Литература

1.Мороз Ю.Ф., Лагута Н.А., Мороз Т.А. Магнитотеллурическое зондирование Камчатки // Физика Земли. 2008. № 2. С. 1 – 13.

2.Мороз Ю.Ф., Мороз Т.А. Исследование динамики геоэлектрической среды по данным электротеллурического поля // Вулканология и сейсмология. 2009. № 1. С. 39 – 48.

3.Резниченко Ю.В. Размеры очага корового землетрясения и сейсмический момент // Исследования по физике землетрясений. М.: Наука. 1976. С. 9 – 27.

4.Corwin R.F. and H.F. Morrison, 1977, Self-potential variations preceding earthquakes in central California,Geophys Res.Lett., 4, 171 – 174.

5.Mizutani H., T. Ishido, Yokokura and S. Ohnishi, 1976, Elektrokinetic phenomena associated with earthquakes, Geophys. Res. Lett, 3, 365 – 368.

6.Myachkin V.I., G.A. Sobolev, N.A. Dolbikina, V.N. Morozow and V.B. Preobrazensky, 1972.The study of variations in geophysical fields near focal zones of Kamchatka, Tectonophys., 14, 287 – 293.

7.Noritomi K., 1978, Application of precursory geoelectric and geomagnetic phenomena to earthquake prediction in China, Report by Japanese Seismological Society Delegation to the People's Republic of China, Seism. Soc. Japan., 57 – 87 (in Japanese; for English translation , see Chinese Geophys., 1, No, 2, 377 – 391, Amer. Geophys, Union).

РАДИОПРОСВЕЧИВАНИЕ ОБЛАСТЕЙ НАД ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМИ С ПОМОЩЬЮ ГРОЗОВЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СИГНАЛОВ
REMOTE SOUNDING OF AREAS ABOVE EARTHQUAKES BY MEANS OF THUNDERSTORM ELECTROMAGNETIC SIGNALS

В.А. Муллаяров, В.В. Аргунов, Л.М. Абзалетдинова
Институт космофизических исследований и аэрономии им. Ю.Г. Шафера СО РАН,
г. Якутск, e-mail: mullayarov@ikfia.ysn.ru

The opportunity of using of electromagnetic signals of lightning discharges (atmospherics), registered in Yakutsk, for remote monitoring of seismic activity is considered. Variations of atmospherics' amplitude, propagating in a ground-ionosphere waveguide above areas of earthquake epicenters, reflect changes of electron's concentration in the bottom ionosphere, occuring under influence of litospheric processes. Effects are displayed from strong not deep earthquakes. In day of earthquake and after them the increase of atmospherics' amplitude is observed, and in a previous days the variations expressed in strengthening with subsequent, accordingly, falling of amplitude for some days before event are possible.

Testing of an available database of atmospherics by means of simple algorithm of detection potentially seismic-activity periods, based on the specified sequence of amplitude variations, has shown that the probability of revealing of such periods can be 65-70 %. Azimuthal measurements testify that the sizes of the disturbed area in the bottom ionosphere can reach the sizes of 5th Fresnel zones (frequency of a signal 10 kHz) in day of earthquake and the sizes of 1-2 zones in previous days.

Поиск предвестников землетрясений ведется во многих процессах и явлениях, в том числе и в электромагнитных сигналах. В настоящей работе рассмотрены проявления литосферных процессов в естественных ОНЧ радиоизлучениях грозовой природы (в вариациях амплитуды атмосфериков). Хотя грозовые источники электромагнитных сигналов являются в значительной степени нестационарными, достаточно большой поток атмосфериков позволяет надеяться на их использование для радиопросвечивания сейсмоактивных областей.

