

Анализ проявления в ионосфере крупномасштабных перемещающихся неоднородностей, ассоциированных с землетрясениями, по комплексным измерениям

Н.П. Сергеев¹, И.Е. Захаренкова², И.И. Шагимурагов²,
А.В. Сазанов¹, М.В. Рогова¹

¹ Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн (ИЗМИРАН) РАН, Троицк (Московская обл.)

² Западное отделение ИЗМИРАН, Калининград

Аннотация. GPS наблюдения были использованы для обнаружения в пространственном распределении TEC макромасштабных положительных ионосферных неоднородностей, появляющихся в окрестностях эпицентров сильных землетрясений ($M \geq 5$). Неоднородности возникают за несколько часов до землетрясений и движутся горизонтально с околосвуковой скоростью примерно по дуге большого круга, проходящего через соответствующий эпицентр. Ранее данные неоднородности были выявлены с использованием ионозондовых измерений. В данной работе представлен анализ реакции ионосферы на землетрясения для двух событий. Первое событие представляет собой случай обособленного очень сильного землетрясения, второе – совокупность сильных землетрясений, инициировавших возникновение целой группы крупномасштабных неоднородностей в ионосфере. Анализ показал эффективность использования GPS наблюдений глобальной сети станций для обнаружения крупномасштабных перемещающихся неоднородностей, которые можно ассоциировать с предвестниками землетрясений и, следовательно, использовать наряду с другими данными, для прогноза.

Abstract. GPS observations of IGS (International Geodynamic Service) network have been used to detect the ionospheric irregularities associated with earthquake precursors. Analyses of GPS-derived TEC data have confirmed a hypothesis about occurrence in the vicinity of strong earthquakes ($M > 5$) epicenters macroscale positive ionospheric inhomogeneities. They arise for 10-15 hours before earthquakes and move horizontally approximately on an arc of a major circle transiting through the epicenter with a transonic speed. The verification of this hypothesis has been performed for two cases – the isolated event of August 17, 1999 and the second one – of May 6, 1999, when 9 spatial and time spaced shocks took place. For these nine earthquakes ($M > 5$) the corresponding group of ionosphere irregularities has been identified. The received results have shown the opportunity of using GPS technique to detect, on world-wide scale, ionospheric irregularities associated with ionospheric precursors and consequently to use for the short-term forecast of strong earthquakes.

1. Введение

Землетрясения, извержения вулканов, цунами и другие крупномасштабные природные катастрофы, вызывающие многочисленные разрушения, ежегодно уносят тысячи человеческих жизней. Поэтому прогнозирование и своевременное предупреждение о приближающихся катастрофах остается одной из важнейших нерешенных задач современной геофизики.

Уже давно известно, что многие сильные землетрясения предваряются физическими и другими явлениями, которые можно зарегистрировать или измерить. Эти явления принято называть предвестниками землетрясений. Процесс подготовки сильного землетрясения очень длителен и охватывает значительные области в несколько тысяч км². Наряду с геодинамическими эффектами в земной коре сейсмическая активность сопровождается интенсивным гидродинамическим, электромагнитным и химическим воздействием очага землетрясения на атмосферу и ионосферу. Результатом такого воздействия является появление за дни и часы до главного толчка многочисленных аномалий полей и параметров околоземного пространства.

Поиски ионосферных предвестников землетрясений ведутся уже несколько десятилетий. Наиболее ранними работами были исследования электромагнитных явлений, которые наблюдались до и после мощных землетрясений (*Larkina et al.*, 1983; *Гайворонская, Зеленова*, 1989). Наряду с ними проводились исследования по обнаружению ионосферных предвестников землетрясений (*Литеровский и др.*, 1992). Достаточно убедительные свидетельства ионосферных вариаций, ассоциированных с землетрясениями, представлены в работах (*Пулинец и др.*, 1998; *Pulinets et al.*, 2003; *Pulinets, Boyarchuk*, 2004; *Краткосрочный...*, 1999). Согласно этим исследованиям, сейсмо-ионосферные аномалии (положительные или отрицательные) обычно появляются за несколько дней или часов до землетрясения.

