УДК 550.343 + 550.388 + 537.874

РЕЗУЛЬТАТЫ ОПЕРАТИВНОГО АНАЛИЗА АНОМАЛИЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В ПОЛОСЕ 8-40 КГЦ В ПЕРИОД ПОДГОТОВКИ ПРОИЗОШЕДШЕГО 20.01.2013 НА ЮГО-ВОСТОКЕ ЯКУТИИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ С МАГНИТУДОЙ 5,6

Кабанов В.В.

ФГБУН «Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт им Н.А. Шило» Дальневосточного отделения Российской академии наук, Магадан, e-mail: vvk20062@yandex.ru

В результате выполненного с применением разработанной методики оценки соотношения спектральных плотностей атмосфериков оперативного анализа записей электромагнитного поля в полосе 8–40 кГц, сделанных в период 01-31.01.2013 г., обнаружены краткосрочные предвестники землетрясения с магнитудой 5,6, произошедшего 20.01.13 на юго-востоке Якутии на расстоянии 566 км от пункта наблюдения. За 2 дня до землетрясения обнаружено резкое увеличение минимальных дневных значений соотношения спектральных плотностей. За 4 дня до землетрясения наблюдается предвечерний подъем значений соотношения и интервалы дневных минимумов становятся существенно уже, чем в сейсмически спокойный период. Методика заложена в основу алгоритмов функционирования тестового варианта системы обнаружения предвестников землетрясений в реальном масштабе времени на базе двух регистрирующих станций, размещенных в пос. Стекольный и г. Магадан.

Ключевые слова: землетрясения, электромагнитные сигналы, станции сейсмоэлектромагнитного мониторинга, соотношения спектральных плотностей, предвестники

THE RESULTS OF OPERATIVE ANALYSIS OF THE ELECTROMAGNETIC FIELD ANOMALIES IN THE 8-40 KHZ FREQUENCY RANGE DURING PREPARATION OF THE EARTHQUAKE 20.01.2013 WITH MAGNITUDE 5.6 IN SOUTHEAST OF YAKUTIA

Kabanov V.V.

FGBUN «North-East Interdisciplinary Research Institute N.A. Shiloh», Russian Academy of Sciences, Magadan, e-mail: vvk20062@yandex.ru

As a result of the operative analysis of records of an electromagnetic field in the 8-40 kHz frequency range made during 01-31.01.2013, fulfilled with application of the developed technique of an estimation of the spectral density atmospherics ratio, the short-term precursors of earthquake 20.01.13 with magnetude 5,6, happened in southeast of Yakutia on distance of 566 km from the observation point were found. For 2 days before earthquake the sharp increase in the minimal day time values of the spectral densities ratio was observed. For 4 days before earthquake the before evening rise of the ratio values was observed and intervals of day time minima become essentially narrower, than during seismically quiet period. The technique is a basis of algorithms of functioning of a test variant of system of the earthquake precursors detection in real time on the basis of two registering stations lo-cated in the village Stekolniy and city Magadan.

Keywords: earthquakes, electromagnetic signals, seismoelectromagnetic monitoring stations, spectral density ratio, precursors

Исследования по поиску связанных с готовящимися землетрясениями аномалий в электромагнитном (ЭМ) поле были нами начаты еще в 90-х годах прошлого века [6], но они основывались на результатах наблюдений на одиночных станциях и методах обработки, аналогичных описанным в [3], чего, как показано далее, явно недостаточно. В целях совершенствования методов исследования в 2003 г. была развернута сеть станций сейсмоэлектромагнитного мониторинга (СЭМ) [5].