В соответствии с результатами [1], в вариациях амплитуды атмосфериков, проходящих над эпицентрами землетрясений, следует ожидать эффекты от неглубокофокусных землетрясений с магнитудой более 4,0. Эффекты землетрясений и их предвестников проявляются в виде усиления амплитуды. Для более детального рассмотрения эффектов здесь выбраны трассы прохождения сигналов над двумя "геодинамическими полигонами": п-ов Камчатка и Японские о-ва. Поскольку наблюдения дальних атмосфериков проводятся не на регулярной основе, то с учетом фактической работоспособности приемной аппаратуры, для анализа проявлений землетрясений на Японских островах удалось отобрать только 6 событий (характеристики землетрясений взяты из каталога: neic.usgs.gov/neis/eglists/significant.html).

Для анализа основных особенностей эффектов в амплитуде сигналов атмосфериков рассмотрим два конкретных события землетрясений. Первое событие 02.12.05 произошло вблизи Японских островов. Магнитуда землетрясения составляла 6.5, глубина 29 км. Азимут на эпицентр землетрясения составлял 156,5º, а дальность - 2795 км. Данное событие по характеру проявления в сигналах атмосфериков отличается тем, что эффекта собственно землетрясения в вариациях амплитуды атмосфериков не наблюдалось (рис. 1*а*). В то же время, за 6-8 дней до события зарегистрировано хорошо выраженное повышение уровня сигналов (в два раза) в

околополуночные часы, которое в соответствии с результатами [1] может рассматриваться как предвестник землетрясения.

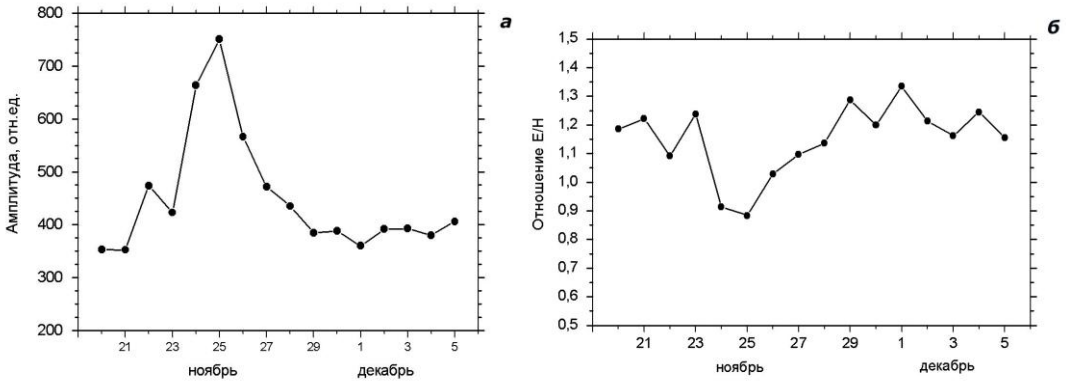

Рис. 1.

в которое здесь будет рассматриваться как "типовое", произошло в Японии (41,89 N; 143,75 E) 11.09.08. Магнитуда составляла 6.8, глубина - 25 км. Азимут на эпицентр землетрясения составлял 151°, а дальность - 2430 км. Как 02.12.05, так и 11.09.08 землетрясения произошли в сейсмоактивной зоне на относительно близком расстоянии до пункта регистрации.

