УДК 551.594.11;551.594.6

ВАРИАЦИИ СПЕКТРАЛЬНОЙ ПЛОТНОСТИ МОЩНОСТИ ИМПУЛЬСНЫХ СИГНАЛОВ ГРОЗОВЫХ РАЗРЯДОВ В ПОЛОСЕ ЧАСТОТ 12–40 кГц, СВЯЗАННЫЕ С ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМИ В ЯПОНИИ И НА ТАЙВАНЕ

© 2019 г. В. В. Кабанов*

Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт им. Н.А. Шило ДВО РАН, г. Магадан, Россия *e-mail: vvk20062@gmail.com Поступила в редакцию 21.12.2017 г. После доработки 17.05.2018 г. Принята к публикации 27.09.2018 г.

При регистрации электрической компоненты электромагнитного поля в Магаданской обл. обнаружены аномальные вариации спектральной плотности мощности импульсных сигналов грозовых разрядов (атмосфериков) в полосе частот 12—40 кГц в период подготовки серии землетрясений на о-ве Кюсю, Япония, в апреле 2016 г. Аномалии проявились в необычном поведении соотношения спектральных плотностей атмосфериков для верхних и нижних частот. Наблюдалась слабо искаженная временная зависимость соотношения спектральных плотностей и пониженные ее значения в дневное время за 3 нед. с последующим возрастанием значений дневных минимумов и появлением выбросов дневных значений за 3 сут до начала серии землетрясений. Комплекс отмеченных аномалий являлся предвестником этой серии землетрясений. Обнаруженные аномалии частично наблюдались и перед сильными землетрясениями на Тайване в период с 10.2013 г. по 02.2016 г. Аномалии не связаны с геомагнитной активностью.

DOI: 10.1134/S0016794019010085

1. ВВЕДЕНИЕ

Во всем мире уже многие годы ведутся исследования по обнаружению электромагнитных эффектов, связанных с готовящимися землетрясениями. Это наземные исследования, многие результаты которых приведены в работе [Каталог ..., 1991], и более современные - в работах [Муллаяров и др., 2011 и Mullayarov et al., 2012]. Основным недостатком первой серии наблюдений является отсутствие синхронной регистрации дискретных сигналов в разнесенных пунктах и локализации их источников [Каталог ..., 1991]. Для усовершенствования методики наземных исследований в 2003 г. на территории Магаданской обл. была создана сеть региональных станций сейсмоэлектромагнитного мониторинга (СЭМ), реализующая регистрацию электрической компоненты электромагнитного поля в диапазоне 8-40 кГц [Шарафутдинов и Кабанов, 2007]. Аппаратурные комплексы, описанные в работе [Кабанов и Шарафутдинов, 2007], были размещены в поселках Омчак, Сеймчан и Стекольный. В 2007 г. комплексы дополнены системой привязки по времени с использованием GPS сигналов. С использованием созданной сети были обнаружены предвестники

нескольких региональных землетрясений в виде аномалий во временном поведении соотношения спектральных плотностей (ССП) атмосфериков – грозовых электромагнитных сигналов, для верхнего и нижнего-поддиапазонов исследуемых частот [Кабанов и Шарафутдинов, 2012 и 2013].

С 2013 г. запущена система оценки ССП в реальном масштабе времени на базе двух станций в г. Магадан и пос. Стекольный с передачей данных через Интернет. Подобная система также позволяет обнаруживать предвестники региональных землетрясений [Кабанов, 2013]. Но ее возможности шире. 12–14.04.2016 г. наблюдалось необычное изменение характера зависимости ССП от времени, после чего произошло первое землетрясение на о-ве Кюсю, Япония. Анализ аномалий ССП был продолжен после окончания серии землетрясений. В процессе анализа также была выявлена возможность возникновения аномалий ССП, связанных с землетрясениями на Тайване.

Цель работы: исследование обнаруженных аномалий изменения характера временной зависимости ССП, связанных с землетрясениями в Японии и на Тайване.



Рис. 1. Схема системы для поисков ЭМ-предвестников землетрясений в реальном масштабе времени.

2. АППАРАТУРА И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве исходных данных используются записи электрической компоненты электромагнитного (ЭМ) поля в диапазоне 8-40 кГц. Регистрация производится с помощью специально разработанных комплексов [Кабанов и Шарафутдинов. 2007]. В установленном на антенной мачте выносном приемном устройстве производится усиление сигнала и его преобразование в промежуточную частоту 108-140 кГц. Сигнал промежуточной частоты через коаксиальный кабель поступает на центральный блок приемного устройства, в котором выполняется обратное преобразование частоты и усиление сигнала для подачи на аналогоцифровой преобразователь (АЦП). Синхронизация преобразователей частоты выполняется с использованием гетеродинов, синхронизируемых сигналом от термостатируемого кварцевого генератора. Оцифровка сигнала производится с частотой 100 кГц. Используется двухканальный АЦП, на второй вход подаются следующие с частотой 1 Гц импульсы от GPS приемника. Передний фронт импульса соответствует началу секунды. Для регистрации используется Notebook с двухъядерным процессором "Atom". Сигнал непрерывно циклически записывается на диск. Производится обработка поступающих от GPS приемника импульсов. В процессе ее определяется временное положение импульсов и эти данные записываются на диск в отдельные файлы.

До 2013 г. функции комплексов этим и ограничивались. Запись велась на внешние диски большой емкости, съем данных производился с помощью замены дисков. Комплексы были установлены в поселках Магаданской области Стекольный, Омчак и Сеймчан, откуда данные раз в полгодагод доставлялись в г. Магадан для совместной обработки. Выполнялся взаимно корреляционный анализ записей сигнала с целью обнаружения атмосфериков и оценки их спектральной плотности мощности. С 2013 г. количество станций было ограничено двумя, установленными в пос. Стекольный и г. Магадан. Периферийный комплекс в пос. Стекольный был дополнен Notebook для предварительной обработки данных. На рисунке 1 приведена схема новой системы.