При анализе ЭМ данных, записанных на региональных СЭМ-станциях [1] во время подготовки на территории Магаданской области землетрясения с магнитудой (М) более 5, была разработана новая методика обнаружения предвестников землетрясений на основе оценки соотношения спектральных плотностей (ССП) дальних атмосфериков (дискретные сигналы от грозовых разрядов) для разных станций и в различных частотных полосах ОНЧ диапазона (8–40 кГц) [2]. Данная методика предусматривает сбор всех записанных ЭМ данных (~17 Гбайт в сутки для каждой станции) в центр обработки, их фильтрацию и оценку взаимной корреляции с целью выделения отдельных атмосфериков. Далее анализируются энергетические параметры выделенных атмосфериков и рассчитываются ССП [2]. Но данная методика непосредственно не применима при создании системы обнаружения предвестников землетрясений в реальном масштабе времени ввиду необходимости передачи огромного объема дан-

ных по каналам интернет. Поэтому методика была модифицирована с использованием предобработки ЭМ данных непосредственно на СЭМ-станциях.

Материалы и методы исследования

Целью исследования является подтверждение эффективности разработанных алгоритмов обнаружения ЭМ предвестников сильных землетрясений при больших расстояниях до ближайшей регистрирующей станции, чем в рассмотренных в [2] примерах обнаружения предвестников, а также оценки применимости новой методики для реализации в системе оповещения о готовящихся крупных землетрясениях и возможности влияния на ЭМ поле слабых землетрясений.

Новая методика основывается на применении взаимно корреляционного анализа с целью выделения атмосфериков, основываясь не на ЭМ данных с разных станций, а с использованием корреляции данных одиночной станции с образцом типичного атмосферика. Параметры выделенных атмосфериков передаются через интернет в центр обработки, где сравниваются моменты обнаружения дискретных сигналов на разных станциях и производится их отбраковка по критерию непревышения максимально возможной задержки прихода ЭМ сигналов на разные станции, исходя из расстояния между ними. По другим элементам алгоритма анализа модифицированная методика не отличается от предыдущей, описанной в [2]. На основе новой методики с 1.02.2013 г. запущен тестовый вариант системы обнаружения предвестников землетрясений в реальном масштабе времени на базе двух СЭМ-станций, размещенных в п. Стекольный и г. Магадан (центральный пункт), расстояние между станциями 56 км. Одновременно были доставлены в Магадан ранее записанные на СЭМ-станции «Стекольный» данные, которые были подвергнуты ретроспективному анализу на основе новых упрощенных алгоритмов обработки.

20.01.2013 г. в 22.49 LT (местное время, плюс 12 ч к мировому) произошло землетрясение на юго-востоке Якутии с $M = 5{,}6$. Для выявления возможных предвестников данного землетрясения и оценки их значимости были проанализированы записанные с 1.01.2013 г. ЭМ данные в режиме эмуляции используемой обработки в реальном масштабе времени. Согласно разработанным методам анализа [2], ССП оценивались для верхней и нижней полосы частот. Но, учитывая специфику помех на используемых станциях, диапазон верхней полосы был несколько уменьшен, энергетические параметры атмосфериков оценивались в полосе 35–40 кГц. Нижняя полоса осталась прежней – 12–20 кГц. Также дополнительно анализировались колебания уровня сигнала японской станции, работающей на частоте 40 кГц [7]. При оценке ССП результаты обработки 2-минутных реализаций передаются через интернет каждые 15 мин, а уровень сигнала на частоте 40 кГц определяется каждые 2 мин.

Анализировались зависимости ССП от времени для СЭМ-станции «Стекольный», поскольку на ней значительно меньше уровень промышленных помех. Рассматривались два вида зависимостей, полученных на основе усреднения энергетических параметров атмосфериков, обнаруженных одновременно на двух станциях, а также всех импульсных сигналов, присутствующих в записях станции «Стекольный».