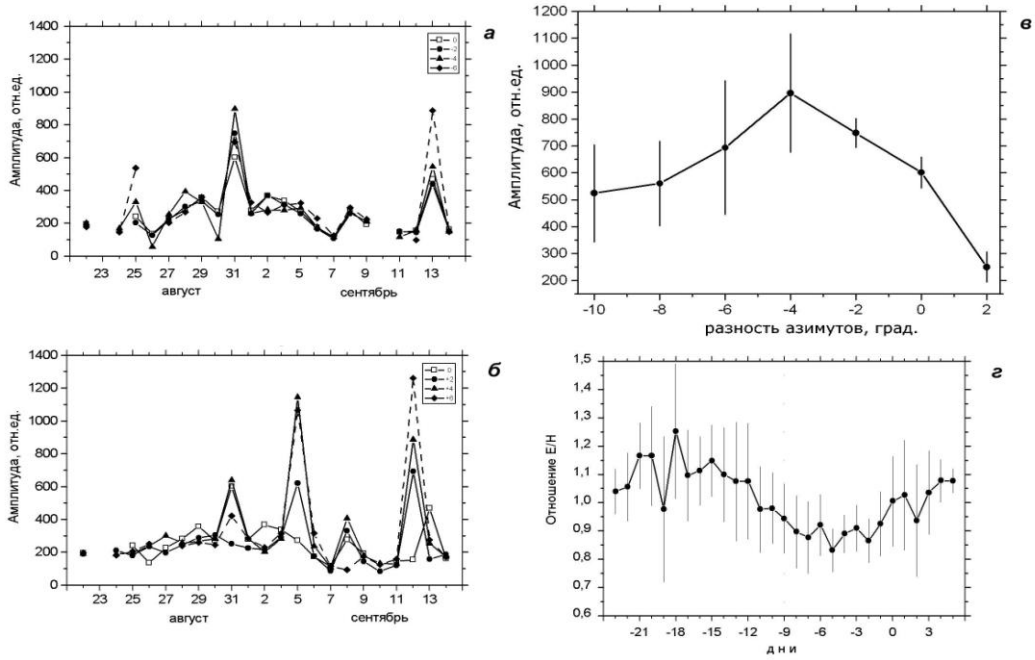

Рис. 2.

Вариации средней амплитуды ночных атмосфериков (00-01 LT) показывают хорошо выраженный эффект землетрясения, последовавший на следующий день после события, - пик амплитуды в 4 раза более высокий, чем в предшествующие 3 дня. Такое же возрастание амплитуды, наблюдавшееся 05.09.08, можно рассматривать как предвестник землетрясения. Оба эффекта проявились в первой зоне Френеля. На рис. 2*а,б* приведены соответствующие вариации амплитуды атмосфериков, принимаемых в этот же часовой интервал с меньших и больших азимутов (через 2 градуса). Видно, что эффекты имели "тонкую" структуру. Из рис. 2*а,б* следует, что фактически зарегистрировано 2 предвестника: 31.08.08 и 05.09.08. При этом первый предвестник, который дал максимальный эффект восточнее на 4° относительно направления на эпицентр (см. рис. 2*в*), был достаточно широкий по азимуту (10°), в то время как второй (05.09.08) был более узким с максимумом на 4° западнее. Эффект собственно землетрясения оказался "размазан" по времени и пространству : 12.09.08 (на следующий день после события) максимум возмущения амплитуды атмосфериков зарегистрирован на азимутальном направлении +6°

относительно направления на эпицентр (западнее, без захвата эпицентра), а на следующий день (13.09.08) в эти же часы эффект наблюдался уже в направлении на эпицентр и восточнее его.

Результаты показывают, что в вариациях амплитуды электромагнитных сигналах грозовых разрядов - атмосфериков, распространяющихся над эпицентрами землетрясений, возможно проявление как собственно землетрясений, так и процессов, предшествующих землетрясениям (предвестников). Повышение амплитуды атмосфериков, проходящих над эпицентром землетрясения, предполагает, что литосферные процессы приводят к изменению профиля электронной концентрации в нижней ионосфере. Обычно рассматривается повышение концентрации электронов, что может трактоваться как повышение коэффициента отражения волн. Если рассматривать трассы средней протяженности (2000-5000 км) с небольшим числом отражений волн от ионосферы, то с учетом граничных условий можно ожидать, что литосферные процессы в период подготовки землетрясения должны проявляться не только в вариациях амплитуды атмосфериков, но и в изменении отношения Ев/Нτ, где Ев - вертикальная составляющая электрического поля (регистрируется в эксперименте), Нτ - тангенциальная (горизонтальная) составляющая магнитного поля волны, принимаемая двумя скрещенными рамочными антеннами. Действительно, исходя из известного условия: $Ев/Eτ = \sqrt{\varepsilon'}$, где ε' - комплексная относительная диэлектрическая проницаемость, зависящая от проводимости среды σ (от плотности электронов), при изменении концентрации электронов (в период "предвестника") на расстояниях порядка одного "скачка" волны (одного отражения от ионосферы) можно ожидать изменения отношения Ев/Eτ и, соответственно, отношения принимаемых компонент поля атмосфериков Ев/Нτ. Для проверки такой возможности при анализе вариаций сигналов производился расчет данного отношения Ев/Нτ.

