

УДК 550.34

М.С. СОЛОВЬЕВА, А.А. РОЖНОЙ, Б.В. ЛЕВИН, В. ФЕДУН, В.Н. ЧЕБРОВ

Совместный анализ наземных и спутниковых наблюдений низкочастотных сигналов во время периодов сильной сейсмической активности в Дальневосточном регионе

Данные очень низкочастотных и низкочастотных (ОНЧ / НЧ) наблюдений, полученные на французском спутнике ДЕТЕТЕР и на наземной станции в г. Петропавловск-Камчатский, были использованы для совместной диагностики ионосферных возмущений в периоды сильной сейсмической активности в регионе Курильских островов и Японии в течение 2004–2010 гг. Для обработки наземных и спутниковых данных применялся метод, основанный на разнице между текущими значениями сигнала в ночное время и его модельными значениями. Результаты анализа показали хорошую корреляцию наземных и спутниковых наблюдений для нескольких случаев сильных землетрясений ($M \geq 6,8$).

Ключевые слова: электромагнитные сигналы, ионосфера, спутниковые наблюдения, предвестники землетрясений.

Joint analysis of ground-based and satellite observations of low-frequency signals during the periods of strong seismic activity in the Far East region. M.S. SOLOVIEVA, A.A. ROZHNOI (Institute of Physics of the Earth RAS, Moscow), B.W. LEVIN (Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk), V. FEDUN (University of Sheffield, UK), V.N. CHEBROV (Kamchatka Branch of Geophysical Survey of RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky).

Very low-frequency and low-frequency (VLF / LF) data from the French satellite DEMETER and ground-based station in Petropavlovsk-Kamchatsky have been used for joint diagnosis of the ionospheric disturbances during the periods of strong seismic activity in the region of the Kuril Islands and Japan in 2004–2010. The ground and satellite data have been processed using a method based on the difference between the real signal in nighttime and that of a model. The results of the analysis have shown a good correlation between ground-based and satellite observations for several cases of strong ($M \geq 6.8$) earthquakes.

Key words: electromagnetic signals, ionosphere, satellite observations, earthquake precursors.

Интерес к спутниковому мониторингу сейсмической активности возник около 30 лет назад после опубликования статьи [1], в которой сообщалось об усилении электромагнитной эмиссии в ионосфере перед сильными землетрясениями по наблюдениям на спутнике «Интеркосмос-19». В дальнейшем в печати появились многочисленные статьи о наблюдавшихся возмущениях в ионосфере, вероятно связанных с отдельными сильными землетрясениями или сериями землетрясений (см. обзор в [7, 10, 14]).

СОЛОВЬЕВА Мария Сергеевна – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, *РОЖНОЙ Александр Александрович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник (Институт физики Земли РАН, Москва), **ЛЕВИН Борис Вульфович – член-корреспондент РАН, директор (Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск), ***ФЕДУН Виктор – кандидат физико-математических наук, доцент (Университет Шеффилда, Великобритания), ****ЧЕБРОВ Виктор Николаевич – кандидат технических наук, директор (Камчатский филиал Геофизической службы РАН, Петропавловск-Камчатский). E-mail: *rozhnoi@ifz.ru, **nauka@imgg.ru, ***v.fedun@sheffield.ac.uk, ****chebr@emsd.ru

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 11-05-00155 и № 13-05-92602) и Европейского гранта FP7 № 262005 SEMEP.

Новая возможность исследовать эффекты в ионосферной плазме, связанные с сейсмической активностью, появилась после запуска французского спутника ДЕМЕТЕР (2004–2010 гг.). Основная научная цель спутника заключалась в изучении пре- и пост-сейсмических эффектов [15]. Первая работа, в которой сообщалось о необычном поведении электромагнитного сигнала в диапазоне до 2 кГц перед землетрясениями с $M > 6$, была опубликована в 2006 г. [13]. Позднее на основе большого статистического материала было найдено понижение уровня электромагнитного шума на частотах около 1,7 кГц за несколько часов до землетрясений с $M \geq 4,8$ [12].

Высококачественные данные, полученные на борту спутника ДЕМЕТЕР, обеспечили также интересную возможность анализировать сигналы от наземных ОНЧ / НЧ передатчиков, принимаемые над сейсмоактивными районами. Такой прием был осуществлен ранее на многих спутниках для исследования распространения низкочастотных волн и их взаимодействия с ионосферной плазмой [3, 8]. Однако в применении к долговременным сейсмическим эффектам необходимо было разработать специальные методы анализа. Первые результаты такого анализа, выполненного для нескольких сильных землетрясений, которые произошли в 2004 г. в различных регионах Земли, были опубликованы в работе [9]. Предложенный метод заключался в сравнении уровня сигналов от наземных передатчиков в зоне приема над эпицентральной областью до и после землетрясений. Очевидный эффект понижения уровня сигнал / шум в течение месяца перед катастрофическим землетрясением на Суматре в 2004 г. был позднее подтвержден в работе [2] на основе анализа данных, накопленных за 1,5 года наблюдений. После первой публикации подобные эффекты в ОНЧ / НЧ сигналах были найдены для ряда других сильных землетрясений [5, 11, 21, 22].