В процессе предварительной обработки производится поиск атмосфериков на основе корреляшии записанного сигнала с образцом типичного атмосферика. Сначала выполняется фильтрация для удаления сигналов от радиостанций и других возможных узкополосных помех, а затем определяется временное положение атмосферика на основе меток от GPS приемника. Следует отметить, что усиление приемника выбирается так. чтобы среднеквадратичный уровень сигнала на выходе не превышал ~1/5-1/3 верхнего предела преобразования АЦП. Временное положение атмосфериков определяется на основе взаимного корреляционного анализа записи сигнала и образца в скользящем временном окне с использованием алгоритма прямого и обратного БПФ. Затем оцениваются значения спектральной плотности (СП) мощности для частотных диапазонов 8-12, 12-20, 20-30 и 35-40 кГц. Полученные оценки записываются в специальные файлы, которые передаются с периферийной станции через Интернет. Анализ производится для 2-минутных записей каждые 15 мин. Кроме того, каждые 2 мин производится оценка уровня сигнала Японской радиостанции с частотой 40 кГц, что также может быть полезно для поиска предвестников землетрясений [Кабанов и Хасанов, 2016]. На центральной станции функции предварительной обработки обеспечиваются центральным компьютером с многоядерным процессором. Передача данных между компьютерами обеспечивается Wi-Fi. На центральном компьютере определяются атмосферики, одновременно наблюдаемые на двух станциях, которые используются для дальнейшего определения соотношения спектральных плотностей (ССП). ССП определяется для ст. Стекольный, менее подверженной промышленным помехам.



Рис. 2. Форма типичного атмосферика.

Анализ только тех атмосфериков, которые одновременно приняты на двух станциях, позволяет заметно снизить влияние промышленных помех. Для ослабления влияния суточных вариаций интенсивности атмосфериков и других факторов в дальнейшем анализе используются не значения СП, а их соотношение для разных частотных диапазонов. ССП определяется как разность выраженных в децибелах значений усредненной СП атмосфериков для двух частотных полос. Анализ ССП позволил в значительной степени снизить влияние суточных и других вариаций интенсивности потока атмосфериков. При усилении интенсивности атмосфериков усиливается СП на всех частотах, но при рассмотрении ССП сигнала для разных частотных полос остается только информация в виде зависимости СП от частоты, нивелирующая изменения интенсивности сигналов от времени.

Одновременно оценивается разница времени прихода атмосфериков на станции, что позволяет разделить поток атмосфериков по направлениям прихода на станции. Максимальная разница прихода для данного расположения станций составляет 170 мкс (17 интервалов квантования АЦП), поэтому ввиду ошибок определения положения атмосфериков разделение по направлениям прихода весьма приблизительное. Но, как показывает опыт, этого оказывается достаточно для разделения атмосфериков, приходящих с южных и северных направлений.

На рисунке 2 приведен вид типичного атмосферика, полученного усреднением нескольких десятков и используемого для обнаружения. Для усреднения использовались достаточно сильные (с амплитудой не менее 5–7 среднеквадратичных уровней отфильтрованного от радиостанций сигнала) атмосферики от дальних источников. При определении корреляции возможны ошибки в определении корреляционного максимума до 10-20 мкс за счет колебаний форм атмосфериков. Также возможны ошибки за счет колебаний амплитуд отдельных максимумов в сигнале, выражающиеся в смещении на квазипериод (~80 мкс). Максимум сигнала на рис. 2 сдвинут от начала образца. Но это не имеет значения, поскольку анализируется не само время прихода, а разница времен для разнесенных станций. Применение обнаружения атмосфериков на основе типичного образца было протестировано на использованных в работе [Кабанов и Шарафутдинов, 2013] данных. Результаты оказались практически неотличимы.

Для отобранных атмосфериков рассчитывается ССП для верхних (35–40 кГц) и нижних частот (12-20 кГц). Выбрана не самая нижняя полоса (8-12 кГц). Дело в том, что в этом поддиапазоне существенно сказывается влияние температуры окружающей среды на фильтры приемника, поскольку срез частот ниже 8 кГц производится в районе максимума СП атмосфериков и небольшие изменения частоты среза фильтра за счет изменений температуры (даже суточных) приводят к значительным дополнительным колебаниям интегральной СП. Соответствующие полосе 8-12 кГц зависимости ССП на рис. 4a-4e в работе [Кабанов и Шарафутдинов, 2013] отличаются от зависимостей для других полос большей (на ~1 дБ) амплитудой колебаний и полным отсутствием связи флуктуаций ССП с землетрясением. Полоса 12-20 кГц отделена от частоты среза аппаратного фильтра на 4 кГц и попадает в область слабых (<0.5 дБ) колебаний частотной характеристи-

ки фильтра, поэтому влияние температуры для этой полосы слабое. Использование ССП для выбранных полос частот основано на результатах работы [Кабанов и Шарафутдинов, 2013]. Для полосы 30-40 кГц были получены наиболее ярко выраженные аномалии перед землетрясениями [Кабанов и Шарафутдинов, 2013]. В данных исследованиях используется верхняя полоса 35-40 кГц ввилу возросшей помехи на частоте ~32 кГи. Нижняя полоса 12-20 кГи выбрана с целью все же частично захватить область максимума СП атмосфериков. Кроме того, в работе [Кабанов и Шарафутдинов, 2013] для этой полосы по сравнению со случаем полосы 30-40 кГц отмечаются обратные изменения ССП перед землетрясением, и эффекты при использовании выбранных полос будут максимальны.

Как показали исследования, неискаженная зависимость ССП от времени стабильно имеет регулярный вид (ночные максимумы и дневные минимумы с амплитудой ~3-4 дБ) в случае использования для анализа атмосфериков, приходящих с южных направлений. Поскольку рассматриваются землетрясения, произошедшие к югу от станций, далее везде анализируется временная зависимость ССП для южных атмосфериков. Зависимость ССП характеризуется ночным максимумом и дневным минимумом для местного времени LT = UT + 12 ч. Переход от низких дневных значений к высоким ночным быстро происходит в предполуночное время. Обратный переход, также быстро, совершается за несколько часов до полудня. Конкретное время переходов зависит от сезона года. В связи с определяющим влиянием на вид ССП, далее везде показаны зависимости ССП от местного времени и обозначены моменты землетрясений. Зависимости центрированы относительно среднего значения для рассматриваемого временного интервала. Искажения временной зависимости ССП атмосфериков выражаются в повышении уровня ССП в дневное время. Повышения уровня связаны с вариациями мировой грозовой активности и нестабильностью условий распространения радиоволн для верхней части исследуемого диапазона частот. Повышение может быть кратким и проявляться как выброс ССП (обособленный максимум, превышающий прилегающие минимумы не менее чем на ~1 дБ). Помимо этого, могут происходить более длительные повышения значений ССП до половины дня и в течение всего дневного времени. Именно подобные вариации наблюдаются и перед землетрясениями, однако их совокупность имеет необычный характер.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

На рисунке 3 приведены временные зависимости для СП в полосах частот 12–20 (*a*) и 35–40 кГц (б) и полученной исходя из них ССП (в) для интервала с 29 марта по 25 апреля 2016 г. Стрелками отмечены моменты первых, наиболее сильных землетрясений на о-ве Кюсю. Данные по этим землетрясениям и другим получены из Интернет-страницы http://www.ceme.gsras.ru/cgi-bin/ceme/equakes.pl. Эти данные могут немного отличаться от данных из других источников.

