field. *Fizika Zemli* (1), 119—128 (in Russian).
- Semenov V. Yu.*, 1985. Processing of geomagnetic sounding data. Moscow: Nedra, 133 p. (in Russian).
- Shuman V. N.*, 2015. Nonlinear dynamics, seismic activity and aerospace sounding systems. *Geofizicheskiy zhurnal* 37(2), 38—55 (in Russian).
- EMSEV 2014*, Electromagnetic effects of the earthquakes and volcanoes, Workshop, Konstancin Jeziorna, Poland, 22—26 September. 152 p.
- Fujita S.*, 1990. Monitoring of time changes of conductivity anomaly transfer functions at Japanese magnetic observatory network. *Memoirs of the Kakioka Magnetic Observatory*, 23(2), 53—87.
- Nature debates*. 1999. http://helix.nature.com/debates/earthquake/quake_5.html
- Uyeda S.*, 2013. On earthquake prediction in Japan. *Proc. Jpn. Acad., Ser. B*, 89, 391—400.
- Varentsov Iv. M.*, 2007. Arrays of simultaneous EM soundings: design, data processing and analysis. EM sounding of the Earth's interior. In: *Methods in geochemistry and geophysics*. 40, Elsevier, P. 263—277.
- Wang K., Chen Q., Sun S., Wang A.*, 2006. Predicting the 1975 Haicheng Earthquake. *Bull. Seismol Soc Amer.* 96(3), 757—795. doi: 10.1785/0120050191.