Результаты исследования и их обсуждение

На рис. 1 приведена зависимость ССП от времени для января 2013 г., построенная с использованием только подтвержденных на двух станциях случаев обнаружения атмосфериков. В приведенной временной зависимости сразу выделяется двухдневный участок перед землетрясением, когда резко увеличились минимальные дневные значения ССП. Аналогичное первому дню понижения ССП минимальное значение за месяц наблюдается только 27.01, но переход к нему более плавный и минимум на следующий день возвращается к среднестационарному значению. Поэтому аномалия в ЭМ поле, обнаруженная перед землетрясением на приведенном интервале времени, представляется достаточно значимой. Рассмотрим эту аномалию более подробно. На рис. 2 приведены подробные зависимости ССП для временного интервала с 16 по 21 января, включающего момент землетрясения. Рис. 2,а соответствует способу обработки, с помощью которого получена зависимость, приведенная на рис. 1, а для получения зависимости на рис. 2,б применялся анализ энергетических параметров всех импульсных сигналов, зарегистрированных на СЭМ-станции «Стекольный» в приведенный интервал времени (также использовано большее сглаживание с целью подчеркнуть наличие дополнительных эффектов). По существу это означает, что зависимости на рис. 2,б соответствуют случаю использования автономного анализа на одной станции. Но можно сразу же отметить, что в регистрируемом сигнале не должны присутствовать импульсные помехи, похожие на атмосферики.

Из рис. 2 следует, что отмеченное повышение дневных минимумов ССП не является единственным признаком готовящегося землетрясения. В период 17–18 января на рис. 2,а наблюдается предвечерний подъем значений ССП и, хотя дневные минимумы остаются достаточно глубокими, но сужаются. А на рис. 2,б на месте всех подъемов, что видны на рис. 2,а, наблюдаются уже выбросы значений ССП. Аномалии на рис. 2,б более значительные, чем на рис. 2,а, и, кажется, что анализ всех импульсных сигналов предпочтительнее, чем только подтвержденных на двух станциях атмосфериков. Но 04-08.02.2013 г. на СЭМ-станции «Стекольный» предположительно присутствовала помеха, и зависимость, получаемая при анализе всех сигналов, напоминала рис. 2,б, отличаясь еще большей изрезанностью. При этом на зависимости ССП, построенной на основе только ото-

бранных атмосфериков, никаких значимых аномалий не было. Таким образом, анализ всех сигналов можно использовать только совместно с анализом подтвержденных на двух станциях атмосфериков. Необходимо отметить наблюдаемое на рис. 2,а постепенное удаление от полуночи времени перехода значений ССП из низких дневных к высоким ночным при приближении к моменту землетрясения (обычно переход происходит в ~22 ч). Этот эффект в какой-то степени схож с явлением из [2], где описывается однократное смещение времени перехода перед землетрясением с энергетическим классом K~11. Также необходимо подчеркнуть, что для рассмотренного землетрясения расстояние до ближайшей станции составляет 566 км, в то время как для случаев землетрясений, рассмотренных в [2], эта величина не более 370 км.