Единственной особенностью поведения СП, которую, на первый взгляд, можно связать с готовящимися землетрясениями, является стабильное уменьшение амплитуд колебаний СП, происходящее с 13 апреля до момента наиболее сильного землетрясения (в течение 3 дней) на рис. Зб (35-40 кГц). Наблюдается одновременное снижение ночных максимумов на 1.7 дБ и повышение уровня вечерних выбросов ССП на 4 дБ (для дневных минимумов скачкообразное повышение на 2.2 дБ 13 апреля). А вот для ССП особенностей поведения больше. Как видно из рис. 36, с 29 марта до 12 апреля наблюдается достаточно слабо искаженная зависимость ССП от времени. Присутствуют флуктуации уровней ночных максимумов и дневных минимумов, но выбросы в дневное время весьма невелики, среднеквадратичное отклонение (СКО) максимумов выбросов относительно амплитуды дневных минимумов $\sigma ba = 0.27$. В период 12-14 апреля (за 3 сут перед первым землетрясением) начинается повышение уровней дневных минимумов (итого на 1.5 дБ относительно 11.04) и появляются выбросы ССП в дневное время (на уровень порядка -0.3 дБ, что соответствует 0.7-0.9 от амплитуды дневных минимумов или величинам в районе 3 ова перед этим). После этого происходят первые два землетрясения серии. Днем 15 апреля (максимум в 17:45) наблюдается наиболее высокий дневной выброс ССП до уровня ~2 дБ (8.3 σba), предваряющий наиболее сильное землетрясение. 16-19 апреля имеет место интервал повышенных дневных значений ССП (для СП 16–17 апреля), после чего зависимость ССП от времени постепенно относительно нормализуется. Сравнение рис. За, Зб и Зв подтверждает, что использование ССП, характеризующей разницу в распространении радиоволн различных диапазонов, дает возможность выявить больше закономерностей, которые могут быть связаны с землетрясениями.

Возможна также связь вариаций ССП с сейсмической активностью во время серии землетрясений. На рисунке 4 приведен растянутый во времени участок зависимости ССП для этого периода (зависимость центрирована относительно среднего для рассматриваемого периода, поэтому величины ССП меньше наблюдаемых на рис. 3 на 1.13 дБ). Стрелками обозначены наиболее сильные землетрясения. Можно отметить определенное временное совпадение перегибов ночной временной зависимости ССП с первыми четырьмя



Рис. 3. Зависимость от времени СП в полосах 12–20 кГц (*a*) и 35–40 кГц (*б*) и соответствующей им ССП (*в*) для периода с 29 марта по 25 апреля 2016 г.

обозначенными землетрясениями. После 01:00 15.04 прекращается рост ССП и даже происходит снижение на 0.3 дБ. Возрастание ССП снова начинается после 03:00. Землетрясения произошли (LT!) в 00:26:33 и 03:03:45. После 04:45 16.04 прекращается спад ССП и наблюдается возрастание на 0.2 дБ. Интенсивный спад ССП снова начинается в 06:45 при землетрясениях в 04:25:02 и в 06:55:51 (перед ним, не обозначенное на рис. 4, с M = 5.5 в 06:03:10). Сразу или в течение часа после землетрясений происходит изменение поведения ССП (прекращается и возобновляется снова возрастание или спад временной зависимости ССП). Обращает на себя внимание вечерний минимум ССП 17 апреля ($-3 \, д$ Б в 20:15), после которого в течение суток землетрясений с М \geq 5 не наблюдается. Они возобновляются после утреннего выброса ССП 18 апреля (максимум 1.6 дБ в 10:45, спад после выброса такой же величины, как возрастание перед выбросом 15.04).

Особенностью зависимости ССП на рис. 3*в* до 12 апреля является слабая искаженность, выражающаяся в отсутствии дневных выбросов выше -1.25 дБ. В марте такие выбросы имеются. На рис. 5 приведена зависимость ССП и индекса геомагнитной активности *Кр* для периода с 28 февраля



Рис. 4. Зависимость ССП от времени для периода 14-19 апреля 2016 г.

по 25 апреля 2016 г. После 23 марта наблюдается слабо искаженная зависимость ССП (σ ba = 0.26) и пониженные значения дневных минимумов ССП (~2 дБ относительно начала марта). Первое снижение значений дневных минимумов (~1 дБ) происходит с 7-9 марта, хотя наблюдается небольшое повышение дневных уровней ССП и выбросы 14-17 марта. Помимо этого, имеется одиночный полуденный выброс 23 марта. Численной характеристикой временного интервала 14-20 марта, где все выбросы по величине превышают наблюдаемые на рис. 3e до 12 апреля, является $\sigma ba =$ = 0.74, в 2.75 раза выше, чем в период с 29 марта до 12 апреля. Таким образом, период с 24 марта до 12 апреля характеризуется пониженными значениями дневных минимумов ССП и слабой искаженностью его временной зависимости. Устойчивые эффекты начинают наблюдаться за 3 нед. до первого землетрясения.

Что касается возможного влияния геомагнитной активности, то повышение дневных уровней ССП 12-14 апреля сопровождается устойчиво высокими значениями Кр. Была рассчитана взаимно корреляционная функция между изменениями минимальных дневных уровней и значениями Кр. Также оценивались автокорреляционные функции этих параметров. Для случаев запаздывания изменений минимумов ССП относительно Кр наблюдаются отрицательные экстремумы функции, с задержкой 6.5 сут с амплитудой 0.39 и с задержкой 2 сут с амплитудой 0.24. Но вместе с тем обнаружился максимум функции со значением 0.3 при запаздывании уже Кр на 2 сут. Экстремумы автокорреляционных функций не превышают 0.25. Отрицательный минимум с задержкой 6.5 сут связан со спадом минимумов ССП после окончания серии землетрясений, а положительный максимум с опережением изменений ССП относительно Кр на 2 сут показывает, что спад ССП начался раньше всплеска геомагнитной активности. Разнополярные экстремумы функции свидетельствуют, что при повышении геомагнитной активности может происходить как возрастание, так и убывание минимальных уровней ССП. Согласно публикации [Мирский, 1972] абсолютная среднеквадратичная погрешность определения корреляции $\xi \sim 1/\sqrt{N}$, где N – число независимых отсчетов. Здесь $N \sim 55$ и $\xi \sim 0.13$. Экстремумы заметно превышают ξ, но отражают случайные временные соотношения между сильными изменениями ССП и Кр на рассматриваемом временном интервале.