В работах (Калинин, Сергеенко, 2002; Kalinin et al., 2003) было впервые обращено внимание на существование в области главного максимума ионосферы неизвестного ранее геофизического объекта – макромасштабных неоднородностей положительного знака. Они возникают за несколько часов до сильных землетрясений ($M > 5$) в окрестностях эпицентров и затем приходят в движение. Их существование до недавнего времени не было обнаружено, хотя сведения о движении макромасштабных неоднородностей пониженной концентрации, возникающих после землетрясения, имелись давно (Tiuri, Kraus, 1963).

В настоящей работе исследуется динамика таких неоднородностей по данным о полном электронном содержании (total electron content – TEC), полученным по регулярным наблюдениям глобальной навигационной системы GPS (Global Positioning System) международной сети станций IGS (International Geodynamic Service). Стоит отметить, что в отличие от станций ВЗ, количество которых год от года неизменно сокращается, число станций GPS-IGS неуклонно увеличивается, непрерывно работающие станции поставляют данные с высоким временным разрешением. Эти преимущества позволяют получить оценку пространственных масштабов и временной динамики сейсмо-ионосферных неоднородностей.

Параметр TEC достаточно точно следит за состоянием ионосферного слоя F2 и его пространственно-временными изменениями. Накопленный однородный материал позволяет проводить детальное исследование поведения TEC для конкретной местности, а также дополнить алгоритмы анализа обнаружения сейсмоаномалий в ионосферной плазме (Ruzhin et al., 2002).

2. Экспериментальные данные

В качестве исходного материала служили данные о полном электронном содержании ионосферы TEC, полученные по GPS наблюдениям.

Как известно, GPS техника обеспечивает измерение групповых и фазовых задержек сигналов $L_1 = 1575$ МГц и $L_2 = 1228$ МГц с 30-секундным интервалом одновременно для всех спутников, находящихся в зоне радиовидимости над отдельной станцией. Одновременно 6-8 и более спутников могут наблюдаться в секторах различных азимутов. Как групповые, так и фазовые задержки являются относительными, так как содержат неизвестные аппаратные задержки или неизвестную начальную фазу. Для получения абсолютной величины задержек и восстановления суточной вариации TEC над станцией использовалась методика, представленная в работе (Baran et al., 1997). В соответствии с ней инструментальная задержка и абсолютное значение TEC рассчитываются, используя измерения всех пролетов спутников над станцией на 24-часовом интервале. В расчетах ионосфера аппроксимируется в виде тонкого слоя, расположенного на фиксированной высоте ($h = 400$ км). Для пересчета наклонного (вдоль луча) TEC в вертикальный используется геометрический фактор. В результате применения этой процедуры мы получаем как суточную вариацию TEC над станцией наблюдения, так и возможность анализа вариации абсолютной величины TEC вдоль траектории пролета для всех 24 спутников системы GPS.

Поиски электромагнитных предвестников землетрясений в ионосфере осуществляются в основном посредством регистрации отклонений в фоновом состоянии ионосферной плазмы. Отклонения фонового состояния, определяющие момент землетрясений, фиксируются, как правило, относительно средних значений уровня электронной концентрации в максимуме слоя F2. Электронная концентрация в максимуме слоя F2 ионосферы является одним из наиболее чувствительных параметров, связанных с сейсмической активностью. Параметр TEC достаточно точно следит за состоянием ионосферного слоя F2 и его пространственно-временными изменениями, коэффициент корреляции между параметрами TEC и f_oF2 может достигать 0,9 (Houminer, Soicher, 1996; Krankowski et al., 2004). Таким образом, в настоящее время использование TEC является одним из наиболее эффективных средств в изучении пространственно-временной модификации ионосферы.