На рис. 1*б* были приведены вариации отношения Ев/Нτ в событии землетрясения 02.12.05. За 7-8 дней до землетрясения (одновременно с предвестником, рис. 1*а*) наблюдается падение значения данного отношения, после чего наблюдается, соответственно, возрастание Ев/Нτ. Такое поведение отношения наблюдается в большинстве рассмотренных событий землетрясений (см. рис. 3*г*, на котором приведен средний ход данного отношения для 9 землетрясений, полученный методом наложения эпох, в качестве нулевого дня рассматривается день землетрясения). Падение отношения Ев/Нτ за 3-8 дней до землетрясения значимо с вероятностью 95%.

Таким образом, за несколько дней до землетрясения наблюдается два взаимосвязанных процесса в параметрах электромагнитных сигналов грозовых разрядов, проходящих над областью эпицентра землетрясения: возрастание средней амплитуды и падение отношения компонент сигнала Ев/Нτ. Можно предложить сценарий возмущения в нижней ионосфере, которому могут удовлетворять оба, вроде бы противоречащих друг другу, процесса. Для этого следует допустить, что литосферные процессы предвестника землетрясения проявляются, в основном, в разогреве нижней ионосфере и, как следствие, в понижении, наоборот, электронной концентрации в нижней части Е области ионосферы. В этом случае уменьшение отношения Ев/Нτ объясняется уменьшением проводимости плазмы (комплексной диэлектрической проницаемости), а повышение средней амплитуды атмосфериков - уменьшением степени затухания волн в нижней части ионосферы, когда они распространяются в ионосфере до "точки отражения" и обратно (см., например, [2]). Подобная ситуация рассмотрена в работе [3] применительно к сигналам СДВ радиостанций, в которых наблюдаются амплитудно-фазовые возмущения, обусловленные воздействием грозовых разрядов на ионосферу. В [3] модельными расчетами показано, что воздействие на ионосферу в виде последовательности электромагнитных грозовых импульсов может привести к ослаблению электронной концентрации на высотах около 90 км и, как следствие, к уменьшению затухания волн в нижней ионосфере - к возрастанию амплитуды сигнала радиостанции. Однако интерференционная картина поля вдоль земной поверхности (интерференция нескольких мод волн) [3], также может повлиять на эффекты землетрясений. Именно этим, по-видимому, объясняется отсутствие эффекта землетрясения в событии 02.12.05, в то время, как эффект предвестника выражен четко (рис. 1*а*).

Рассмотренные предвестники землетрясений в амплитудных вариациях атмосфериков можно попытаться использовать как один из способов краткосрочного прогнозирования землетрясений. Для проверки такой возможности проведен тестовый анализ имеющегося массива данных по атмосферикам, проходящих над одним из сейсмоактивных регионов - над Камчатским полуостровом. Использованы результаты регистрации дальних атмосфериков в зимние сезоны 2004-2006 гг. Так как размеры области проявления предвестника, соответствующие первой зоне Френеля над Камчаткой для атмосфериков, возникающих на дальностях до 6000 км от приемника

в Якутске, могут составлять порядка 300 км, то для тестового анализа достаточно было задать 1-2 виртуального эпицентра. В качестве виртуального эпицентра была выбрана точка с координатами 55° N, 160° E ("середина" полуострова, азимут в Якутске на данную точку относительно северного направления - 100°, дальность - 1900 км).

