

## ДИАГНОСТИКА ЛИТОСФЕРНО-ИОНОСФЕРНЫХ СВЯЗЕЙ ПО НАБЛЮДЕНИЯМ ВАРИАЦИЙ АМПЛИТУДЫ ГРОЗОВЫХ СИГНАЛОВ

В.А. Муллаяров, В.В. Аргунов

### DIAGNOSTICS OF LITHOSPHERE-IONOSPHERE RELATIONS FROM OBSERVATIONS OF THUNDERSTORM SIGNALS

V.A. Mullayarov, V.V. Argunov

Для дистанционного мониторинга возмущений в нижней ионосфере часто используют сигналы низкочастотных радиостанций. В частности, метод используется для исследования ионосферных откликов, обусловленных сейсмической активностью. В качестве варианта данного метода для обнаружения сейсмических возмущений в ионосфере можно использовать естественные радиосигналы – электромагнитное излучение грозовых разрядов (атмосферики). По результатам предварительных наблюдений атмосфериков в Якутске ( $\varphi=62.1^\circ \text{ N}$ ,  $\lambda=129.7^\circ \text{ E}$ ) землетрясения, магнитуда которых больше 5, а глубина не превышает 50 км, проявляются в виде усиления среднечасовой амплитуды атмосфериков в день события или в интервале 3 дней после него. Вариации амплитуды в предшествующие землетрясению дни, выраженные в виде роста амплитуды, рассматриваются в качестве предвестников.

For distant monitoring of disturbances in the lower ionosphere signals of low-frequency radio stations are often used. In particular, the method is used for investigation of ionospheric responses (disturbances) caused by seismic activity. As a variant of this method for the detection of seismic disturbances in the ionosphere one can use natural radio signals - an electromagnetic radiation of thunderstorm discharges (atmospherics). The examples of the effects of three earthquakes in the variations of average amplitude of atmospheric received in Yakutsk ( $\varphi=62.1^\circ \text{ N}$ ,  $\lambda=129.7^\circ \text{ E}$ ) were considered. The increase of signal amplitude for some days before the events can be considered as a precursor. It allows to used observations of impulse electromagnetic thunderstorm signals as one of possible means of distant monitoring of strong earthquakes.

Поиск предвестников землетрясений ведется по многим направлениям. На сегодняшний день представлено немало работ, описывающих литосферно-ионосферную связь (см. список литературы в [Гохберг М.Б. и др., 1985]). Многие в своих исследованиях используют спутниковые данные [Бондур В.Г., Смирнов В.М., 2005]. Также для дистанционного мониторинга за возмущениями нижней ионосферы, обусловленных воздействием сейсмических процессов, используют сигналы низкочастотных (СДВ) радиостанций. Изменение профиля электронной концентрации и высоты нижней ионосферы должно проявляться в вариациях амплитуды и фазы сигналов, распространяющихся через области над эпицентрами землетрясений. В достаточно большом количестве работ показано, что вариации фазы сигналов низкочастотных радиопередатчиков, наблюдаемых за несколько дней до землетрясений, могут быть использованы в качестве предвестников литосферных возмущений [Molchanov O.A., Hayakawa M., 1998; Gokhberg M.B. et al., 1989]. Преимущество использования данных сигналов заключается в том, что сигналы СДВ радиостанций контролируются, это позволяет рассчитывать амплитудно-фазовые вариации и по ним восстанавливать параметры возмущений в нижней ионосфере. Однако не всегда удается подобрать нужную радиотрассу распространения сигналов.

Нами в качестве модификации метода предлагается мониторинг сейсмических возмущений в нижней ионосфере по естественным радиоизлучениям – по электромагнитным сигналам грозовых разрядов (атмосферикам) [Mullayarov V.A. et al., 2007]. Метод позволяет вести азимутальное сканирование областей возмущений из одного приемного пункта. Эффекты землетрясений и их предвестников проявляются в виде возрастания средней амплитуды атмосфериков. При анализе данных для более уверенно-

го выделения предвестников выбираются временные интервалы не менее чем через 10 дней после возмущения (землетрясений) на выбранном азимутальном направлении.

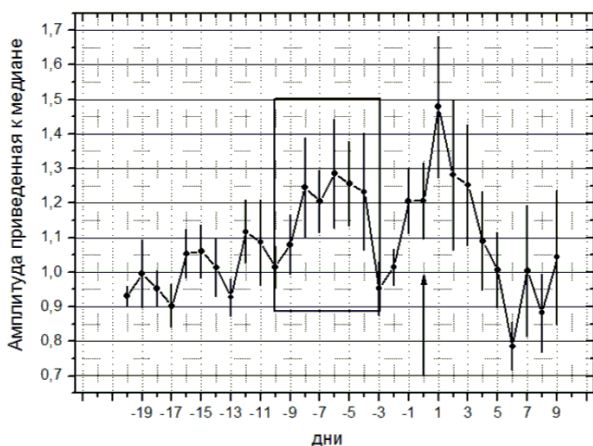
Прием сигналов атмосфериков осуществляется в Якутске ( $\varphi=62.02^\circ \text{ N}$ ,  $\lambda=129.71^\circ \text{ E}$ ) с помощью одно-пунктового грозопеленгатора-дальномера, характеристики которого корректируются применительно к регистрации дальних атмосфериков. Прием осуществляется на три антенны: электрическую (штырь) и две ортогональные магнитные антенны (рамки с эффективной площадью  $180 \text{ м}^2$ ). В зимнее время максимальная дальность до источников принимаемых сигналов (определяемая возможностью выделения из помеховых сигналов) составляет около 12 000 км. Однако дальность до эпицентра литосферных возмущений, уверенно выявляемых через возмущения нижней ионосферы на трассе распространения атмосфериков, как ранее показали наши исследования [Mullayarov V.A. et al., 2007], ограничена значениями 3500–4000 км. На расстояниях свыше 4000 км количество вариаций в амплитуде атмосфериков увеличивается. Анализ проявлений землетрясений в сигналах атмосфериков обычно проводится для ночных условий, когда затухание в волноводе «земля-ионосфера» наименьшее. В то же время, учитывая интерференцию мод сигналов в ночные часы, усложняющую характер вариаций амплитуды, дополнительно рассматриваются и дневные вариации амплитуды, определяемой в дневные часы. Однако в дневное время количество регистрируемых атмосфериков за счет затухания в волноводе значительно сокращается по сравнению с ночными условиями и, соответственно, возрастают ошибки определения усредненных значений амплитуды.