Недостаток этого метода состоит в том, что результаты анализа не дают возможность определить время появления аномалий. Поэтому для выявления временных вариаций сигнала авторами статьи был разработан метод разностного сигнала, аналогичный методу наземных наблюдений. В данной работе обобщены результаты совместного спутникового и наземного анализа ОНЧ / НЧ сигналов в периоды сильной сейсмической активности в регионе Курильских островов и Японии во время работы спутника ДЕМЕТЕР.

Исходные данные

Спутниковые данные. Спутник ДЕМЕТЕР двигался по солнечно-синхронной орбите на высоте примерно 700 км с углом наклона 86° . Спутник пролетал над регионами в одно и то же местное время. Ночные полуорбиты приходились на 22 ч местного времени, а дневные – на 10 ч утра.

В настоящей работе использованы данные электрической компоненты электромагнитного поля, зарегистрированной прибором ICE [4]. Регистрация сигналов от наземных ОНЧ / НЧ передатчиков осуществлялась в двух диапазонах частот: 19,53 Гц – 20 кГц (с шагом по частоте 19,53 Гц) и 3,25 кГц – 3,3 МГц (с шагом по частоте 3,25 кГц). В диапазоне до 20 кГц сигналы от отдельных передатчиков четко выделялись как пики в спектрах записи сигналов. В высокочастотном диапазоне сигналы от отдельных передатчиков практически не выделялись, поэтому возможность применять эти данные для анализа была ограничена. В основном использовались данные ОНЧ сигнала от высокоомощного NWC (19,8 кГц) передатчика, расположенного на северо-западном побережье Австралии. Распространение ОНЧ / НЧ сигналов через ионосферу различно для ночных и дневных условий. Если в дневное время зона приема сигнала ограничена областью, расположенной непосредственно над передатчиком, и магнито-сопряженной областью, то в ночное время зона приема сигнала существенно больше. Зона приема сигнала от NWC передатчика в ночное время покрывала практически все Восточное полушарие и протягивалась от 60° ю.ш. до 60° с.ш., что дало возможность применять его для анализа в Курило-Камчатском и Японском регионах.

В качестве основной характеристики ОНЧ / НЧ сигналов было использовано отношение величины амплитуды сигнала к величине шума. Амплитуда сигнала определялась исходя из того, насколько точно частота передатчика F совпадала с дискретной частотой спектра. Для NWC передатчика рассчитывалось среднее значение для двух частот – выше и ниже относительно собственной частоты передатчика. При расчете величины шума сначала определялась минимальная и максимальная частоты, в пределах которых находился «колокол» сигнала. Ширина частотного диапазона сигнала δF зависела от мощности передатчика, присутствия рядом других передатчиков, положения спутника относительно передатчика; обычно она составляла 150–300 Гц, однако для NWC передатчика (как самого мощного) δF достигала 500 Гц, когда спутник находился вблизи него. После этого в каждой точке орбиты в интервале частот $F \pm \delta F$ определялась минимальная величина, которая принималась за величину шума.

Наземные данные. Были использованы данные, полученные на ОНЧ станции в г. Петропавловск-Камчатский (РТК). Приемник измеряет одновременно амплитуду и фазу сигналов от 4 передатчиков: JY (40 кГц) и JJ (22,2 кГц) в Японии, NWC (19,8 кГц) в Австралии и NPM (21,4 кГц) на Гавайских островах с шагом дискретизации 20 с. Для JJ передатчика регистрируется только амплитуда, поскольку это не MSK (Minimal Shift Keying) модулированный сигнал, который может приниматься используемой аппаратурой. Сигнал от каждого из передатчиков оценивался для землетрясений, эпицентры которых попадали в три зоны Френеля. Координаты проекции первой зоны на поверхность Земли рассчитывались по формуле $y = [\lambda^2 / 4 + \lambda x(1 - x / D)]^{1/2}$, где λ – длина волны, x – координата вдоль трассы распространения сигнала, D – расстояние между приемником и передатчиком.

Метод анализа

Для обработки наземных и спутниковых данных использовался метод, основанный на разнице между текущими значениями сигнала и его модельными значениями. Моделью для наземных наблюдений служили среднемесячные значения амплитуды и фазы, рассчитанные по невозмущенным дням. В связи с тем, что в дневное время сигнал сильно подвержен внезапным ионосферным возмущениям, вызываемым рентгеновскими вспышками, и менее чувствителен к слабым воздействиям, для анализа был выбран ночной интервал времени.

Для спутниковых наблюдений были построены трехмерные модели значений сигнал / шум в ночное время над рассматриваемой сейсмоактивной областью как функция широты и долготы. Для построения модели использован метод локальной полиномиальной интерполяции [6], в котором вычисляются предсказанные величины исходя из измеренных значений в пределах небольшой области, размер которой задается. Весовое значение точек в пределах этой области уменьшается с расстоянием. Такая процедура дает возможность исключить случайные выбросы в данных и построить поверхность с равномерным шагом по широте и долготе.

Построение модели состояло из следующих шагов: 1) вычисление полиномиального выражения для поверхности как функции долготы и широты; 2) построение регулярной сетки с шагом $0,32^\circ$; 3) вычисление значений в узлах сетки. На основе полученных моделей по координатам текущей орбиты рассчитывались значения сигнала в каждой точке и определялось отклонение реальных данных от модельных. Ширина зоны анализа спутниковых данных составляла 25° , что было обусловлено расстоянием между соседними орбитами.

