

УДК 550.34, 551.510.535, 537.87

## АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ НИЖНЕЙ ИОНОСФЕРЫ ПО ДАННЫМ СЕТИ ОНЧ/НЧ СТАНЦИЙ В ПЕРИОД СИЛЬНОЙ СЕЙСМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ В НЕПАЛЕ В 2015 г.

© 2019 г. М.С. Соловьева<sup>1</sup>, А.А. Рожной<sup>1</sup>, А.К. Рыбин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия*

<sup>2</sup> *Научная станция РАН, г. Бишкек, Киргизская Республика*

Данные очень низкочастотных и низкочастотных наблюдений (ОНЧ/НЧ) электромагнитных сигналов на принимающих станциях KGZ (г. Бишкек, Киргизия) и VAR (г. Варанаси, Индия) были использованы для многофакторного анализа в связи с двумя сильными землетрясениями в Непале, произошедшими 25.04.2015 г. с  $M_w=7.8$  и 12.05.2015 г. с  $M_w=7.3$ . Рассматривались вариации сигналов от передатчиков VTX (17.0 кГц, Индия), NWC (19.8 кГц, Австралия) и JYU (40.0 кГц, Япония). Две проходящие над эпицентрами землетрясений пересекающиеся трассы NWC–KGZ и JYU–VAR показали аномальное поведение сигналов в течение нескольких дней перед первым, более сильным землетрясением. Аномалии наблюдались также на двух других трассах от передатчика VTX, которые полностью находились в зоне возможного проявления предвестников землетрясения.

Рассмотрев другие факторы, которые могли бы повлиять на характеристики ОНЧ/НЧ сигналов – магнитные бури, протонные вспышки, потоки релятивистских электронов, изменение атмосферного давления, тайфуны, – мы можем заключить, что наблюдаемые аномалии в сигналах, скорее всего, вызваны процессами подготовки землетрясений.

**Ключевые слова:** землетрясения, субионосферные электромагнитные сигналы, нижняя ионосфера.

### Введение

Исследования электромагнитными методами в настоящее время рассматриваются как перспективное направление краткосрочного прогноза землетрясений, поскольку накоплено множество доказательств сейсмоэлектромагнитных явлений в широком диапазоне частот от ультранизких до высоких, а средства наблюдения таких явлений протягиваются от наземного мониторинга до наблюдений на спутниках (см., например, [Pulinets, Boyarchuk, 2004; Molchanov, Hayakawa, 2008; Hayakawa, 2015]). Интерес к таким наблюдениям определяется как возможностью практического применения фиксируемых эффектов для определения времени будущего землетрясения, так и фундаментальными проблемами литосферно-атмосферно-ионосферных связей. Однако результаты наблюдений часто неоднозначны, в связи с чем надежность электромагнитных методов исследования для идентификации сейсмической активности до сих пор остается темой весьма интенсивных научных дебатов. Что касается очень низкочастотных и низкочастотных (ОНЧ/НЧ) методов анализа, надежность их результатов может возрасти при использовании данных, получаемых на сети станций.

Очень низкочастотные и низкочастотные сигналы в частотном диапазоне 10–50 кГц распространяются между Землей и ионосферой как в сферическом волноводе, нижней стенкой которого является Земля, а верхней – самая нижняя часть ионосферы (слой D). Эффективная высота отражения сигнала обычно принимается равной ~70 км днем

и ~90 км ночью. Характер распространения ОНЧ/НЧ сигналов определяется, с одной стороны, электрической проводимостью земной поверхности, с другой – проводимостью нижней ионосферы и верхней атмосферы. Проводимость земной поверхности менее подвержена изменениям, и наблюдаемые изменения в сигнале главным образом зависят от высоты отражения, которая, в свою очередь, зависит от величины и градиента электронной плотности вблизи границы атмосфера–ионосфера [Barr, Jones, Rodger, 2000]. Распространение субионосферных ОНЧ/НЧ сигналов от мощных передатчиков на расстояния в тысячи километров дает возможность отслеживать состояние нижней ионосферы над обширными регионами.

Применение ОНЧ/НЧ метода для анализа связанных с сейсмической активностью вариаций сигнала, началось в России в 80-е годы прошлого века, когда впервые перед рядом сильных землетрясений на длинных трассах были обнаружены ночные “бухтообразные” возмущения в амплитуде и фазе сигнала [Gokhberg et al., 1989]. Другой метод обработки данных (так называемый метод терминаторов) был предложен в Японии при анализе землетрясения в Кобе 17.01.1995 г. [Hayakawa et al., 1996].