Простейший алгоритм выработки возможного "алерта" заключался в следующем. В выбранный часовой интервал суток (около полуночи) день ото дня рассчитывались среднеквадратичные вариации амплитуды атмосфериков и если в очередные сутки следовало превышение амплитуды атмосфериков над уровнем среднеквадратичных вариаций, то этот день начинал рассматриваться в качестве возможного дня алерта. Алерт вырабатывался, если затем следовало понижение средней амплитуды атмосфериков, превышающее уровень среднеквадратичных вариаций, не менее двух дней подряд (предвестники наблюдаются за 3-8 дней до землетрясения). Следующие 10 дней после выработки алерта пропускались, чтобы исключить возможное проявление афтершоков. После анализа всего массива данных проведено сопоставление с каталогом реально зарегистрированных землетрясений в выбранном регионе, результаты сопоставления приведены в Табл. 1 (учитывались землетрясения с магнитудой более 4,0, наличие алерта обозначено "+", а отсутствие - "o"). Следует отметить, что имеющийся массив данных имеет, к сожалению, очень много пропусков, что исключило из анализа значительную часть событий.

Табл. 1.

	Дата	Время	Широта	Долгота	Глубина, км	Магнитуда	Алерт
1	15.02.2004	165129.53	54.83	164.61	30	4.40	+
2	25.02.2004	085606.50	54.62	162.81	19	5.50	o
3	03.03.2004	155528.28	54.55	162.53	52	4.30	+
4	20.03.2004	085315.11	53.83	160.47	52	5.80	o
5	14.04.2004	015409.22	55.23	162.66	51	6.20	+
6	16.11.2004	115728.14	53.06	160.13	48	5.50	-
7	11.11.2005	145450.74	55.13	164.65	11	4.20	+
8	13.12.2005	190139.74	55.99	161.47	87	4.40	+
9	06.02.2006	055133.07	56.19	164.20	24	5.70	o
10	12.04.2006	010658.69	56.40	163.99	28	6.00	+

В Табл. 1 учтены землетрясения, у которых расстояние их эпицентров до трассы, проходящей через виртуальный эпицентр, составляло не более 1-2 зон Френеля. В качестве примера отсутствия алерта на землетрясение с эпицентром, располагающимся на большем расстоянии, чем указанные зоны Френеля, приведено землетрясение под номером 9. За исключением лишь одного события (номер 4) землетрясения пришлись на область севернее основной трассы распространения сигналов (проходящих через виртуальный эпицентр). Как следует из Табл. 1, из 9 землетрясений в этой области пропущено 2 события. Вызывает вопрос пропущенное, близко-расположенное к основной трассе, землетрясение под номером 2, которое зарегистрировано спустя 10 дней после алертного землетрясения, являющегося одним из этих двух наиболее близко-расположенных к основной трассе землетрясений. Возможно, именно это обстоятельство (короткое время после первого события и близкое к нему расположение пропущенного землетрясения) сыграло роль в отсутствие алерта.

Работа поддержана грантом РФФИ 09-05-98540-р_восток_а и программами Президиума РАН №16, РНП 2.1.1/2555.

Литература

1. Mullayarov V.A., Karimov R.R., Kozlov V.I. Variations in thunderstorm VLF emissions propagating over the epicenters of earthquakes // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2007. Vol. 69. No 13. P. 1513-1523.

2. Cummer S.A. and Inan U.S. Ionospheric E region remote sensing with ELF radio atmospherics // Radio Science. 2000. Vol. 35. P. 1437.

3. Marshall, R. A. Inan, U. S., Chevalier T. W. Early VLF perturbations caused by lightning EMP-driven dissociative attachment // JGR. 2008. VOL. 35. L21807. doi:10.1029/2008GL035358.