Результаты совместного анализа наземных и спутниковых данных

Метод разностного сигнала был использован для совместного (где это было возможно) наземного и спутникового анализа во время периодов сильной сейсмической

активности ($M \geq 6,8$) вблизи Японии и в районе Курильских островов. За время работы спутника ДЕТЕТЕР (2004–2010 гг.) отмечено 9 таких периодов (каталог USGS).

1. *Землетрясения в ноябре–декабре 2004 г.* В анализ включен интервал времени с 1 октября 2004 г. по 24 января 2005 г. Этот интервал характеризуется спокойным сейсмическим режимом вплоть до начала ноября и весьма сильной сейсмической активностью в ноябре и декабре в районе Северной Японии и Северных Курильских островов. Сейсмическая активность в зоне чувствительности трассы JJY–РТК определялась 3 сериями землетрясений с $M = 5,6–7,1$, чему соответствовали 3 серии аномалий в НЧ сигнале. Самое сильное за этот период землетрясение с $M = 7,1$ произошло 28 ноября вблизи о-ва Хоккайдо. Этот случай был подробно рассмотрен в работах [18, 19]. К сожалению, в октябре и декабре спутниковые данные отсутствовали, что снижает достоверность полученных результатов. Однако и для спутниковых данных наблюдалось значительное понижение уровня сигнала за несколько дней до землетрясений в ноябре.

2. *Сейсмическая активность вблизи Японии в июле–сентябре 2005 г.* Землетрясение с магнитудой $M = 7,2$ произошло 16 августа 2005 г. вблизи побережья северной части о-ва Хонсю, после чего в течение 2 недель в этом же регионе случилось еще несколько землетрясений с магнитудой $M \sim 6$. Эпицентры землетрясений находились в зоне чувствительности трасс JJY–РТК и JJL–РТК и очень близко к зоне чувствительности трассы NWC–РТК (рис. 1). Данные ОНЧ сигнала от австралийского NWC передатчика, принимаемого на спутнике, были проанализированы как в квадрате над Японией, так и в контрольной области, расположенной на тех же широтах и имеющей примерно такой же уровень сигнала, но находящейся над регионом, где в период анализа не наблюдалось землетрясений. Сравнение наземных и спутниковых наблюдений за июль–сентябрь приведено на

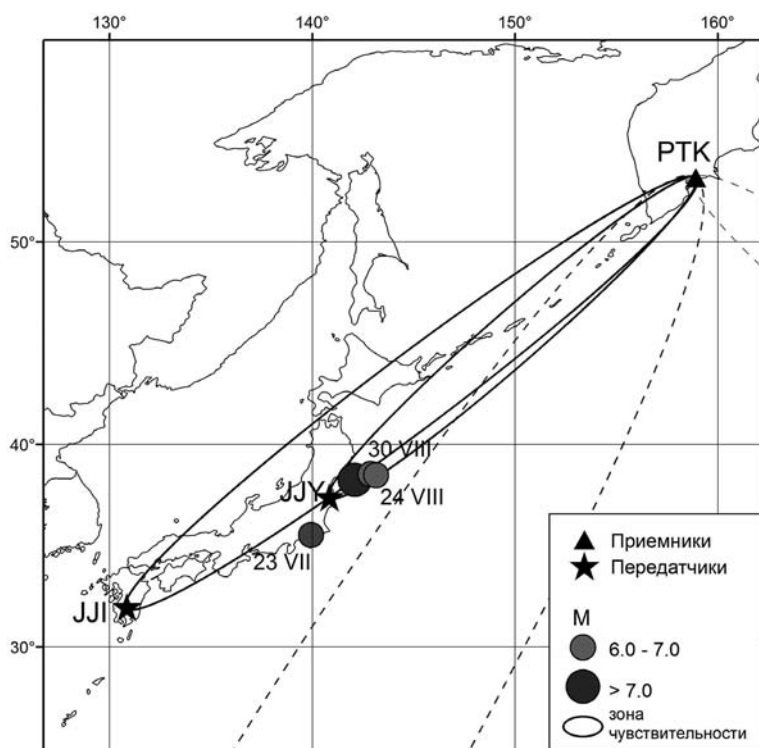


Рис. 1. Карта, показывающая положение приемника в Петропавловске-Камчатском (РТК) и японских передатчиков JJY и JJL, а также эпицентры землетрясений с $M \geq 6,0$ за период июль–сентябрь 2005 г. Эллипсы показывают зоны чувствительности (три зоны Френеля) для различных передатчиков: сплошной линией – для японских передатчиков JJY и JJL, штриховой линией – части зон для передатчиков NWC и NPM

рис. 2. На всех трассах, кроме контрольной гавайской, заметно появление аномалий в сигнале во время периода сейсмической активности. При этом характер аномалий несколько различен. Аномалии от двух японских передатчиков появляются за 2 дня до первого землетрясения и длятся до конца серии землетрясений. Наиболее отчетливо заметно общее понижение величины фазы JJY сигнала. Аномалии от NWC передатчика менее длительные. Результаты, полученные на спутнике, хорошо коррелируют с наземными наблюдениями. Аномалии в ОНЧ сигнале, в квадрате над Японией, наблюдаются за 2–3 дня перед каждым землетрясением.