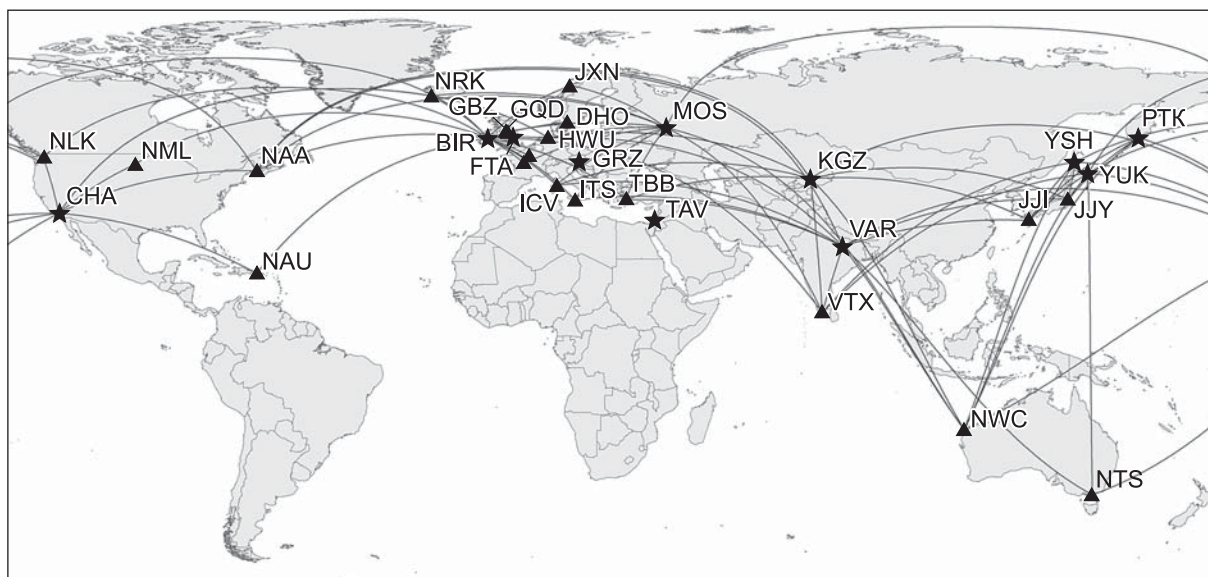
Непрерывный многолетний мониторинг ОНЧ/НЧ сигналов, проходящих над Курило-Камчатским и Японским регионами, характеризующимися высокой сейсмоактивностью, позволил установить статистически значимую зависимость между вариациями амплитуды и фазы сигнала в ночной период времени и землетрясениями с  $M \geq 5.5$  [Rozhnoi et al., 2004]. Было обнаружено, что наиболее часто связанные с сейсмической активностью отрицательные аномалии в сигнале наблюдаются в течение недели до землетрясения и недели после основного толчка [Rozhnoi et al., 2004; Maekawa et al., 2006; Hayakawa et al., 2010]. Аномалии наблюдались в 20–25 % всех случаев землетрясений за период наблюдений с 2000 до 2007 гг. Для сильных землетрясений ( $M > 6.8$ ), произошедших в тот же период, вероятность появления аномалий возросла до 60–70 % [Rozhnoi, Solovieva, Hayakawa, 2013].

Первая работа, в которой использовались данные, полученные на сети ОНЧ/НЧ станций в Европе, связана с анализом сигналов в период землетрясения 06.04.2009 г. в Аквиле, Италия [Rozhnoi et al., 2009]. Были обнаружены как сильные ночные “бухтообразные” аномалии сигналов на длинных трассах, так и аномальный сдвиг в положении вечернего терминатора на коротких субионосферных трассах. Аномалии наблюдались в течение 5–6 дней перед самим землетрясением, а также перед его сильным афтершоком. Анализ сигналов от одних и тех же передатчиков на пересекающихся трассах впервые дал возможность локализовать область подготовки землетрясения. Позднее данные европейской сети наблюдений были использованы для поиска возмущений в нижней ионосфере, вызванных землетрясением 22.11.2014 г. в зоне Вранча [Solovieva et al., 2015]. Отрицательные амплитудные аномалии наблюдались в распространявшемся непосредственно над эпицентром землетрясения сигнале в течение трех дней перед землетрясением и двух дней после него. Сигнал от того же передатчика оставался невозмущенным на двух других “асейсмических” трассах. При этом были учтены все иные возможные причины, которые могут вызвать возмущение в нижней ионосфере (геомагнитная активность, протонные вспышки, потоки релятивистских электронов, циклоническая активность, извержения вулканов).

Отмечаемое в последнее время развитие систем ОНЧ/НЧ наблюдений в разных регионах планеты влечет за собой получение новой полезной информации о свойствах и положении области возмущений в ионосфере в связи с сейсмической активностью. Применение сетевых наблюдений позволяет разделять локальные аномалии в ОНЧ/НЧ

сигналах, связанные с землетрясениями, извержениями вулканов и цунами, и крупномасштабные или глобальные аномалии, связанные с атмосферной циркуляцией, магнитными бурями, суббурями и солнечными вспышками. Использование сетей дает возможность определить область подготовки землетрясений.

Сегодня конфигурация сети ОНЧ/НЧ станций (рис. 1) позволяет говорить, что созданная усилиями ученых многих стран система наблюдений перекрывает все характеризующиеся высокой сейсмической активностью области Северного полушария, включая Тихоокеанский и Средиземноморско-Азиатский сейсмические пояса.



**Рис. 1.** Схема расположения принимающих (звездочки) и передающих (треугольники) станций глобальной сети ОНЧ/НЧ наблюдений. Сплошные линии – трассы распространения субионосферных сигналов от передатчиков к приемникам. Расшифровку сокращенных названий станций см. в тексте и таблице

**Fig. 1.** A scheme showing the positions of receivers (asterisks) and the transmitters (triangles) of the VLF/LF network. Lines are the paths of sub-ionospheric signals propagations from transmitters to receivers. The information about transmitters is presented in the table

Исторически первая локальная сеть ОНЧ/НЧ наблюдений была создана в Японии в начале XXI века. Одновременно формировалась и европейская сеть – в 2002 г. ОНЧ приемник был установлен в Италии в г. Бари, в 2007 г. – в Австрии в г. Грац (GRZ<sup>1</sup>) в 2009 г. – в России (MOS). В настоящее время глобальная сеть ОНЧ/НЧ наблюдений включает 11 приемных станций (см. рис. 1), размещенных в России (MOS, г. Москва; PTK, г. Петропавловск-Камчатский; YSH, г. Южно-Сахалинск; YUK, г. Южно-Курильск), в Австрии (GRZ, г. Грац); Великобритании (SHF, г. Шеффилд); Ирландии (BIR, г. Бирр); Киргизии (KGZ, г. Бишкек); Индии (VAR, г. Варанаси); Израиле (TAV, г. Тель-Авив), США (CHA, г. Сан-Франциско). Информация о передающих станциях с указанием их позывных, координат местоположения и государственной принадлежности приведена ниже в таблице.