Наблюдение слабо искаженной временной зависимости ССП нетипично для апреля. Для примера на рис. 6 приведены соответствующая по датам рис. 3 временные зависимости ССП и индекса геомагнитной активности Кр для 2015 г. В первой половине апреля 2015 г. почти каждый день наблюдались дневные выбросы ССП до уровня ~2 дБ. Для интервала с 29 марта по 11 апреля 2015 г. получается ова = 1.4. Это почти в 2 раза выше, чем для интервала марта 2016 г. с наиболее искаженной зависимостью ССП ($\sigma ba = 0.74$). Во второй половине апреля, 20 апреля, произошла короткая серия землетрясений на Тайване, сначала одиночное с M = 6.5, а затем в течение 40 мин – три остальных. Они отмечены стрелками. Если не касаться периода землетрясений, на рис. 6 наблюдается значительно большая (в 5.2 раза) ис-



Рис. 5. Зависимости ССП и Кр-индекса от времени для периода с 28 февраля по 25 апреля 2016 г.

каженность ССП, чем на рис. 3*в*, перед землетрясениями.

Если рассмотреть поведение ССП перед землетрясениями, то 14-17 апреля амплитуды максимумов выбросов уменьшаются и имеют уровень ~0.5 дБ. С 18 апреля происходит снижение минимальных дневных значений на ~2 дБ. Заметим, что пик выброса 20 апреля соответствует моменту землетрясения. Имеется определенное сходство со случаем серии землетрясений в апреле 2016 г. Вопервых, это небольшое уменьшение искаженности зависимости ССП (16-18 апреля величины выбросов характеризуются σ ba = 0.81, в то время как для наименее искаженного участка зависимости ССП перед этим 8-10 апреля эта величина 0.91 и, как указано выше, 1.4 – для всего предшествующего временного интервала). Во-вторых, это понижение минимальных дневных уровней на 2.1 дБ (правда, всего за пару дней) и возрастание уровня дневных выбросов с -1.45 18 апреля до -0.35 20 апреля (хотя максимум величиной 0.19 наблюдается через сутки после первого землетрясения). Отличием от случая серии землетрясений в апреле 2016 г. является совпадение временных интервалов пониженных дневных минимумов и выбросов. В результате для времени непосредственно перед землетрясением $\sigma ba = 0.86$, что мало отличается от предшествующего периода, и появление существенных выбросов ССП данным численным параметром не отражается.

А вот во временных зависимостях СП, на основе которых построено ССП, имеется стабильное возрастание ночных уровней перед землетрясениями (для полосы 35–40 кГц происходит увеличение СП на 8.2 дБ в течение 4 дней, причем в последний день перед первым землетрясением СП возрастает на 3.9 дБ). Наблюдается обратный эффект по сравнению со случаем апреля 2016 г., хотя непосредственно перед землетрясением с M = 7.4 на рис. 36 СП тоже возрастает даже на 4.9 дБ. Но если на рис. 36 после этого высокие значения ночных максимумов сохраняются, то после Тайваньских землетрясений 20.04.2015 г. происходит спад значений ночных СП на 5.2 дБ. Для поведения СП отличий больше, чем схожих черт.

С 9 апреля наблюдается возрастание геомагнитной активности, причем возрастание Kp происходит в виде трех длительных всплесков. В результате обнаружилась квазипериодичность изменений Kp (период ~5.5 сут). Кроме того, квазипериодическая компонента присутствует и в зависимости минимумов ССП, но с периодом ~4 сут. Экстремумы автокорреляционных функций составляли 0.35–0.58 для ССП и 0.25–0.34 для Kp. Визуально поведение ССП при вспышках геомагнитной активности различное: и у функции взаимной корреляции минимальных значений ССП, и у Kp значения экстремумов меньше (в интервале 0.2–0.25). В области опережения изменений Kp наблюдается максимум с задержкой КАБАНОВ



Рис. 6. Зависимости ССП и Кр-индекса от времени для периода с 29 марта по 25 апреля 2015 г.

~4 сут и минимум с задержкой 5.5 сут. В области обратных задержек наблюдается максимум в районе 6 сут. Положение экстремумов отличается от случая 2016 г., единственной похожей чертой является минимум в районе задержек изменений ССП на 5.5 сут (было 6.5 сут). Кроме того, для рассматриваемого интервала $\xi \sim 0.2$ и экстремумы функции взаимной корреляции не могут быть признаны значимыми.

Обнаружение аномалий ССП перед землетрясениями на Тайване 20 апреля 2015 г. явилось предпосылкой к началу анализа вариаций ССП, которые могут быть связаны с другими сильными Тайваньскими землетрясениями. Наиболее выраженные аномалии были обнаружены перед землетрясениями на Тайване, произошедшими в феврале 2016 г. На рис. 7 приведена временная зависимость ССП и *Кр*-индекса для периода с 23 января по 8 февраля 2016 г. В исходных зависимостях СП никаких особенностей, которые можно связать с землетрясениями, не обнаружено.

В отличие от предыдущих зависимостей ССП, на рис. 7 приведена также зависимость с более жесткой селекцией по задержкам прихода на станции (задержка 150—170 мкс во времени прихода на Стекольный относительно времени регистрации в Магадане, что соответствует ориентированному на юг сектору углов шириной 56°). Это направление отлично от точной ориентации на Тайвань. Но именно для него выявились наиболее заметные отличия в поведении ССП перед рассматриваемыми землетрясениями (за двое суток перед первым землетрясением, в окрестности времени второго и величине выбросов перед ним) от зависимости ССП для всех южных атмосфериков. Возможно, это связано с отмеченным ранее колебанием амплитуд максимумов атмосфериков, различным для разнесенных станций, приводящим к ошибкам в определении углов прихода атмосфериков. Подобный эффект различного определения углов прихода атмосфериков с направления на эпицентр разными парами станций обнаружен также перед землетрясением с M = 6, произошедшим в Якутии 23.06.2008 г.