3. Землетрясение 14 ноября 2005 г. с $M = 7,0$ произошло к востоку от северной части о-ва Хонсю. Этот случай для наземных наблюдений был рассмотрен в работе [17]. Возмущения в амплитуде и фазе JJY сигнала наблюдались в течение примерно двух недель перед землетрясением. К сожалению, спутниковые данные за этот период времени отсутствуют.

4. Симуширские землетрясения 15 ноября 2006 г. и 13 января 2007 г. (Курильские острова). Очень сильное землетрясение с магнитудой $M = 8,3$ произошло вблизи о-ва Симушир 15 ноября 2006 г. Серия сильных афтершоков с $M = 5–6,5$ продолжалась в течение

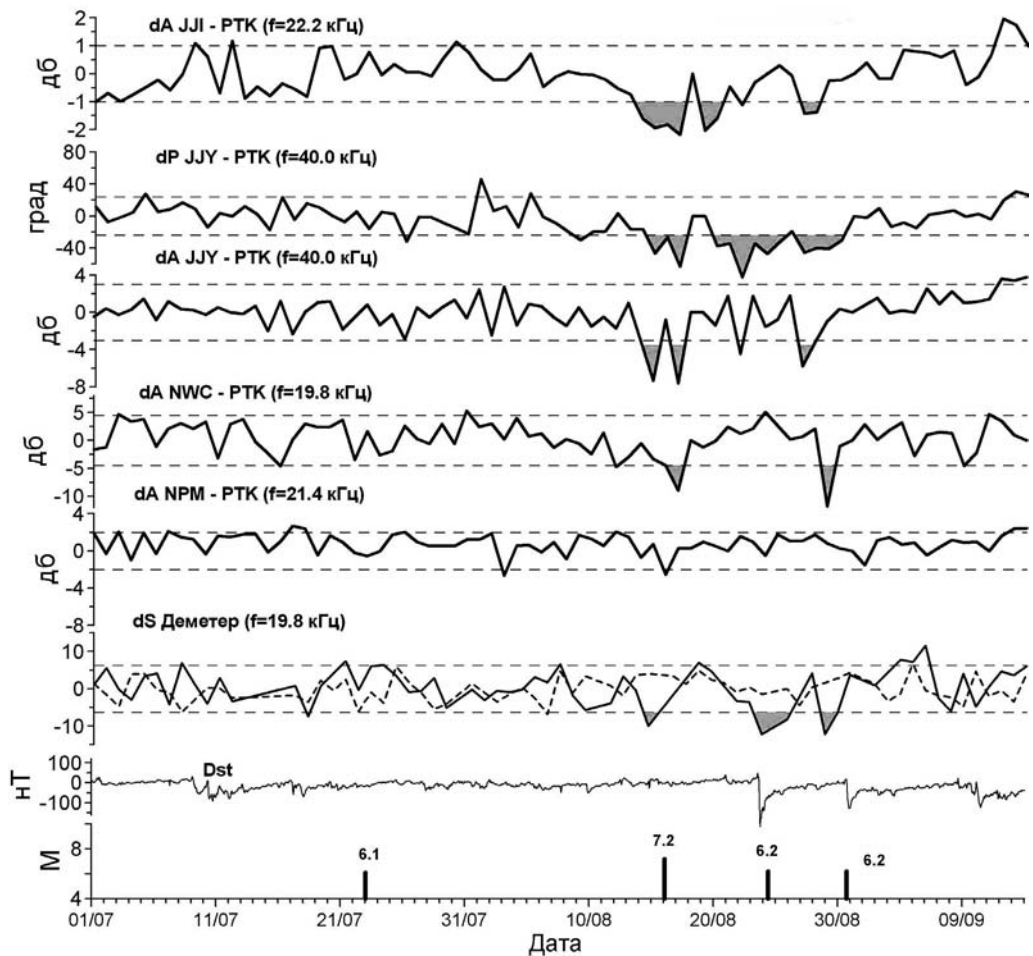


Рис. 2. Сравнение наземных и спутниковых наблюдений в период сейсмической активности в июле–сентябре 2005 г. Сверху вниз: средние ночные разностные значения сигнала для радиотрасс JJY–РТК (амплитуда), JJY–РТК (фаза и амплитуда), NWC–РТК (амплитуда) и NPM–РТК (амплитуда). Штриховая линия на графиках показывает уровень $\pm 2\sigma$. Далее представлены средние разностные значения для спутника ДЕМЕТЕР: сплошная кривая – в области над Японией, штриховая – в контрольной зоне. Внизу – Dst-индекс магнитной активности и магнитуды землетрясений