Локальные системы наблюдений существуют также в Бразилии (сеть *SAVNET*) [Raulin et al., 2009] и Южной Европе (сеть *INFREP*) [Biagi et al., 2011].

<sup>1</sup> Здесь и далее в скобках приводятся сокращенные названия станций сети, используемые на рис. 1.

Информация о передающих станциях сети ОНЧ/НЧ наблюдений  
(местоположение станций см. на рис. 1)

Позывные	Географические координаты		Частота, кГц	Страна
	$\varphi^\circ$	$\lambda^\circ$		
JXN	66.41667	13.01667	16.4	Норвегия
VTX	8.387015	77.75276	17.0	Индия
NTS	-38.4813	146.9353	18.6	Австралия
GBZ	54.7318	-2.88303	19.6	Великобритания
NWC	-21.8163	114.1656	19.8	Австралия
ICV	40.92313	9.731011	20.27	Италия
FTA	48.54463	2.579429	20.9	Франция
NPM	21.42017	201.8489	21.4	США, Гавайи
HWU	46.71313	1.245248	22.6	Франция
GQD	54.91164	-3.27846	22.1	Великобритания
JJI	32.07637	130.8286	22.2	Япония
DHO	53.0789	7.615	23.4	Германия
NAA	44.64494	-67.2816	24.0	США
NLK	48.20349	-121.917	24.8	США
NML	46.36599	-98.3356	25.2	США
TBB	37.46667	27.5	26.7	Турция
NRK	63.85036	-22.4668	37.5	Исландия
JJY	37.3726	140.8489	40.0	Япония
NAU	18.39876	-67.1776	40.8	Пуэрто-Рико

В данной работе представлен многофакторный анализ электромагнитных наблюдений на двух станциях сети KGZ (г. Бишкек, Киргизстан) и VAR (г. Варанаси, Индия) в связи с сильными землетрясениями в Непале в апреле–мае 2015 г.

Первое из рассматриваемых землетрясений произошло 25.04.2015 г. в 06:11 UT ( $M_w=7.8$ ,  $h=15$  км) в 80 км к северо-западу от столицы Непала г. Катманду. Эпицентр землетрясения находился на линии разлома, в области, где Индостанская плита погружается под Евразийскую. На следующий день, 26.04.2015 г., в 07:08 UT был зарегистрирован самый сильный афтершок с  $M_w=6.9$ ; афтершоковая активность продолжалась до 28.04.2015 г. (<http://earthquake.usgs.gov/contactus/golden/neic.php>). Землетрясение привело к многочисленным человеческим жертвам и разрушениям.

Ещё одно сильное землетрясение произошло в Непале 12.05.2015 г. в 07:05 UT ( $M_w=7.3$ ,  $h=18$  км). Эпицентр этого события находился на том же разломе, но был расположен несколько восточнее.

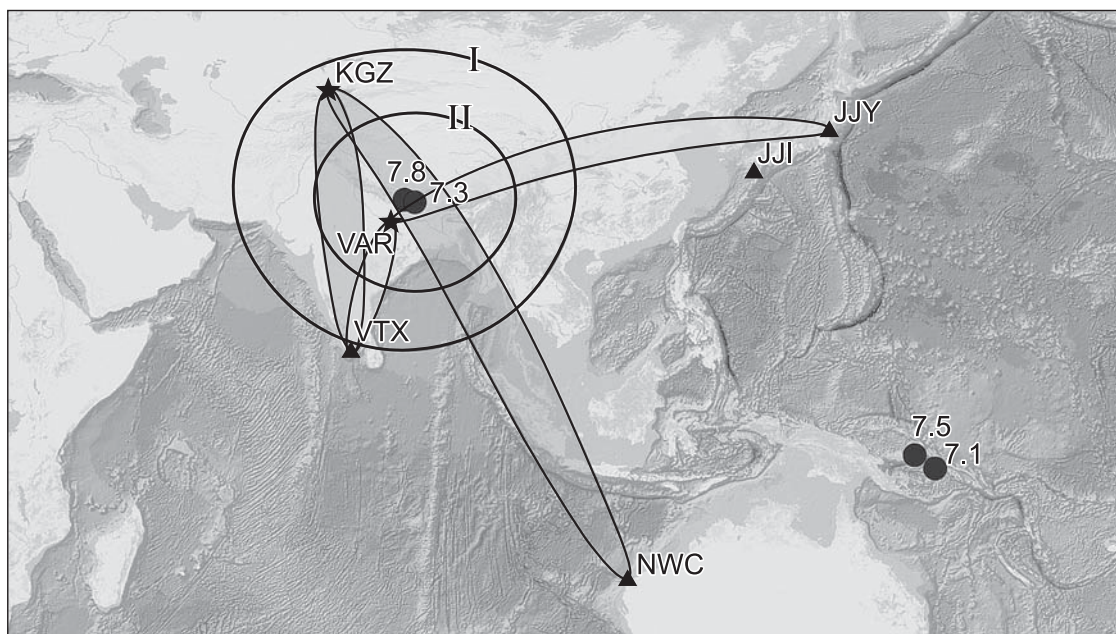
### Методика наблюдений и результаты анализа

Все станции сети оборудованы *UltraMSK* приемниками (<http://ultramsk.com/>), основу которых составляют профессиональная звуковая карта, используемая как 24-разрядное АЦП, GPS модуль, обеспечивающий привязку по времени и служащий опорным сигналом для синхронизации фазы, а также специализированное программное обеспечение для регистрации и обработки *MSK* модулированных сигналов (*Minimum Shift Keying*). *MSK* сигналы имеют фиксированные частоты в узкой полосе 50–100 Гц относительно основной частоты. Источниками сигналов служат навигационные

передатчики и передатчики службы времени; прием сигналов осуществляется на штыревую антенну. При регистрации приемник может обеспечивать интервал дискретизации от 50 мс до 60 с (в основном используется 20-секундный интервал дискретизации). При этом количество принимаемых сигналов зависит только от мощности компьютера и от региона исследований (плотность передатчиков в Европе намного выше, чем на Дальнем Востоке).