До 1 февраля зависимости ССП слабо искажены и мало различаются, кроме времени, прилегающего к 26 января. Для временного интервала 23–31.01, исключая 25–27.01, $\sigma ba = 0.43$, ниже только в апреле 2016 г. перед землетрясениями. Для 25–27.01 $\sigma ba = 0.96$. СКО отклонения зависимостей друг от друга, для интервала 23–31.01, исключая только 26.01, составляет 0.5. Различие зависимостей проявляется 1–2 февраля (СКО = 1.15), перед первым землетрясением, и в окрестностях суток относительно второго, более сильного (СКО = 0.73). Также, при приближении к моменту этого землетрясения, стабильно возрастают выбросы ССП в дневное время (в случае самых южных атмосфе-

90



Рис. 7. Зависимости ССП и Кр-индекса от времени для периода с 23 января по 7 февраля 2016 г.

риков от -1.1 до 2.17 дБ, в случае всех южных атмосфериков от -1.4 до 0.54, причем в последний день возрастание совсем слабое, всего на 0.17 дБ). Особенно заметен выброс ССП в день перед землетрясением с M = 6.5, наблюдаемый на зависимости для самых южных атмосфериков (2.17 дБ, или 4.5 oba). Но также заметен и выброс перед первым землетрясением величиной 1.8 ова. Повышение дневных минимумов также имеется, первое происходит за день до первого землетрясения и составляет 0.5 дБ (относительно предыдущих четырех дней), а после первого землетрясения наблюдается еще повышение на 1.7 дБ, хотя и заканчивается за день до второго. Также привлекает внимание период пониженных (на ~1.5 дБ) ночных значений ССП 2-4 февраля. Еще имеется ночной провал ССП до значения –0.65 дБ при величине прилегающих максимумов в среднем 0.8 дБ, наблюдаемый только для случая самых южных атмосфериков в ночь перед первым землетрясением (2 февраля). Для них 1 и 2 февраля еще имеется более ранний переход зависимости ССП от высоких ночных значений к низким дневным. Для всех южных атмосфериков для приведенного на рис. 7 временного интервала среднее значение этого времени 11 ч при СКО = 19 мин. Для самых южных 1 и 2 февраля переход происходит в $\sim 08:12$, а для остального времени, исключая 26.01, время перехода раньше, чем для всех южных атмосфериков, не более чем на 1 ч. На рис. 7 аналогичная аномалии разница времен наблюдается и 26.01,

но формирование ее происходит иначе, в этот день имеет максимум время перехода для всех южных атмосфериков (11:33), а переход для самых южных происходит позже, в 09:29. 26 января также имеется ночной провал зависимости ССП, как 02.02, но менее (на 1 дБ) глубокий. Для рассмотренного землетрясения количество аномалий перед ним больше, чем в случае апреля 2015 г.

В рассматриваемом интервале времени геомагнитная активность относительно невелика (значения *Кр* только 2 раза доходят до 5) и, в связи с краткостью интервала, он здесь не анализируется и включен в общий блок данных для дальнейшего анализа.

Для Тайваньских землетрясений в апреле 2015 г. (рис. 6) также были построены зависимости ССП с применением селекции по углу. Разница между зависимостями для всех и самых южных атмосфериков в близкие землетрясениям периоды времени имеется. Но дневные выбросы 20 и 21 апреля для случая самых южных атмосфериков на 1-1.5 дБ ниже. И уже наблюдается не возрастание выбросов (-0.97, -0.35 и 0.19 дБ на рис. 6 19-21 апреля), а, скорее, убывание (-0.76, -1.4 и -1.35 дБ). Этот факт, если учесть, что самый сильный (0.19 дБ) выброс 21 апреля происходит уже после последнего землетрясения, позволяет предположить, что эти выбросы, в первую очередь, связаны не с землетрясениями, а с изменениями в грозовой активности. Единственной общей чертой со случаем февральских землетрясений 2016 г. является

Дата	Магнитуда	Слабо искаженная зависимость ССП: длительность, ова, ова до этого	Пониженные дневные минимумы ССП: длительность, величина снижения, дБ	Возрастание дневных минимумов ССП: длительность, величина, дБ	Выбросы ССП в дневное время: от ова перед этим
01.11.2013 г.	6.5	15 сут, 0.35, 1.3	нет	2 сут, 2	3.65
14.02.2015 г.	6.2	3 сут, 0.44, 0.89	3 сут, 2.5 (и ночные макс. 0.9)	3 сут, 3.2	3.75, но есть после толчка
20.04.2015 г.	6.5, 5.1, 5.6, 6.0	3 сут, 0.81, 1.4	2 сут, 2.1	нет	1.06 и есть после толчка
02—06.02.2016 г.	6.1, 6.5	4 сут, 0.43, 0.96	ночные максимумы: 3 сут, 1.5	4 сут, 2.2	4.5

Таблица 1. Тайваньские землетрясения и аномалии ССП перед ними

более ранний переход зависимости ССП для самых южных атмосфериков от высоких ночных значений к низким дневным 19 и 20 апреля 2016 г., аналогично наблюдаемому на рис. 7 1 и 2 февраля 2016 г. Но этот эффект в случае апрельских землетрясений 2015 г, в отличие от наблюдаемого на рис. 7, более слабый. Среднее значение времени перехода для всех южных атмосфериков составляет 8:32 при СКО =11 мин., а для самых южных атмосфериков в день землетрясений 20 апреля переход происходит на 1 ч раньше (вместо 3 ч в феврале 2016 г.), хотя, после исключения 20 и 21 апреля, среднее значение времени перехода для самых южных атмосфериков получается 8:28 и почти не отличается от случая всех южных.

Были проанализированы случаи еще двух сильных Тайваньских землетрясений. Полученные результаты для всех Тайваньских землетрясений сведены в таблицу. Таблица 1 показывает наличие типов аномалий ССП, обнаруженных перед серией землетрясений на о. Кюсю, и их численные характеристики для случаев Тайваньских землетрясений. Наиболее выражены (все 4 типа) аномалии перед февральскими землетрясениями 2016 г.