двух месяцев, после чего примерно в этой же области произошло второе сильное землетрясение с $M = 8,2$. Положение эпицентра землетрясения 15 ноября и его афтершоков приведено на рис. 3. Эпицентр землетрясения находился внутри зоны чувствительности трасс JJY–РТК, JJI–РТК и NWC–РТК. Для спутникового анализа были использованы данные, полученные на участке орбит, проходящих над сейсмоактивной областью. Пример такой орбиты показан на рис. 3. Детальный характер аномалий, зарегистрированных в период с 1 октября 2006 г. по конец января 2007 г. в наземных и спутниковых данных, рассмотрен в работе [16]. Здесь приводятся только окончательные результаты совместного анализа (рис. 4). Как для спутниковых, так и для наземных наблюдений аномалии отмечались в течение очень длительного периода времени. Значительное понижение амплитуды сигнала в спутниковых и наземных данных начинается за две недели до землетрясения и длится до середины декабря. В это же время отмечаются положительные аномалии в фазе JJY сигнала. Амплитудные аномалии ОНЧ сигнала всегда имеют отрицательные отклонения от нормального хода сигнала. Такие аномалии наблюдаются во время магнитных бурь, движения потоков электронов и протонов, изменения атмосферного давления, а также во время сейсмической активности, распространения цунами и извержения вулканов. Отрицательный характер амплитудных аномалий объясняется потерями сигнала на ионосферных неоднородностях во время распространения. Фазовые аномалии могут быть как положительными, так и отрицательными. Это зависит от длины пути распространения сигнала. Высота области отражения в ионосфере при появлении неоднородностей меняется, таким образом изменяется длина пути сигнала, и разница фаз между приемником и передатчиком может сдвигаться в одну или другую сторону.

Что касается второго Симуширского землетрясения, 13 января 2007 г., то небольшая аномалия сигнала за несколько дней перед ним наблюдается только в спутниковых данных. Возмущение в JJY сигнале было зарегистрировано в наземных данных 7–8 января, но величина этого возмущения незначительна по сравнению с очень сильными аномалиями,

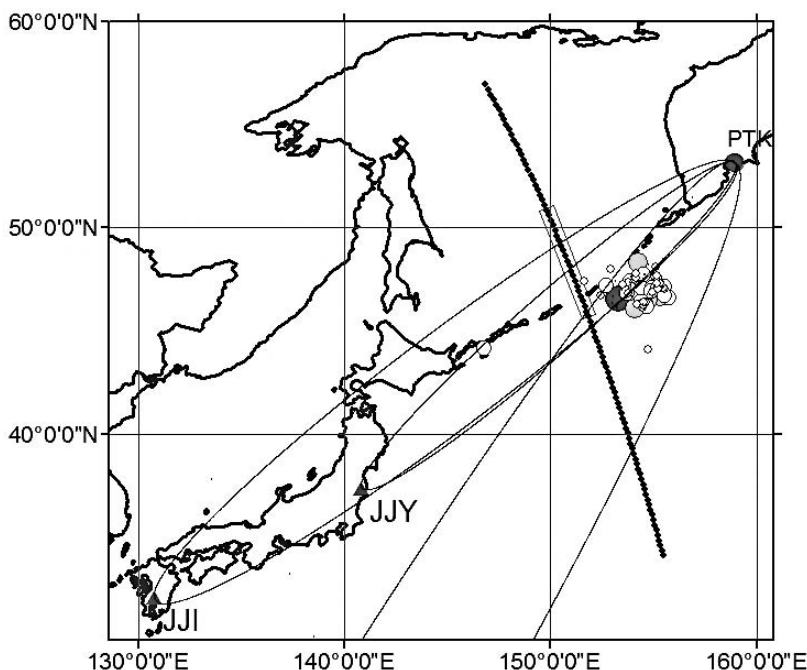


Рис. 3. Положение эпицентра землетрясения 15 ноября 2006 г. и его афтершоков. Эллипсами изображены 3 зоны Френеля для передатчиков JJY, JJI и NWC. Наклонная жирная линия показывает положение одного из участков орбиты спутника ДЕМЕТЕР, для которой был сделан анализ. Выделена часть орбиты, где наблюдались эффекты

проявившимися до и после первого землетрясения. Длительные и сильные возмущения сигнала, отмечавшиеся как в наземных, так и в спутниковых данных в течение месяца после первого землетрясения, вызваны, скорее всего, постсейсмической разрядкой. Однако нельзя исключить возможность, что они могут быть также пресеismicким эффектом второго землетрясения. В данном случае эти эффекты нельзя разделить с полной уверенностью.

5. *Сейсмическая активность в Японии в мае–июле 2008 г.* В этот период 3 землетрясения произошли в северной части о-ва Хонсю и вблизи него: 7 мая ($M = 6,8$), 13 июня ($M = 6,9$) и 19 июля ($M = 7,0$). При анализе двух первых землетрясений в работе [20] как для наземных, так и для спутниковых наблюдений использованы данные, полученные от японского передатчика JJY (40 кГц). Это было возможно сделать, поскольку эпицентр первого землетрясения находился в зоне уверенного приема сигнала 40 кГц на борту ДЕМЕТЕР, а эпицентр второго землетрясения – очень близко к ней. В отличие от NWC передатчика, зона приема которого захватывает почти все Восточное полушарие, зона приема от JJY передатчика покрывает небольшую область с радиусом примерно в 1000 км, расположенную к югу от передатчика. Эффекты, найденные в наземных трассах для первого землетрясения, 7 мая, точно совпадают с эффектами, найденными на спутнике. Сильное понижение сигнала наблюдалось в течение 3–4 дней за 3 дня до землетрясения. Для второго землетрясения, 13 июня, такого хорошего совпадения в наземных и спутниковых данных найдено не было, возможно потому, что его эпицентр находился за пределами зоны приема сигнала на спутнике.