Для анализа непальских землетрясений были использованы данные, полученные на двух станциях – KGZ (установлена в 2014 г. на территории Научного полигона РАН в г. Бишкеке, Киргизия) и VAR (установлена в 2015 г. в г. Варанаси, Индия). Эти станции принимают сигналы от передатчиков, расположенных в Индии, Австралии, Японии, Америке и Европе; их установка позволила связать в единое целое систему наблюдения в Европе и на Дальнем Востоке и перекрыть почти весь Альпийско-Гималайский сейсмоактивный пояс, пересекающий Евразию в широтном направлении.

Схема расположения принимающих станций KGZ, VAR и трех передатчиков VTX (Индия, 17.0 кГц), NWC (Австралия, 19.8 кГц), JJY (Япония, 40.0 кГц) показана на рис. 2.



**Рис. 2.** Схема расположения принимающих станций KGZ, VAR (звездочки) и передатчиков VTX, NWC, JJY, JJI (треугольники). Эллипсы – границы зон чувствительности субионосферных трасс; окружности разного диаметра – границы зон возможного проявления предвестников землетрясений, рассчитанные для землетрясения 25.04.2015 г. (I) и землетрясения 12.05.2015 г. (II). Кружки – эпицентры землетрясений, произошедших в рассматриваемом регионе в апреле-мае 2015 г. с  $M > 7$

**Fig. 2.** A scheme showing the positions of receivers KGZ, VAR (asterisks) and the transmitters VTX, NWC, JJY, JJI (triangles). The ellipses are the boundaries of sensitivity zone of the sub-ionospheric paths. The circumferences of different diameters are the boundaries of zones where possible precursors of earthquake can be found. The radiuses of these zones have been calculated for the earthquake on 25.04.2015 (I) and for the earthquake on 12.05.2015 (II). The filled circles are epicenters of the earthquakes with  $M > 7$ , which took place in the region under study

На рис. 2 вынесены также эпицентры землетрясений, произошедших с  $M > 7$  в рассматриваемом регионе в апреле–мае 2015 г. Две окружности разного диаметра – это границы зон возможного проявления предвестников землетрясений; радиус такой зоны рассчитывался по формуле  $R = 10^{0.43M}$ , где  $M$  – магнитуа события [Dobrovolsky, Zubkov, Myachkin, 1979]. Окружность большего диаметра соответствует первому из вышеназванных землетрясений, меньшего – второму событию. Поскольку приемная станция VAR начала регулярный прием сигналов в апреле 2015 г., анализ для обеих станций выполнен, начиная с 01.04.2015 г. Две трассы – NWC–KGZ и JJY–VAR – прошли непосредственно над эпицентрами непальских землетрясений. Сигнал от передатчика JJY (положение см. на рис. 2), принимаемый станцией VAR, также прошел над эпицентрами рассматриваемых событий, но его невозможно было использовать для анализа в связи с низким качеством регистрации, поскольку из-за слабой мощности этого передатчика уверенный прием сигнала возможен только в ближней зоне.

Еще две субионосферные трассы – VTX–KGZ и VTX–VAR (см. рис. 2) – не проходили над эпицентрами землетрясений, но также находились в зоне возможного проявления предвестников землетрясений.

Поскольку ОНЧ/НЧ сигналы имеют суточные и сезонные вариации, для анализа использовался разностный сигнал  $dS(t)$ , определяемый как  $dS(t) = S(t) - \langle S \rangle$ , где  $S(t)$  – наблюдаемый сигнал;  $\langle S \rangle$  – среднемесячный. В связи с тем, что в дневное время сигнал сильно подвержен вызываемым рентгеновскими вспышками внезапным ионосферным возмущениям и менее чувствителен к слабым воздействиям, анализ проводился для ночного интервала наблюдений. Разностный сигнал усреднялся за ночной интервал