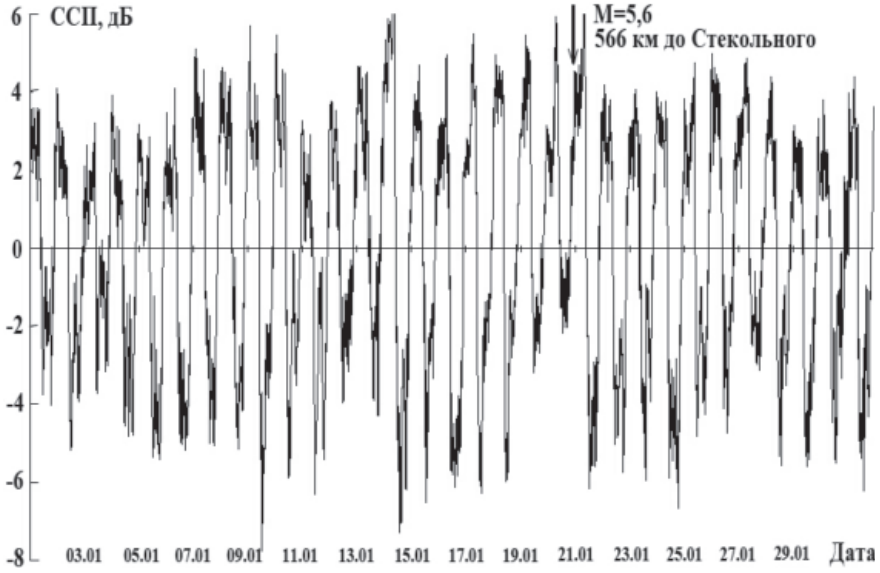

Рис. 1. Зависимость от времени ССП атмосфериков в полосах 35–40 и 12–20 кГц для СЭМ-станции «Стекольный» в период 01.01–31.01.2013 г., стрелкой показан момент землетрясения

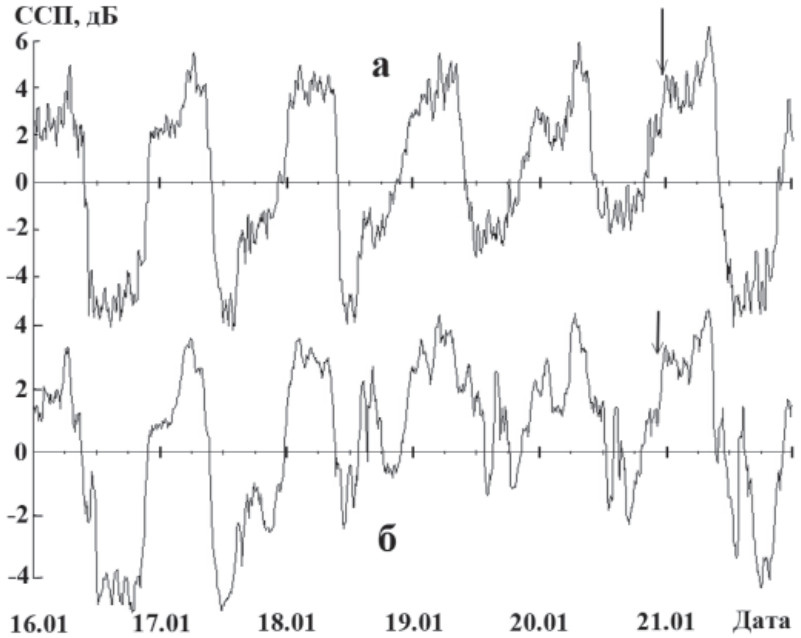

Рис. 2. Зависимость от времени ССП в полосах 35–40 и 12–20 кГц для СЭМ-станции «Стекольный» в период 16.01–21.01.2013 г., отобранных по данным двух станций атмосфериков (а) и всех подобных атмосферикам импульсных сигналов (б). Стрелкой показан момент землетрясения

На рис. 3 приведена зависимость от времени сигнала японской станции с частотой 40 кГц, зарегистрированного на СЭМ-станции «Магадан».