Численное описание аномалий позволяет выполнить оценку взаимосвязи их вариаций. Анализировались временные зависимости минимумов ССП, величины выбросов и СКО от неискаженной зависимости. Произведена оценка взаимной корреляции этих параметров за весь период наблюдений в 2013-2016 гг. (560 сут). Значения коэффициентов взаимной корреляции изменений минимумов с изменениями величины выбросов и СКО получены 0.465 и 0.069 соответственно. Коэффициент взаимной корреляции изменений последних двух параметров составил 0.665. Достаточно высокое значение последнего коэффициента объясняется тем, что искажения временной зависимости ССП в основном и связаны с выбросами. А вот корреляция изменения минимумов и выбросов свидетельствует о вкладе общего физического механизма в формирование этих параметров. Учитывая малую корреляцию между изменениями минимумов и средне квадратичного отклонения, можно сказать, что аномалии ССП перед землетрясениями выражаются в изменениях $2^1/_2$ параметров.

Была выполнена оценка корреляционных функций изменений минимумов ССП и Кр для объединенного блока приведенных выше данных длительностью 140 сут ($\xi \sim 0.08$). У функции взаимной корреляции обнаружились минимумы величиной -0.22 при задержке изменений ССП относительно Кр на 3 и 6.5 сут и максимум величиной 0.15 при обратной задержке 5.75 сут. Был также выполнен корреляционный анализ связи ССП и Кр для четырех других интервалов времени длительностью по 120 сут ($\xi \sim 0.09$). Максимум в районе опережения изменений ССП на ~6 сут присутствует в двух случаях, в одном случае там такой же минимум и еще в одном, значения корреляции около 0. Минимум при задержке изменений ССП на 3 сут для трех случаев сместился ближе на 0.5 сут и имеет вдвое меньшую амплитуду, а в одном случае наблюдается максимум величиной 0.06. Большинство экстремумов малозначимы. Аналогичная ситуация и для другого минимума величиной –0.22 в районе 6.5 сут. В одном случае его величина -0.12, в двух случаях он немного смещен и имеет величины порядка -0.05, и еще в одном, наблюдается максимум величиной 0.06. И, наконец, был выполнен корреляционный анализ для объединенного интервала 560 сут ($\xi \sim 0.04$). Экстремумы взаимно корреляционной функции уменьшились в 3 раза и стали сильно размазанными. Присутствуют максимум величиной 0.07 и минимум -0.067 в области опережения изменений ССП на 5.5 и 4 сут, максимум 0.063 в районе нулевой задержки и минимум -0.074 при опережении изменений Кр на 4 сут. Все экстремумы недостаточно значимы.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для анализа полученных результатов потребуется карта местоположения эпицентров землетрясений, приемных станций и грозовых источников, приведенная на рис. 8. Отмечены наиболее сильные землетрясения для каждого региона. На врезке приведено взаимное расположение приемных станций. Отмечено положение Юговосточного Азиатского центра грозовой активности. Также приведены зоны возможных ионосферных искажений, радиусы (*R*, в км) которых оценены согласно работе [Dobrovolsky et al., 1979], формулу оценки из которой проще записать как $R = e^{M}$ [Кабанов и Шарафутдинов, 2012].

Для серии землетрясений на о-ве Кюсю, произошедших в апреле 2016 г., были обнаружены аномалии во временной зависимости ССП для приходящих с южных направлений атмосфериков. Эти аномалии выражаются в пониженных значениях (на 2–3 дБ) дневных минимумов ССП, наблюдавшихся более чем за месяц перед землетрясениями, слабой искаженности зависимости в этот период (σ ba = 0.27 при значениях до 0.74 перед этим) и возрастании значений дневных минимумов (на 1.5 дБ) перед землетрясениями с появлением выбросов ССП в дневное время (уровни ~3 ова). Выброс максимальной амплитуды (8.3 oba) наблюдается перед самым сильным землетрясением в серии. По отдельности эти аномалии не уникальны и могут наблюдаться в обычное время (пример 29 марта – 12 апреля на рис. 6). Но в своей совокупности и последовательности (сначала понижение дневных минимумов, потом уменьшение искаженности и, наконец, возрастание дневных минимумов и выбросы) они являются явным предвестником данной серии землетрясений (за весь период наблюдений в 2013-2016 гг. подобного сочетания аномалий не обнаружено, кроме похожих случаев Тайваньских землетрясений). Аномалии для этих землетрясений получены при использовании зависимости ССП для всех южных атмосфериков. Более жесткой селекции по углам почти не потребовалось. Физической причиной этого является экранирование (или затенение) Юго-восточного Азиатского центра грозовой активности зоной ионосферных возмущений перед землетрясениями. Приходящие с юга атмосферики распространяются в волноводе Земля-ионосфера, параметры которой (концентрация электронов, ее высотный профиль, коэффициенты отражения и поглошения радиоволн и т.п.) изменились в связи с предстоящим землетрясением, в отличие от других атмосфериков, не проходящих под зоной возмущений. Как можно видеть из рис. 8, зона возмущений экранирует почти весь центр, который является основным источником атмосфериков в весенний период. В случае с землетрясениями на Тайване, максимальная магнитуда

которых в период наблюдений 6.5, размер зоны ионосферных возмущений меньше, и экранируется только половина грозового центра. Мы не рассматривали отдельные японские землетрясения с М ~ 6–6.5, поскольку для них зоны ионо-сферных возмущений не затрагивают трассы распространения атмосфериков от основных источников.

Для Тайваньских землетрясений наиболее ярко выраженные аномалии получены в случае землетрясения в феврале 2016 г., когда сначала произошло землетрясение с M = 6.1, а через 3.5 сут с M = 6.5. Как следует из ранее приведенной таблицы, для землетрясений 02-06.02.2016 г. есть все 4 признака, хотя вместо понижения дневных минимальных значений наблюдается понижение максимальных ночных. Для землетрясений 20.04.2015 г. аномалии проявляются слабее всего (согласно таблице наблюдается наибольшая искаженность зависимости, отсутствие возрастания минимумов ССП и еще выброс после землетрясения). Однако, как видно из рис. 6, весь апрель 2015 г. характеризуется существенными (σ ba = 1.4, максимум для всех рассмотренных временных интервалов) искажениями зависимости ССП, и на их фоне возможно нечеткое проявление аномалий, связанных с землетрясениями. Для самого слабого из землетрясений, произошедшего 14.02.2015 г., в таблице отмечено наличие всех аномалий. Но картину портит наличие выброса после землетрясения, как в случае землетрясений 20.04.2015 г., что может свидетельствовать о влиянии изменчивости грозовой активности. У землетрясения 01.11.2013 г. наблюдается длительный период (15 сут против 3-4 для других) слабой искаженности зависимости ССП. Если землетрясения 2015-2016 гг. произошли зимой и весной, то землетрясение 2013 г. произошло осенью, и на формирования этого периода может сказываться сезонная зависимость грозовой активности. Но для данного землетрясения наблюдается и наибольшее уменьшение искаженности временной зависимости ССП, в 3.7 раз против 1.7-2.2 для других Тайваньских землетрясений