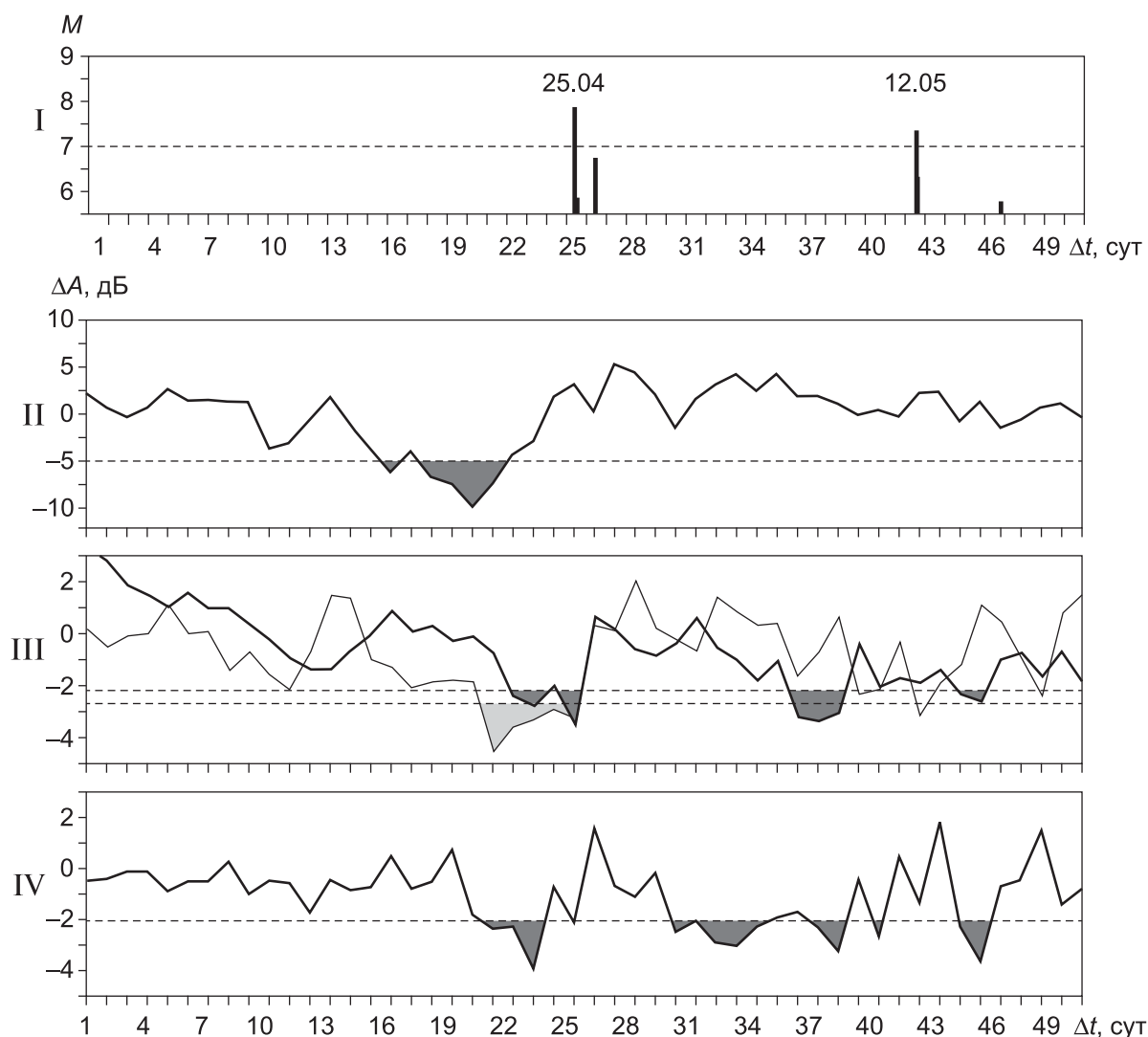
по формуле  $\langle S_n \rangle = \sum_{t_1}^{t_2} \frac{dS(t)}{n}$ , где  $t_1$  и  $t_2$  – определяемые для каждой трассы времена на-

чала и окончания ночного интервала соответственно;  $n$  – число точек, попавших в этот интервал. Полученные таким образом значения представлены на рис. 3, где показаны вариации только амплитуды сигналов.

Так как ночные амплитудные аномалии являются отрицательными вне зависимости от их причины (это могут быть магнитные бури, сейсмическая активность, циклоны и тайфуны, распространение цунами и пр.), на рис. 3 обозначен только уровень  $-2\sigma$ , где  $\sigma$  – стандартное отклонение. Можно видеть, что значительные аномалии, превышающие уровень двух стандартных отклонений, наблюдались в течение 4–5 дней перед первым землетрясением на четырех трассах, пересекающих зону, в которой могут быть обнаружены предвестники землетрясений. Спустя несколько дней, когда сигналы были невозмущенными, можно заметить вторую серию аномалий.

В отличие от первого, перед вторым непальским землетрясением сигнал передатчика JJY оставался невозмущенным. Это может быть связано с частотой сигнала, которая вдвое превышала частоту остальных сигналов, или с иной ориентацией этой трассы относительно магнитного поля.

Необходимо иметь в виду, что в период с 10.04 по 16.04.2015 г. отмечалась умеренно возмущенная геомагнитная активность. В названный промежуток времени произошли две магнитные бури с  $Dst$  около  $-70$  нТ; еще одно геомагнитное возмущение того же порядка наблюдалось 13.05.2015 г. днем (по местному времени). Протонные вспышки в апреле были слишком слабыми, чтобы вызвать заметные аномалии в сигнале [Rozhnoi, Solovieva, Hayakawa, 2013].



**Рис. 3.** Магнитуды землетрясений 25.04. и 12.05.2015 г. и их основных афтершоков (I); графики усредненных за ночной период разностных значений амплитуды сигнала для трасс JJY–VAR (II), VTX–VAR (утолщенная кривая) и VTX–KGZ (III), NWC–KGZ (IV). На горизонтальных осях  $\Delta t$ , сут – время, отсчитываемое от 01.04.2015 г. Штриховые линии на I – уровень магнитуды  $M=7$ ; на II–IV – уровень  $-2\sigma$ , где  $\sigma$  – стандартное отклонение (закрашенные области – отрицательные аномалии в амплитудах сигнала, когда разностный сигнал ниже уровня  $-2\sigma$ )

**Fig. 3.** The magnitudes of the earthquakes on 25.04 and 12.05.2015 and their main aftershocks (I); the graphs of the average residual amplitudes of the signals in nighttime for paths JJY–VAR (II), VTX–KGZ (III) and NWC–KGZ (IV). The dashed line on I is the level of  $M=7$ ; on II–IV the dashed lines show the  $-2\sigma$  level, where  $\sigma$  is the standard deviation (the filled areas highlight the periods of negative amplitudes anomalies in the signal, when the residual signal was below  $-2\sigma$  level)

Умеренные потоки электронов регистрировались на геостационарном спутнике GOES 16–18.04.2015 г. (<http://legacy-www.swpc.noaa.gov/ftpmenu/lists/particle.html>), т.е. до появления аномалий в анализируемом ОНЧ/НЧ сигнале. Следующий поток электронов наблюдался позже 15.05.2015 г., т.е. после появления аномалий.