В данной работе исследование проводилось на основе анализа глобальных карт TEC в формате IONEX, построенных по данным сети GPS-IGS с двухчасовым интервалом (Schaer, 1999). Карты строятся с использованием данных от более чем 150 станций, распределенных по всему миру. Ошибка построения карт для северного полушария на широтах 20-80° составляет 2-3 TECU (Wilson et al., 1995; Manucci et al., 1998). В то же время стоит отметить, что из-за неравномерного распределения GPS станций в отдельных труднодоступных местах точность построения карт уменьшается. GPS TEC-карты тестировались посредством сравнения результатов с другими исследованиями, такими как TOPEX/POSEIDON, VLBI, установки некогерентного рассеяния (Jakowski, Sardon, 1996; Codrescu et al., 1999). Эти сравнения свидетельствуют о хорошем согласии карт с другими измерениями.

При анализе используются дифференциальные карты TEC, которые представляют собой относительные отклонения значений TEC в конкретный день от медианных. Погрешности построения карт могут достигать наибольших значений для участков, расположенных над океанами. Так как при построении карт ежедневно используется один и тот же массив данных, то погрешность построения карт

для разных дней одна и та же. Таким образом, на точность построения дифференциальных карт эта погрешность не оказывает существенного влияния.

Кроме этого, для анализа привлекались данные наземного вертикального зондирования о критической частоте слоя F2.

3. Результаты и обсуждение

3.1. Землетрясение в Турции 17.08.1999

Обнаружение ионосферных эффектов землетрясений усложняется за счет фоновых вариаций день ото дня, а также в периоды геомагнитных возмущений, когда значительно более сильные вариации параметров ионосферы "маскируют" более слабые сейсмо-ионосферные эффекты. Потому обязательным является изучение поведения индексов геомагнитной активности.

Рассмотрим геомагнитную ситуацию накануне землетрясения в Турции 17 августа 1999 г., магнитуда землетрясения составила $M=7.8$, главный удар произошёл в 00.01 UT (03.01 LT) с географическими координатами $40.75^{\circ}N, 29.86^{\circ}E$, что ~ 11 км южнее города Измир. В предыдущие сутки 16.08.1999 в ~ 06 ч UT в геомагнитном поле произошла умеренная буря, причём главная фаза наступила в ~ 10 ч UT. На рис. 1 приведены вариации AE , Dst и Kp -индексов. Буря сопровождалась возмущением в ионосфере. Ниже на рисунке показаны вариации $\delta f_0F2(t)$ для нескольких среднеширотных станций наземного вертикального зондирования.

Параметр $\delta f_0F2 = (f_0F2_{\text{тек}} - f_0F2_{\text{ск.мед}}) / f_0F2_{\text{ск.мед}}$ используется в ионосферном прогнозировании в качестве характеристики возмущённости слоя F2. На рисунке видно, что в максимуме слоя F2 на большинстве станций наблюдалось отрицательное возмущение, и по этим данным практически невозможно выделить положительные "импульсы", характеризующие макромасштабные неоднородности.

Для обнаружения подобных крупномасштабных структур, перемещение которых имеет планетарный характер, необходимы данные о динамике ионосферных параметров в глобальном масштабе. Для анализа этих неоднородностей эффективно используются глобальные ТЕС-карты. Для обнаружения сейсмо-ионосферных аномалий были построены дифференциальные карты ежедневных изменений ТЕС ($\delta\text{ТЕС}$). Дифференциальные ионосферные ТЕС-карты созданы с помощью вычисления вариаций полного электронного содержания ионосферы перед землетрясением относительно ТЕС-карт, созданных для невозмущенных состояний.

На рис. 2 представлены мировые карты изолиний $\delta\text{ТЕС} \% 16.08.1999$ с интервалом два часа. Здесь

$$\delta\text{ТЕС} = (\text{ТЕС} - \text{ТЕС}_{\text{ср}}) / \text{ТЕС}_{\text{ср}},$$

где $\text{ТЕС}_{\text{ср}}$ – скользящее на каждый день среднее с шириной окна в 5 дней. Цифрами отмечено время нахождения неоднородности в данном пункте. С учётом двухчасового интервала представленных карт приблизительное время её возникновения в районе эпицентра ~ 10 UT и скорость движения ~ 1300 км/час. Данные $\delta\text{ТЕС}$ чётко иллюстрируют возникновение положительной неоднородности и её динамику на фоне отрицательного ионосферного возмущения.