В данной работе совместно с наземными данными для анализа землетрясений 13 июня и 19 июля используются данные наблюдений NWC передатчика, полученные на спутнике ДЕМЕТЕР. Эпицентр землетрясения 13 июня находился внутри зоны чувствительности трассы JJI–РТК, эпицентр землетрясения 19 июля был за пределами зон чувствительности наземных трасс. Сравнение наземных и спутниковых наблюдений за период с 1 июня по 31 августа 2008 г. представлено на рис. 5. Понижение сигнала как в наземных, так и в спутниковых данных явно заметно за 2–3 дня до первого землетрясения. Для второго никакого эффекта не наблюдается в наземных данных. В спутниковых же данных значительное и длительное понижение сигнала заметно за 10 дней до землетрясения и второе понижение – накануне землетрясения.

6. *Землетрясения в районе Центральных Курильских островов.* Эпицентр сильного землетрясения 15 января 2009 г. с $M = 7,4$ находился в стороне от зон чувствительности

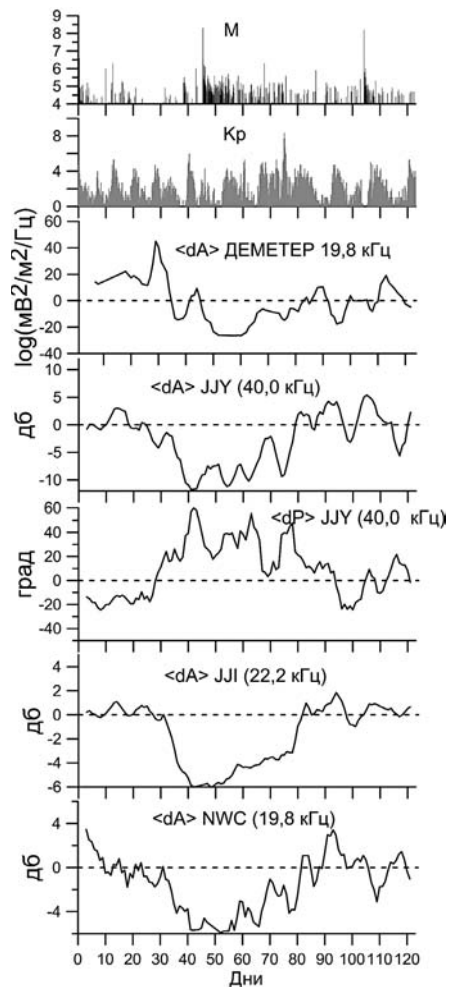


Рис. 4. Сравнение наземных и спутниковых наблюдений за период с 1 октября 2006 г. до конца января 2007 г. Сверху вниз: магнитуды землетрясений, Kp-индекс магнитной активности, средние разностные значения амплитуды NWC сигнала на спутнике ДЕМЕТЕР, средние за ночь разностные значения для радиотрасс JJY–РТК (амплитуда и фаза), JJI–РТК (амплитуда) и NWC–РТК (амплитуда)

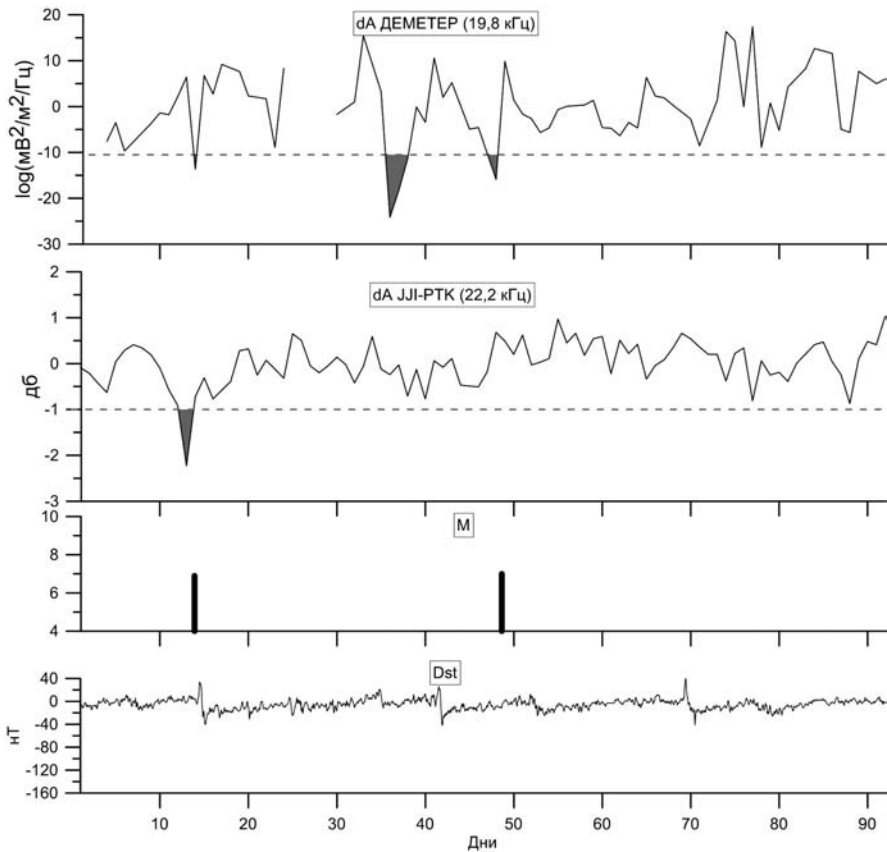


Рис. 5. Сравнение наземных и спутниковых наблюдений за период с 1 июля до конца августа 2008 г. Сверху вниз: средние разностные значения амплитуды NWC сигнала на спутнике ДЕМЕТЕР, средние за ночь разностные значения амплитуды сигнала для радиотрассы JJ1-PTK, магнитуды землетрясений, Dst-индекс магнитной активности. Здесь и на рис. 6 штриховая линия на графиках показывает уровень -2σ