Другой важный фактор, способный вызвать аномалии в ОНЧ/НЧ сигналах, – резкие изменения атмосферного давления [Rozhnoi et al., 2014]. Согласно данным, полученным на наземных метеорологических станциях в городах Бишкек, Варанаси и Южно-Сахалинск, резких изменений давления в период наблюдения аномалий в субионосферных сигналах, не было зарегистрировано. По данным Японского метеорологического агентства *JMA* (<http://www.jma.go.jp/jma/indexe.html>), в рассматриваемый временной период в регионе к югу от Японии в стороне от анализируемых трасс прошли два сильных тайфуна – *Noul* и *Dolphin*; других тайфунов или циклонов отмечено не было.

Помимо рассмотренных факторов значительное влияние на нижнюю ионосферу могут оказывать атмосферные волны различного типа, такие, например, как волны Россби, или межсезонные атмосферные колебания *MJO* (*Madden-Julian Oscillations*) (см. [Данилов и др., 1987] и приводимые в этой работе ссылки). К сожалению, не имея данных по измерениям этих волн, мы не смогли их проанализировать.

Таким образом, рассмотрев почти все возможные факторы, которые могут вызвать возмущение в нижней ионосфере и, следовательно, повлиять на характеристики ОНЧ/НЧ сигналов, и не выявив их возможного воздействия, мы можем с большой вероятностью заключить, что наблюдаемые аномалии в регистрируемых сигналах, скорее всего, связаны с процессами подготовки землетрясений.

В работе [Maurya et al., 2016] в связи с непальским землетрясением 25.04.2015 г. представлен анализ поведения сигнала от передатчика NWC (Австралия, 19.8 кГц), принимаемого в Индии на станции в г. Аллахабад. Второе непальское землетрясение 12.05.2015 г. в этой работе рассматривается как афтершок, в связи с чем интервал представленного в ней анализа ограничен датой 30.04.2015 г. Станция в г. Аллахабад расположена в 360 км к югу от эпицентра землетрясения, и сигнал от передатчика NWC проходил в стороне от эпицентральной области, однако примерно третья часть трассы пересекла зону возможных проявлений предвестников землетрясений. При такой геометрии наблюдений трудно ожидать появления значительных аномалий в сигнале. Сдвиг в положении вечернего терминатора, а также ночные флуктуации в сигнале были обнаружены за день до землетрясения.

Хотя в названной работе анализируются данные, полученные только на одной трассе, представленные в ней результаты в известной мере могут служить подтверждением того, что непальскому землетрясению 25.04.2015 г. действительно предшествовали возмущения нижней ионосферы.

### Выводы

Развертывание систем ОНЧ/НЧ наблюдений в Европе, Центральной Азии, на Дальнем Востоке и в Америке может повлечь за собой получение новой информации о свойствах и положении области возмущений в ионосфере в связи с сейсмической активностью. Применение сети наблюдений позволяет разделять локальные аномалии в субионосферных сигналах, связанные с землетрясениями, извержениями вулканов и цунами, и крупномасштабные или глобальные аномалии, связанные с атмосферной циркуляцией, магнитными бурями, суббурями, солнечными вспышками, потоками электронов. Использование наблюдений вариаций сигналов на пересекающихся трассах дает возможность определить область подготовки землетрясений.



В рассмотренном в данной работе случае две пересекающиеся трассы NWC–KGZ и JYU–VAR, проходящие над эпицентрами непальских землетрясений 2015 г., показали аномальное поведение сигнала в течение нескольких дней перед первым, более сильным событием. Тот факт, что аномалии наблюдались и на двух других трассах от передатчика VTX, которые полностью находились в зоне возможного проявления предвестников землетрясения, может свидетельствовать об интенсивности готовящегося сейсмического события.

Время появления аномалий на разных трассах несколько (на 2–3 дня) различается, что может быть вызвано разницей в частоте сигналов, длине трасс и их ориентации относительно магнитного поля Земли.

Для получения более надежных результатов необходимо привлечение к анализу и других методов, дающих представление о процессах в ионосфере. Это могут быть, например, наблюдения на низкоорбитальных специализированных спутниках или GPS наблюдения.

### Благодарности

Авторы благодарят своих иностранных коллег доктора В. Федуну (Университет г. Шеффилда, Великобритания) и доктора Ашибека Сриваставу (Университет г. Варанаси, Индия) за любезно предоставленные ими данные очень низкочастотных и низкочастотных наблюдений в г. Варанаси.