Основной анализируемый параметр – это средняя за час амплитуда атмосфериков, принимаемых в Якутске с определенных направлений. Методика

определения средней амплитуды заключается в следующем. Как известно, изменений в амплитуде сигналов следует ожидать, если область возмущений на трассе их распространения будет располагаться в эллипсоидах первых зон Френеля. Поэтому для анализа отбираются те атмосферерики, трассы которых находятся в пределах указанных зон, центрированных по азимуту на эпицентр землетрясения. Рассчитывается средняя амплитуда для атмосферерики, чьи источники сигналов – грозовые разряды, располагаются за эпицентром. При этом источники приводятся к одному расстоянию (расстояние до эпицентра), принимая в первом приближении обратно пропорциональную зависимость амплитуды от расстояния.

На рисунке представлены вариации амплитуды, приведенной к медианным значениям, полученные методом наложения эпох для 17 землетрясений, магнитуда которых была больше 5, а глубина не превышала 50 км. За нулевой день был принят день литосферного возмущения. Методика получения амплитудных вариаций заключается в следующем. Отдельно для каждого землетрясения был получен ход амплитуды грозовых сигналов, проходящих над эпицентром данного литосферного возмущения, для интервала –20, +10 дней от события. Далее мы привели амплитуду каждого дня к медианному значению, которое было найдено для рассматриваемого периода за исключением дней эффектов землетрясений и их предвестников. Полученные вариации значений амплитуды приведенной к медиане для каждого землетрясения, объединили методом наложения эпох.

Из рисунка видно, что после землетрясений наблюдается повышение значений амплитуды, приведенной к медиане, которое можно отнести к эффектам данных литосферных событий. Квадратом отмечено возрастание средней амплитуды, которое рассматривается в качестве предвестника грядущего землетрясения. При этом надо принять во внимание, что в каждом отдельном событии возрастание происходит, как правило, в течение одного дня в интервале 4–10 дней до события, что приводит к «расплыванию» предвестника в методе наложения эпох.



Вариации значений амплитуды приведенной к медиане полученные методом наложения эпох для 17 землетрясений.

Также на рисунке показана среднеквадратичная ошибка среднего (вертикальные линии). Видно, что есть возможность выделять как эффекты, так и предвестники литосферных возмущений в амплитуде сигналов грозовых разрядов.

Таким образом, по результатам анализа установлено, что возмущения в нижней ионосфере, обусловленные литосферными процессами, могут проявляться в вариациях амплитуды грозовых сигналов, распространяющихся над эпицентрами землетрясений. Усиление амплитуды сигналов, происходящее за несколько дней до событий, может рассматриваться в качестве предвестника. Это позволяет привлечь наблюдения импульсных электромагнитных грозовых сигналов в качестве одного из возможных средств дистанционного мониторинга сильных землетрясений.

Работа поддержана РФФИ, проекты № 14-05-31056 мол\_а, 15-45-05005 р\_восток\_а, 15-45-05135 р\_восток\_а, а также грантом «Научно-образовательный фонд поддержки молодых ученых Республики Саха (Якутия)» № 2014-01-0006.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бондур В.Г., Смирнов В.М. Метод мониторинга сейсмоопасных территорий по ионосферным вариациям, регистрируемым спутниковыми навигационными системами // Доклады Академии наук. 2005. Т. 402, № 5. С. 675–679.
- Гохберг М.Б., Моргунов В.А., Герасимович Е.А., Матвеев И.В. Оперативные электромагнитные предвестники землетрясений. М.: Наука, 1985. 116 с.
- Gokhberg M.B., Gufeld I.L., Rozhnoi A.A., et al. Study of seismic influence on the ionosphere by superlong wave probing of the Earth-ionosphere waveguide // Phys. Earth Planet. Inter. 1989. V. 57. P. 64–67.
- Molchanov O.A., Hayakawa M. Subionospheric VLF signal perturbations possibly related to earthquakes // J. Geophys. Res. 1998. V. 103. P. 17489–17504.
- Mullayarov V.A., Karimov R.R., Kozlov V.I. Variations in thunderstorm VLF emissions propagating over the epicenters of earthquakes // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2007. V. 69/13. P. 1513–1523. doi: 10.1016/j.jastp.2007.06.001.

Институт космических исследований и аэронавтики им. Ю.Г. Шафара СО РАН, Якутск, Россия