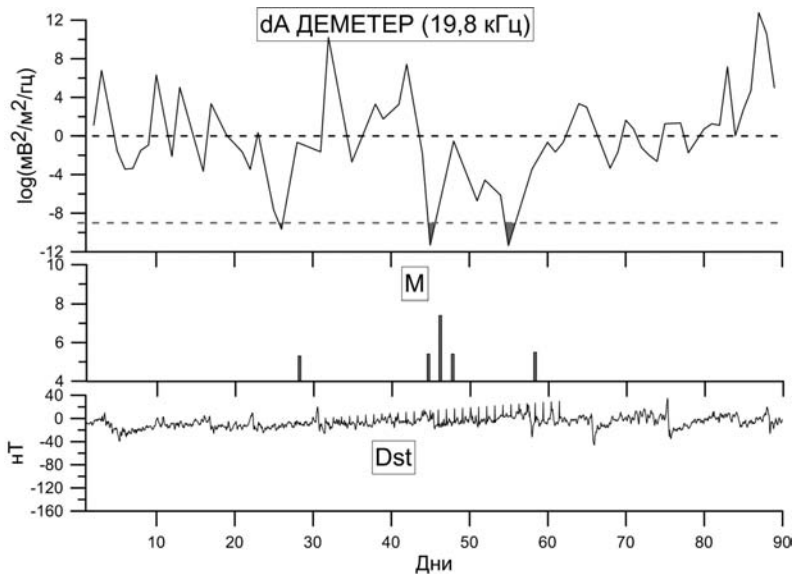


Рис. 6. Средние разностные значения амплитуды NWC сигнала на спутнике ДЕМЕТЕР за период с 1 декабря 2008 г. до конца февраля 2009 г. Ниже – магнитуды землетрясений и Dst-индекс магнитной активности

наземных трасс, и анализ был выполнен только для данных спутника ДЕМЕТЕР (рис. 6). Помимо этого землетрясения в зону спутникового анализа попало еще несколько землетрясений с $M \sim 5,5$. За период анализа с 1 декабря 2008 г. по 28 февраля 2009 г. в спутниковых данных наблюдается три значительных понижения уровня сигнала, каждое из которых происходит за 2–3 дня перед землетрясением.

Заключение

Результаты совместного анализа наземных и спутниковых данных, полученных за период работы спутника ДЕМЕТЕР, сведены в таблицу.

Наличие аномалий в ОНЧ/НЧ сигналах перед сильными землетрясениями в Дальневосточном регионе

Дата	Магнитуда	Глубина, км	Наличие аномалий	
			наземные наблюдения	спутниковые наблюдения
28.11.2004	7,1	39	+	+
16.08.2005	7,2	36	+	+
14.11.2005	7,0	11	+	–
15.11.2006	8,3	34	+	+
13.01.2007	8,2	11	±	+
7.05.2008	6,8	35	+	+
13.06.2008	6,9	10	+	+
19.07.2008	7,0	22	–	+
15.01.2009	7,4	36	–	+

Примечание. Прочерк – спутниковые данные отсутствуют, наземные – вне зоны чувствительности.

В целом наблюдается хорошее совпадение наземных и спутниковых результатов. Для спутниковых наблюдений аномалии в сигнале были найдены для всех землетрясений при условии полноты данных. Для наземных наблюдений аномалии отмечались, если эпицентры землетрясений находились внутри зон чувствительности анализируемых трасс.

Такой совместный анализ обеспечивает взаимную корреляцию наблюдений и повышает надежность полученных результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мигулин В.В., Ларкина В.И., Молчанов О.А., Наливайко А.В., Гохберг М.Б., Пилипенко В.А., Липеровский В.А., Похотелов О.А., Шалимов С.Л. Обнаружение эффектов воздействия землетрясений на ОНЧ–КНЧ шумы во внешней ионосфере. ИЗМИРАН, 1982. 28 с. (Препр.; № 25(390).
2. Соловьева М.С., Рожной А.А., Молчанов О.А. Вариации параметров СДВ сигналов на спутнике ДЕМЕТЕР во время сейсмической активности // Геомагнетизм и аэрномия. 2009. Т. 49, № 4. С. 558–568.
3. Aubrey M.P. Six-component observation of VLF signal on FR-1 satellite // J. Atmos. Terr. Phys. 1968. Vol. 30. P. 1161–1169.
4. Berthelier J.J., Godefroy M., Leblanc F., Malingre M., Menvielle M., Lagoutte D., Brochot J.Y., Colin F., Elie F., Legendre C., Zamora P., Benoist D., Chapuis Y., Artru J. ICE, The electric field experiment on DEMETER // Planetary and Space Science. 2006. Vol. 54, iss. 5. P. 456–471.
5. Boudjada M.Y., Schwingenschuh K., Biernat H.K., Berthelier J.J., Blecki J., Parrot M., Stachel M., Aydogar O., Stangl G., Weingrill E. Similar behaviors of natural ELF / VLF ionospheric emissions and transmitter signals over seismic Adriatic regions // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 2008. Vol. 8. P. 1229–1236.
6. Gandian L.S. Objective analysis of meteorological fields. Leningrad: Gidrometizdat, 1963. 287 p. (Transl. by the Israel Programme for scientific translations, Jerusalem, 1965).
7. Hayakawa M. Electromagnetic precursors of earthquakes: Review of recent activities // Rev. Radio Sci. 1993–1995. Oxford: Oxford Univ. Press, 1997. P. 807–818.
8. Inan U.S., Helliwell R.A. DE-1 observations of VLF transmitter signals and wave-particle interaction in the magnetosphere // Geophys. Res. Lett. 1982. Vol. 9. P. 917–923.