### Литература

- Данилов А.Д., Казимировский Э.С., Вергасова Г.В., Хачикян Г.Я. Метеорологические эффекты в ионосфере. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 268 с.
- Barr R., Llanwyn J.D., Rodger C.J. ELF and VLF radiowaves // J. Atmos. Sol. Terr. Phys. 2000. V. 62. P.1689–1718.
- Biagi P.F., Maggipinto T., Righetti F., Loiacono D., Schiavulli L., Ligonzo T., Ermini A., Moldovan I.A., Moldovan A.S., Buyuksarac A., Silva H.G., Bezzeghoud M., Contadakis M.E. The European VLF/LF radio network to search for earthquake precursors: setting up and natural/man-made disturbances // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 2011. V. 11. P.333–341. doi: 10.5194/nhess-11-333-2011
- Dobrovolsky I.R., Zubkov S.I., Myachkin V.I. Estimation of the size of earthquake preparation zones // Pure and Applied Geophysics. 1979. V. 117. P.1025–1044.
- Gokhberg M.B., Gufeld I.L., Rozhnoy A.A., Marenko V.F., Yampolsky V.S., Ponomarev E.A. Study of seismic influence on the ionosphere by super long wave probing of the Earth-ionosphere wave guide // Phys. Earth Planet. Inter. 1989. V. 57. P.64–67.
- Hayakawa M. Earthquake prediction with radio techniques. Singapore. WILEY, 2015. 294 p.
- Hayakawa M., Molchanov O.A., Ondoh T., Kawai E. Precursory Signature of the Kobe Earthquake on VLF Subionospheric Signal // J. Atmos. Electr. 1996. V. 16, N 3. P.247–257.
- Hayakawa M., Kasahara Y., Nakamura T., Muto F., Horie T., Maekawa S., Hobara Y., Rozhnoi A.A., Solovieva M., Molchanov O.A. A statistical study on the correlation between lower ionospheric perturbations as seen by subionospheric VLF/LF propagation and earthquakes // J. Geophys. Res. 2010. V. 115. A09305. doi: 10.1029/2009JA015143
- Maekawa S., Horie T., Yamauchi T., Sawaya T., Ishikawa M., Hayakawa M., Sasaki H. A statistical study on the effect of earthquakes on the ionosphere, based on the subionospheric LF propagation data in Japan // Ann. Geophysicae. 2006. V. 24. P.2219–2225.
- Maurya A.K., Venkatesham K., Tiwari P., Vijaykumar K., Singh R., Singh A.K., Ramesh D.S. The 25 April 2015 Nepal Earthquake: Investigation of precursor in VLF subionospheric signal // J. Geophys. Res. Space Physics. 2016. V. 121. doi: 10.1002/2016JA022721

- Molchanov O.A., Hayakawa M.* Seismo Electromagnetics and Related Phenomena: History and Latest results. Tokyo: TERRAPUB, 2008. 189 p.
- Pulinets S.A., Boyarchuk K.A.* Ionospheric precursors of earthquakes. Berlin; Heidelberg; New York: Springer, 2004. 315 p.
- Raulin J.-P., de Matos P.C., Hadano D.R., Saraiva A.C.V., Correia E., Kaufmann P.* The South America VLF Network (SAVNET) // Earth, Moon, and Planets. 2009. V. 104. Issue 1–4. P.247–261. doi: 10.1007/s11038-008-9269-4
- Rozhnoi A., Solovieva M., Hayakawa M.* VLF/LF signals method for searching of electromagnetic earthquake precursors Earthquake Prediction Studies // Seismo Electromagnetics / ed. Masashi Hayakawa. Tokyo: TERRAPUB, 2013. P.31–48.
- Rozhnoi A., Solovieva M.S., Molchanov O.A., Hayakawa M.* Middle latitude LF (40 kHz) phase variations associated with earthquakes for quiet and disturbed geomagnetic conditions // Phys. Chem. Earth. 2004. V. 29. P.589–598.
- Rozhnoi A., Solovieva M., Molchanov O., Schwingenschuh K., Boudjada M., Biagi P.F., Maggipinto T., Castellana L., Ermini A., Hayakawa M.* Anomalies in VLF radio signals prior the Abruzzo earthquake (M=6.3) on 6 April 2009 // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 2009. V. 9. P.1727–1732. doi: 10.5194/nhess-9-1727-2009
- Rozhnoi A., Solovieva M., Levin B., Hayakawa M., Fedun V.* Meteorological effects in the lower ionosphere as based on VLF/LF signal observations // NHESS. 2014. V. 14. P.2671–2679. doi: 10.5194/nhess-14-2671-2014
- Solovieva M., Rozhnoi A., Fedun V., Schwingenschuh K., Hayakawa M.* Ionospheric perturbations related to the earthquake in Vrancea area on November 22, 2014, as detected by electromagnetic VLF/LF frequency signals // Ann. Geophys. 2015. V. 58, N 5. A0552. doi: 10.4401/ag-6827

#### Сведения об авторах

**СОЛОВЬЕВА Мария Сергеевна** – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт физики Земли РАН им. О.Ю. Шмидта РАН. 123242, Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: +7(499) 254-93-95. E-mail: rozhnoi@rambler.ru

**РОЖНОЙ Александр Александрович** – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт физики Земли РАН им. О.Ю. Шмидта РАН. 123242, Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: +7(499) 254-93-95. E-mail: rozhnoi@ifz.ru

**РЫБИН Анатолий Кузьмич** – доктор физико-математических наук, директор Научной станции РАН. Бишкек-49, 720049, Киргизия. Тел.: +996(312) 61-31-40. E-mail: rybin@gdirc.ru

## THE LOWER IONOSPHERE CONDITIONS DURING STRONG SEISMIC ACTIVITY IN NEPAL IN 2015 ANALYZED USING THE VLF/LF NETWORK

M.S. Solovieva<sup>1</sup>, A.A. Rozhnoi<sup>1</sup>, A.K. Rybin<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

<sup>2</sup> Research Station RAS, Bishkek, Kyrgyzstan

**Abstract.** The very low-frequency and low-frequency (VLF/LF) observations of electromagnetic signals at the receiving stations KGZ in Bishkek (Kyrgyzstan) and VAR (Varanasi, India) has been used for the multiple-factor analysis in connection with two strong earthquakes in Nepal that occurred on April, 25th (Mw7.8) and on May, 12th (Mw7.3), 2015. Signal variations were considered from VTX (17.0 kHz, India), NWC (19.8 kHz, Australia), and JYJ (40 kHz, Japan) transmitters. Two crossing wave paths, NWC–KGZ and JYJ–VAR that passed over the earthquake epicenters, have shown abnormal behavior of signals during several days before the

first, stronger earthquake. Anomalies were also observed for two other wave paths from the VTX transmitter that were completely inside the area of possible earthquake precursors. Having considered other factors that could influence characteristics of VLF/LF signals (magnetic storms, proton flashes, relativistic electron fluxes, change in atmospheric pressure, typhoons) we can conclude that the anomalies observed in signals are most probably caused by the processes of earthquake preparation.