Единственной особенностью зависимости на рис. 3, привлекающей внимание, является повышенный уровень сигнала в дневное время в период 10-12.01.13. Причем после этого значения минимумов понизились относительно предыдущего периода. Насколько это связано с сейсмической активностью, в настоящее время уверенно сказать нельзя, требуется длительное накопление данных. Но следует отметить, что 9-10.01.13 было обнаружено достаточно длительное превышение на более чем 2 дБ уровня сигнала с частотой 40 кГц на станции «Стекольный» относительно станции «Магадан» в области локальных дневных максимумов. 16-17.01.13 присутствует обратный эффект, хотя и менее заметный. Уровни принимаемых на частоте 40 кГц сигналов на двух станциях достаточно близки, хотя отличия указанного уровня временами наблюдаются. Иногда они связаны с локальными помехами. Но группировка перечисленных небольших аномалий позволяет предположить, что некоторое ионосферное возмущение, влияющее на распространение сигнала, в данный период все же наблюдалось. На врезке приведен участок записи с большей временной детализацией. В зависимости имеется ночной максимум, ограниченный минимумами, связанными с моментами прохода терминатора (граница ночной и освещенной частей земной поверхности) над приемной станцией. Также имеется еще один утренний минимум, который можно связать с проходом терминатора над передающей станцией. Выбор интервала, подвергнутого детализации, связан с произошедшим 16.01.13 в 01.37 LT слабым землетрясением $K = 9{,}8$ между г. Магадан и пос. Стекольный с некоторым смещением к западу. На врезке перед землетрясением наблюдается пилообразное возмущение уровня сигнала, несколько отличающееся от похожих, как показывает детальный визуальный просмотр имеющихся данных. Отмеченные небольшие аномалии и близость землетрясения к станциям не позволяет с полной уверенностью отвергнуть возможность наличия вклада данного землетрясения в комплекс наблюдаемых аномалий. Исследования на основе наблюдений за прохождением через ионосферу сигналов со спутников системы GPS свидетельствуют о наличии предвестников при $M \geq 5$ и есть только одно сообщение об обнаружении аномалий при $K = 11$ [4]. В результатах традиционных наземных исследований [3, 6] встречаются сведения об аномалиях при землетрясениях с низким энергетическим классом, но выводы основываются на наблюдениях за интегральной интенсивностью ЭМ поля или интенсивностью потока импульсных сигналов. Анализ данных, зарегистрированных на СЭМ-станциях в режиме непрерывного периодического сохранения двухминутных реализаций [2], показал, что необычные колебания интегральной интенсивности потока атмосфериков и СП, иногда наблюдаемые перед землетрясениями, с большой вероятностью встречаются и в совершенно сейсмически спокойный период, это и обусловило переход к оценке ССП.

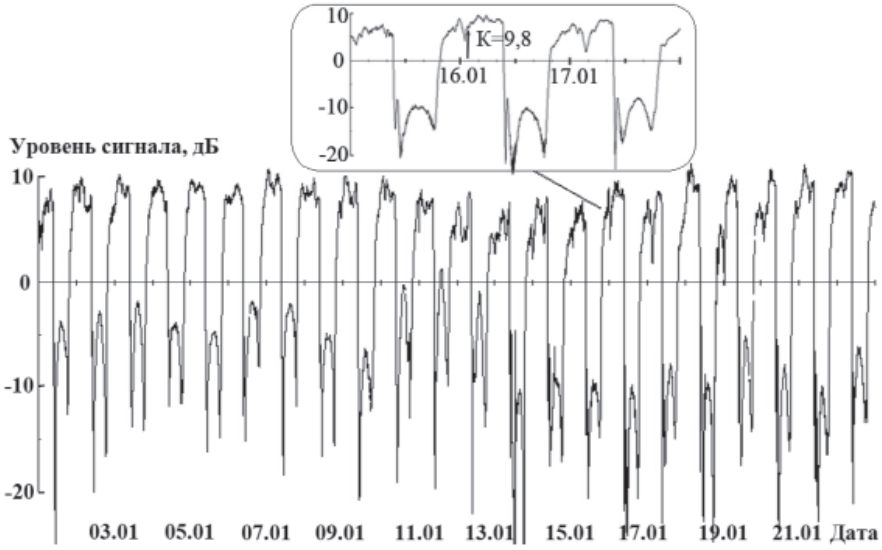

Рис. 3. Зависимость от времени уровня сигнала японской станции с частотой 40 кГц для СЭМ-станции «Магадан» в период 01.01–23.01.2013 г. На врезке – более детализированный участок 15–17.01, стрелкой показан момент слабого землетрясения

Следует также отметить, что январь 2013 г. характеризуется небольшой магнитной активностью, 18.01.13 наблюдается кратковременный всплеск значения индекса активности до 5 и суточное повышение индекса до 4 26-27.01.13, что позволяет предположить отсутствие влияния данного фактора на обнаруженные ЭМ аномалии.