9. Molchanov O.A., Rozhnoi A., Solovieva M., Akentieva O., Berthelier J.-J., Parrot M., Lefeuvre F., Biagi P.-F., Castellana L., Hayakawa M. Global diagnostics of ionospheric perturbations associated with seismicity using VLF transmitter signals received on DEMETER satellite // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2006. Vol. 6. P. 745–753.
10. Molchanov O.A., Hayakawa M., Afonin V.V., Akentieva O.A., Mareev E.A. Possible influence of seismicity by gravity waves on ionospheric equatorial anomaly from data of IK-24 satellite 1. Search for idea of seismo-ionosphere coupling // *Seismo Electromagnetics: Lithosphere–Atmosphere–Ionosphere Coupling* / eds M. Hayakawa, O. Molchanov. Tokyo: Terrapub., 2002. P. 275–285.
11. Muto F., Yoshida M., Horie T., Hayakawa M., Parrot M., Molchanov O.A. Detection of ionospheric perturbations associated with Japanese earthquakes on the basis of reception of LF transmitter signals on the satellite DEMETER // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2008. Vol. 8. P. 135–141.
12. Nemeč F., Santolík O., Parrot M. Decrease of intensity of ELF / VLF waves observed in the upper ionosphere close to earthquakes: A statistical study // *J. Geophys. Res.* 2009. Vol. 114, A04303. doi:10.1029/2008JA01397.
13. Parrot M., Berthelier J.J., Lebreton J.P., Sauvaud J.A., Santolík O., Bleck J. Examples of unusual ionospheric observations made by the DEMETER satellite over seismic regions // *Phys. Chem. Earth.* 2006. Vol. 31, N 4–9. P. 486–495.
14. Parrot M., Achache J., Berthelier J.J., Blanc E., Deschamps A., Lefeuvre F., Menvielle M., Planet J.L., Tarits P., Villain J.P. High-frequency seismo-electromagnetic effects // *Phys. Earth Planet. Inter.* 1993. Vol. 77. P. 65–83.
15. Parrot M. The micro-satellite DEMETER: data registration and data processing // *Seismo Electromagnetics: Lithosphere–Atmosphere–Ionosphere Coupling* / eds M. Hayakawa, O. Molchanov. Tokyo: Terrapub., 2002. P. 660–670.
16. Rozhnoi A., Solovieva M., Parrot M., Hayakawa M., Biagi P.-F., Schwingenschuh K. Ionospheric turbulence from ground-based and satellite VLF / LF transmitter signal observations for the Simushir earthquake (November 15, 2006) // *Annals Geophysics.* 2012. Vol. 55, N 1. P. 187–192. doi: 10.4401/ag-5190.
17. Rozhnoi A., Solovieva M., Molchanov O., Biagi P.-F., Hayakawa M. Observation evidences of atmospheric Gravity Waves induced by seismic activity from analysis of subionospheric LF signal spectra // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2007. Vol. 7. P. 625–628.
18. Rozhnoi A., Molchanov O., Solovieva M., Gladyshev V., Akentieva O., Berthelier J.J., Parrot M., Lefeuvre F., Hayakawa M., Castellana L., Biagi P.-F. Possible seismo-ionosphere perturbations revealed by VLF signals collected on ground and on a satellite // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2007. Vol. 7. P. 617–624.
19. Rozhnoi A.A., Solovieva M.S., Molchanov O.A., Chebrov V., Voropaev V., Hayakawa M., Maekawa S., Biagi P.-F. Preseismic anomaly of LF signal on the wave path Japan–Kamchatka during November–December 2004 // *Phys. Chem. Earth.* 2006. Vol. 31. P. 422–427.
20. Rozhnoi A., Solovieva M., Molchanov O., Biagi P.-F., Hayakawa M., Schwingenschuh K., Boudjada M., Parrot M. Variations of VLF / LF signals observed on the ground and satellite during a seismic activity in Japan region in May–June, 2008 // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2010. Vol. 10. P. 529–534.
21. Slominska E., Bleck J., Parrot M., Slominski J. Satellite study of VLF ground-based transmitter signals during seismic activity in Honshu Island // *Phys. Chem. Earth. Parts A.B.C.* 2008. doi: 10.1016/j.pce.2008.06.016.
22. Yu F.H., Yang D.M., Chen H.R., Qian J.D., Zhu R., Parrot M. SNR changes of VLF radio signals detected onboard the DEMETER satellite and their possible relationship to the Wenchuan earthquake // *Science in China. Series D: Earth Sciences.* 2009. Vol. 52, N 6. P. 754–763.