На рисунке 9. приведена карта расположения приведенных в таблице Тайваньских землетрясений. Из карты видно, что землетрясения 01.11.2013 г. и 06.02.2016 г. с М = 6.5 произошли собственно на острове, а остальные – в море. И именно для этих двух случаев по-особенному выражены аномалии ССП. Для землетрясения 01.11.2013 г. наблюдаются необычные параметры периода слабой возмущенности, а для землетрясения 06.02.2016 г. присутствуют все признаки и имеются дополнительные аномалии. Этот факт может быть полезен при исследовании возможных механизмов влияния процессов при подготовке землетрясений на ионосферу. Эти механизмы перечислены, например, в работе [Akhoondzadeh, 2012]. Землетрясе-



Рис. 8. Карта расположения эпицентров землетрясений, приемных станций и основных грозовых источников.

ние 02.02.2016 г. также произошло в море. Кроме того, для этого землетрясения глубина составляет 200 км, в отличие от остальных с глубинами 20– 33 км. Поэтому аномалии ССП на рис. 7 связаны, скорее всего, со вторым и более сильным землетрясением 06.02.2016 г. Но нельзя исключить и влияния первого землетрясения, в случае если эти землетрясения связаны единым сейсмическим процессом. В этом случае пространственный размер сейсмического процесса будет максимальным для рассмотренных Тайваньских землетрясений, с чем и может быть связана наибольшая выраженность аномалий ССП для этих землетрясений.

Причиной выполнения анализа связи изменений минимумов ССП и Кр явилось наблюдаемое на рис. 5 наиболее интенсивное геомагнитное возмущение, сопровождающее повышение минимальных дневных значений ССП 12–14 апреля 2016 г. Выполненные оценки взаимно корреляционной функции между изменениями минимумов ССП и Кр –индексов для отдельных интервалов времени дали случайные результаты, значительно отличающиеся друг от друга. Также, в случае обнаружения квазипериодических компонент, периоды у ССП и *Кр* отличаются. Результаты анализа объединенных интервалов времени по отдельности и в совокупности показывают, что все полученные корреляционные связи имеют случайный характер. Но, если предположить значимость некоторых экстремумов взаимно корреляционной функции и влияние геомагнитной активности, но она вызывает небольшое понижение минимумов ССП при увеличении Кр, т.е. обратный наблюдаемому перед землетрясениями эффект. Поэтому аномалии ССП перед землетрясениями не связаны с геомагнитной активностью. Другой вывод, который можно сделать из выполненных оценок, это практическое отсутствие заметного влияния геомагнитной активности при Kp ≤ 6 на изменения ССП. Существенные изменения ССП, которые можно связать с геомагнитной активностью, наблюдались только после геомагнитной бури 18 марта 2015 г. с *Кр* = 9.

Рассмотрение ССП является существенно более информативным в плане связи с землетрясениями, чем СП для отдельных частотных полос, на основе которых оно строится. Схожие аномалии ССП обнаружились перед всеми землетрясениями, в то время как для СП поведение перед землетрясениями было различным. Очевидно, что для полноценного анализа СП требуется привлечение дополнительных данных об интенсивности грозовой активности и возможных колебаниях в усилении приемника, но это затенит основные результаты, связанные с аномалиями в поведении ССП. При рассмотрении ССП дополнительных данных не требуется, поскольку влияние параметров грозовых разрядов и усиления приемника в значительной степени компенсируется.



Рис. 9. Карта расположения Тайваньских землетрясений.

Необходимо отметить, что условия регистрации с применением использованного нами комплекса и в вышеупомянутых работах существенно отличаются. В отличие от регистрации в диапазоне частот 0.5-15 кГц [Муллаяров и др., 2011], мы анализируем результаты регистрации в диапазоне 12–40 кГц, и именно за счет расширения полосы приема из диапазона сверхдлинных волн в сторону верхних частот с захватом диапазона длинных волн удалось получить результаты при использовании ССП. Возможно, полезные результаты можно получить с использованием ССП и при приеме в диапазоне частот 0.5-15 кГц. Но на нашем комплексе расширение полосы в сторону низких частот невозможно ввиду размещения приемных станций на территории населенных пунктов. Имеется еще одно важное различие между нашим и другими комплексами. В работах [Муллаяров и др., 2011; Mullavarov et al., 2012] анализируется средняя амплитуда всех атмосфериков. В нашем же случае, хотя и СП атмосфериков является близкой к средней амплитуде характеристикой, вклад атмосфериков отличается. При приеме происходит ограничение сильных атмосфериков и при оценке СП увеличивается вклад атмосфериков средней амплитуды, т.е. состав анализируемых атмосфериков отличается. Соответственно отличаются и эффекты. Если в работе [Mullayarov et al., 2012] сообщается о существенном увеличении амплитуды атмосфериков за 12-14 дней до землетрясений, то в случае рассматриваемой здесь серии Японских землетрясений, за 14 и 11 дней до самого сильного землетрясения на рис. За, Зб наблюдается заметное понижение ночных значений СП. (Связь этого эффекта с землетрясениями возможна, но не очевидна). При этом в зависимости ССП аномалий нет, они проявляются раньше и позже. Следовательно, все рассматриваемые характеристики являются разными.

Поведение ССП перед местными землетрясениями рассмотрено в публикациях [Кабанов и Шарафутдинов, 2012 и 2013]. Там показаны аномалии в ССП для разных станций, полученные при анализе всех атмосфериков. Кроме того, имеются аномалии и в ССП верхних и нижних частот для одной станции, но они менее выражены. В данной работе использована идея из работ [Муллаяров и др., 2011; Mullayarov et al., 2012], заключающаяся в анализе только проходящих над зонами подготовки дальних сильных землетрясений атмосфериков. В результате перед данными землетрясениями обнаружены аномалии не в одном параметре (как амплитуда атмосфериков в работах [Муллаяров и др., 2011; Mullayarov et al., 2012]), а в нескольких $(2^{1}/_{2})$ параметрах зависимости ССП от времени. Связь с землетрясениями аномалий в поведении ССП более надежная. И, наконец, если в работе [Кабанов и Шарафутдинов, 2013] основные результаты получены при анализе разницы выборок зависимости СП от расстояния до эпицентра землетрясения, то новые результаты основываются на анализе разницы выборок зависимости СП от частоты. Сравнение единственно приведенного в работе [Кабанов и Шарафутдинов, 2013] случая аномалий в зависимости ССП для одной станции, но разных частотных полос, с описанными здесь аномалиями показывает, что аномалии ССП разные для близких и дальних землетрясений.