**Keywords:** earthquakes, sub-ionospheric electromagnetic signals, the lower ionosphere.

## References

- Barr R., Llanwyn Jones D., and Rodger C.J., ELF and VLF radio waves, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 2000, vol. 62, pp. 1689-1718.
- Biagi P.F., Maggipinto T., Righetti F., Loiacono D., Schiavulli L., Ligonzo T., Ermini A., Moldovan I.A., Moldovan A.S., Buyuksarac A., Silva H.G., Bezzeghoud M., and Contadakis M.E., The European VLF/LF radio network to search for earthquake precursors: setting up and natural/man-made disturbances, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2011, vol. 11, pp. 333-341, doi: 10.5194/nhess-11-333-2011
- Danilov A.D., Kazimirovsky E.S., Vergasova G.V., and Khachikian G.Ya., *Meteorologicheskie efekty v ionosphere* (Meteorological effects in the ionosphere), Leningrad: Gidrometeobzdat, 1987.
- Dobrovolsky I.R., Zubkov S.I., and Myachkin V.I., Estimation of the size of earthquake preparation zones, *Pure and Appl. Geophys.*, 1979, vol. 117, pp. 1025-1044.
- Gokhberg M.B., Gufeld I.L., Rozhnoy A.A., Marenko V.F., Yampolsky V.S., and Ponomarev E.A., Study of seismic influence on the ionosphere by super long wave probing of the Earth-ionosphere wave guide, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 1989, vol. 57, pp. 64-67.
- Hayakawa M., Molchanov O.A., Ondoh T., and Kawai E. Precursory Signature of the Kobe Earthquake on VLF Subionospheric Signal, *J. Atmos. Electr.*, 1996, vol. 16, no. 3, pp. 247-257.
- Hayakawa M., Kasahara Y., Nakamura T., Muto F., Horie T., Maekawa S., Hobara Y., Rozhnoi A.A., Solovieva M., and Molchanov O.A., A statistical study on the correlation between lower ionospheric perturbations as seen by subionospheric VLF/LF propagation and earthquakes, *J. Geophys. Research*, 2010, vol. 115, A09305, doi: 10.1029/2009JA015143
- Hayakawa Masashi, *Earthquake prediction with radio techniques*, WILEY, Singapore, 2015.
- Maekawa, S., Horie T., Yamauchi T., Sawaya T, Ishikawa M., Hayakawa M., Sasaki H., A statistical study on the effect of earthquakes on the ionosphere, based on the subionospheric LF propagation data in Japan, *Ann. Geophysicae*, 2006, vol. 24, pp. 2219-2225.
- Maurya A.K., Venkatesham K., Tiwari P., Vijaykumar K., Singh R., Singh A.K., and Ramesh D.S., The 25 April 2015 Nepal Earthquake: Investigation of precursor in VLF subionospheric signal, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 2016, vol. 121, doi: 10.1002/2016JA022721
- Molchanov, O.A. and Hayakawa M., *Seismo Electromagnetics and Related Phenomena: History and Latest results*, TERRAPUB, Tokyo, 2008.
- Pulinets S.A. and Boyarchuk K.A., *Ionospheric precursors of earthquakes*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 2004.
- Raulin J.-P., De Matos P.C., Hadano D.R., Saraiva A.C.V., Correia E., and Kaufmann P., The South America VLF Network (SAVNET), *Earth, Moon, and Planets*, 2009, vol. 104, iss. 1-4, pp. 247-261, doi: 10.1007/s11038-008-9269-4
- Rozhnoi A., Solovieva M., Molchanov O., Schwingenschuh K., Boudjada M., Biagi P.F., Maggipinto T., Castellana L., Ermini A., and Hayakawa M., Anomalies in VLF radio signals prior the Abruzzo earthquake (M=6.3) on 6 April 2009, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 2009, vol. 9, pp. 1727-1732, doi: 10.5194/nhess-9-1727-2009
- Rozhnoi A., Solovieva M.S., Molchanov O.A., Hayakawa M., Middle latitude LF (40 kHz) phase variations associated with earthquakes for quiet and disturbed geomagnetic conditions, *Phys. Chem. Earth*, 2004, vol. 29, pp. 589-598.
- Rozhnoi A., Solovieva M., Hayakawa M., VLF/LF signals method for searching of electromagnetic earthquake precursors Earthquake Prediction Studies, *Seismo Electromagnetics*, TERRAPUB, Tokyo, ed. Masashi Hayakawa, 2013, pp. 31-48.
- Rozhnoi A., Solovieva M., Levin B., Hayakawa M., and Fedun V., Meteorological effects in the lower ionosphere as based on VLF/LF signal observations, *NHESS*, 2014, vol. 14, pp. 2671-2679, doi: 10.5194/nhess-14-2671-2014
- Solovieva M., Rozhnoi A., Fedun V., Schwingenschuh K., and Hayakawa M., Ionospheric perturbations related to the earthquake in Vrancea area on November 22, 2014, as detected by electromagnetic VLF/LF frequency signals, *Annals of Geophysics*, 2015, vol. 58, no. 5, A0552, doi: 10.4401/ag-6827