Выводы

В результате выполненного оперативного анализа обнаружены аномалии ЭМ поля перед землетрясением, произошедшим на расстоянии 566 км от пункта наблюдения. Это подтверждает эффективность метода на основе вычисления ССП при поиске ЭМ предвестников землетрясений. Обнаружение краткосрочных предвестников землетрясений имеет практическое значение только при работе в реальном времени. Полученные результаты использования модифицированной методики ССП для землетрясения 20.01.2013 г. ($M = 5{,}6$) создают реальные предпосылки разработки системы обнаружения и использования электромагнитных предвестников для оповещения о готовящихся крупных землетрясениях.

Список литературы

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

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

3. Каталог импульсных электромагнитных предвестников землетрясений / отв. ред. С.И. Зубков. – М.: ИФЗ АН СССР, 1991. – 128 с.

4. Смирнов В.М. Интерпретация ионосферных возмущений в период слабых землетрясений // Исследовано в России. – 2003. – № 012. – С. 121–129. – http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2003/012.pdf.

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

6. Belashov V.Yu., Kabanov V.V. The Results of Analysis of Complex Radiophysical Experiments in the Periods of Seismic Activity at Russian North East. Atmospheric and Ionospheric Electromagnetic Phenomena Associated with Earthquakes / Ed. M. Hayakawa. TERRAPUB. – Tokyo, 1999. – P. 501–511.

7. Hayakawa M. Probing the lower ionospheric perturbations associated with earthquakes by means of subionospheric VLF/LF propagation // Earthq Sci. – 2011. – № 24. – P. 609–637.

References

1. Kabanov V.V., Sharafutdinov V.M. Apparaturnye kompleksy regional'noj seti sejsmojelektro-magnitnogo monitoringa na severo-vostoke Rossii // Pribory i tehnika jeksperimenta. 2007. no. 2. pp. 152–153.

2. Kabanov V.V., Sharafutdinov V.M. Sootnoshenie spektral'nyh plotnostej estest-vennyh jelek-tromagnitnyh signalov kak ob#ekt dlja izuchenija vozmozhnosti vydelenija sejs-mojelektromagnitnyh jeffektov na Severo-Vostoke Rossii // Vestnik SVNC DVO RAN. 2012. no. 4. pp. 16–22.

3. Katalog impul'snyh jelektromagnitnyh predvestnikov zemletrjasenij / otv. red. S.I. Zubkov. M.: IFZ AN SSSR, 1991. 128 p.

4. Smirnov V.M. Interpretacija ionosfernyh vozmushhenij v period slabyh zemletrja-senij // Jelek-tronnyj zhurnal Issledovano v Rossii, 012, pp. 121–129, 2003. http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2003/012.pdf.

5. Sharafutdinov V.M., Kabanov V.V. Razrabotka i sozdanie regional'noj seti jelek-tromagnitnogo monitoringa zemletrjasenij v ONCh-diapazone na Severo-Vostoke Rossii // Vestnik SVNC DVO RAN. 2007. no. 3. pp. 10–16.

6. Belashov V.Yu., Kabanov V.V. The Results of Analysis of Complex Radiophysical Experiments in the Periods of Seismic Activity at Russian North East. Atmospheric and Ionospheric Electromagnetic Phenomena Associated with Earthquakes/ Ed. M.Hayakawa. TERRAPUB, Tokyo, 1999, pp. 501–511.

7. Hayakawa M. Probing the lower ionospheric perturbations associated with earthquakes by means of subionospheric VLF/LF propagation // Earthq Sci. 2011. 24. pp. 609–637.

Рецензенты:

Белашов В.Ю., д.ф.-м.н., профессор кафедры радиофизики Института физики Казанского (Приволжского) федерального университета, г. Казань;

Борходоев В.Я., д.т.н., доцент по кафедре физики; профессор кафедры физики СВГУ, заведующий лабораторией рентгеноспектрального анализа СВКНИИ ДВО РАН; ФГБУН «Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт им. Н.А. Шило» Дальневосточного отделения Российской академии наук, г. Магадан.

Работа поступила в редакцию 12.03.2013.