Что касается возможности заблаговременной идентификации комплекса аномалий ССП, как предвестников землетрясений, то предварительно можно дать положительный ответ для случаев серии землетрясений в Японии в апреле 2016 г. и в феврале 2016 г. на Тайване. Основанием для этого является явная необычность наблюдаемых аномалий.

5. ВЫВОДЫ

Регистрация в полосе частот 12–40 кГц и анализ вариаций спектральной плотности мощности атмосфериков на основе временной зависимости ССП для верхних и нижних частот и их многопараметрическое описание позволили получить более надежную идентификацию аномалий перед дальними землетрясениями, чем в случае использования одного параметра. Менее продуктивен и более трудоемкий отдельный анализ СП для разных частотных диапазонов; вариации СП разных диапазонов схожи и аномалии четко проявляются только при рассмотрении их разницы – ССП.

Обнаружены аномалии во временной зависимости ССП перед серией землетрясений на о-ве Кюсю, Япония. Эти аномалии выражаются в наблюдении слабо искаженной зависимости ССП, пониженных ее минимальных значений в дневное время с последующим возрастанием, к моменту начала серии землетрясений, и появлении выбросов значений ССП. Тенденция снижения значений ССП в дневное время начинает проявляться за 37-39 дней до первого землетрясения. Устойчивое снижение значений ССП в дневное время и существенное уменьшение искажений временной зависимости ССП начинают наблюдаться за 22 дня до землетрясения. За 3 дня до первого землетрясения происходит рост дневных значений ССП и возникновение выбросов ССП в дневное время. Самый высокий выброс ССП происходит перед самым сильным землетрясением 16 марта. Комплекс этих аномалий является предвестником серии землетрясений на о-ве Кюсю.

Данные аномалии частично наблюдаются и перед сильными землетрясениями на о-ве Тайвань. Аномалии возникают перед землетрясениями 1 ноября 2013 г., 14 февраля 2015 г., 20 апреля 2015 г. и 2–6 февраля 2016 г. Аномалии ССП наиболее ярко выражены перед парой землетрясений 2–6 февраля 2016 г.

Наблюдаемые аномалии складываются из вариаций минимального дневного уровня ССП и изменений величин выбросов в дневное время, существенная корреляция этих параметров свидетельствует об общности их природы.

Физической причиной возникновения аномалий является экранирование Юго-восточного Азиатского центра грозовой активности зоной ионосферных возмущений перед землетрясениями.

Аномалии не связаны с геомагнитной активностью. Перед землетрясениями наблюдается повышение минимальных дневных уровней ССП, а взаимно корреляционный анализ показывает возможность только обратного эффекта при магнитных возмущениях.

После самого сильного Японского землетрясения 15 апреля 2016 г. возникает интервал повышенных дневных значений ССП длительностью порядка 4 сут. Это повышение значений ССП является следствием произошедшего землетрясения — его-последействием.

Искажения временной зависимости ССП перед землетрясениями отличаются от наблюдаемых в обычное время. Это создает предпосылки для использования описанного метода в системе обнаружения предвестников землетрясений в реальном масштабе времени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

– Кабанов В.В. Результаты оперативного анализа аномалий электромагнитного поля в полосе 8–40 кГц в период подготовки произошедшего 20.01.2013 на юговостоке Якутии землетрясения с магнитудой 5.6 // Фундаментальные исследования. № 4 (часть 5). С. 1109–1113. 2013.

— Кабанов В.В., Хасанов И.М. Особенности амплитудных флуктуаций сигнала радиостанции с частотой 40 кГц в Магаданской области в сейсмоактивные периоды // Вестн. СВНЦ ДВО РАН. № 3. С. 55–62. 2016.

- Кабанов В.В., Шарафутдинов В.М. Аппаратурные комплексы региональной сети сейсмоэлектромагнитного мониторинга на северо-востоке России // Приборы и техника эксперимента. № 2. С. 152–153. 2007.

- Кабанов В.В., Шарафутдинов В.М. Соотношение спектральных плотностей естественных электромагнитных сигналов как объект для изучения возможности выделения сейсмоэлектромагнитных эффектов на Северо-Востоке России // Вестн. СВНЦ ДВО РАН. № 4. С. 16–22. 2012.

- Кабанов В.В., Шарафутдинов В.М. Вариации спектральной плотности мощности атмосфериков в полосе частот 8–40 кГц в период подготовки землетрясений // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 53. № 4. С. 567–574. 2013.

- Каталог импульсных электромагнитных предвестников землетрясений. Отв. ред. Зубков С.И. М.: ИФЗ АН СССР. 128 с. 1991.

— Мирский Г.Я. Аппаратурное определение характеристик случайных процессов. М.: Энергия. 458 с. 1972.

— Муллаяров В.А., Абзалетдинова Л.М., Аргунов В.В., Корсаков А.А. Вариации параметров грозовых электромагнитных сигналов на трассах, проходящих над областями землетрясений // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 51. № 6. С. 841–851. 2011.

- Шарафутдинов В.М., Кабанов В.В. Разработка и создание региональной сети электромагнитного мониторинга землетрясений в ОНЧ-диапазоне на Северо-Востоке России // Вестн. СВНЦ ДВО РАН. № 3. С. 10–16. 2007.

– Akhoondzadeh M. Anomalous TEC variations associated with the powerful Tohoku earthquake of 11 March 2011 // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. V. 12. P. 1453–1462. 2012. doi 10.5194/nhess-12-1453-2012

- *Dobrovolsky I. R., Zubkov S. I., Myachkin V. I.* Estimation of the size of earthquake preparation zones // Pure Appl. Geophys. V. 117. P. 1025–1044. 1979.

- Mullayarov V.A., Argunov V.V., Abzaletdinova L.M., Kozlov V.I. Ionospheric effects of earthquakes in Japan in March 2011 obtained from observations of lightning electromagnetic radio signals // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. V. 12. P. 3181–3190. 2012. doi 10.5194/nhess-12-3181-2012