На рис. 3 на фрагменте карты в проекции Меркатора представлено географическое положение зарегистрированной неоднородности. Черным кружком отмечено место эпицентра, а выходящий из него отрезок дуги большого круга условно представляет траекторию движения неоднородности, отмеченной пунктирными квадратами, цифры в квадратах означают округлённое время (UT) нахождения

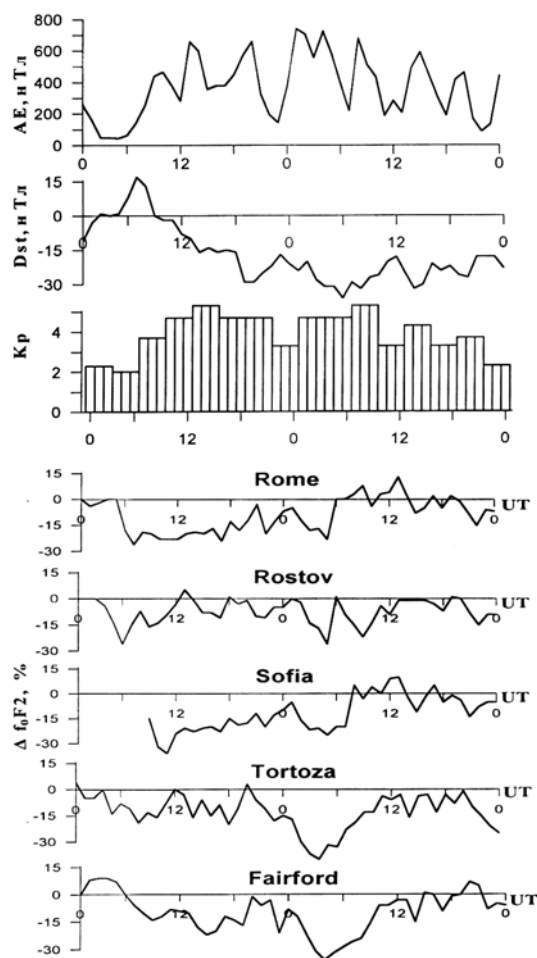


Рис. 1. Вариации AE , Dst , Kp -индексов и временная изменчивость относительной вариации критической частоты $\delta f_0F2(t)$ на цепочке ионосферных станций 16-17 августа 1999 г.

неоднородности в данном пункте. Совокупность данных, приведённых на рис. 2 и 3, представляет основной признак обнаружения неоднородности и "привязки" её именно к данному землетрясению. Неоднородность возникает с заблаговременностью $\Delta t_0 \sim -14$ ч, за это время она переместилась примерно на $17 \cdot 10^3$ км. Для краткосрочного прогнозирования наиболее существенны два параметра: заблаговременность возникновения неоднородности Δt_0 и скорость её кажущегося перемещения V_0 . Эти величины не являются полностью независимыми, поскольку и положение неоднородности до землетрясения, и проведение интерполирующей траектории её движения на сегодня не являются полностью формализованными процедурами. Вместе с тем, для V_0 по данным 35 землетрясений могут быть названы значения $V_0 \approx 0,8 \div 1,3 \cdot 10^3$ км/ч (порядка скорости звука в воздухе у поверхности Земли) и для $\Delta t_0 \sim -14$ ч (Калинин и др., 2005). При заблаговременности прогноза не менее 1 ч даже в наиболее неблагоприятном случае $\Delta t_0 = -10$ ч остаётся время порядка 9 ч для того, чтобы принять (или не принять) решение об обнаружении факта существования макромасштабной неоднородности и, соответственно, прогнозирования (или не прогнозирования) землетрясения.

Описанная ситуация соответствует случаю, когда априорно известно время и место землетрясения. Кроме того, известно, что на интервале $|\Delta t| < 24$ ч нет других сильных землетрясений, по крайней мере, в восточном полушарии Земного шара. Ситуация заметно усложняется, когда это не так.

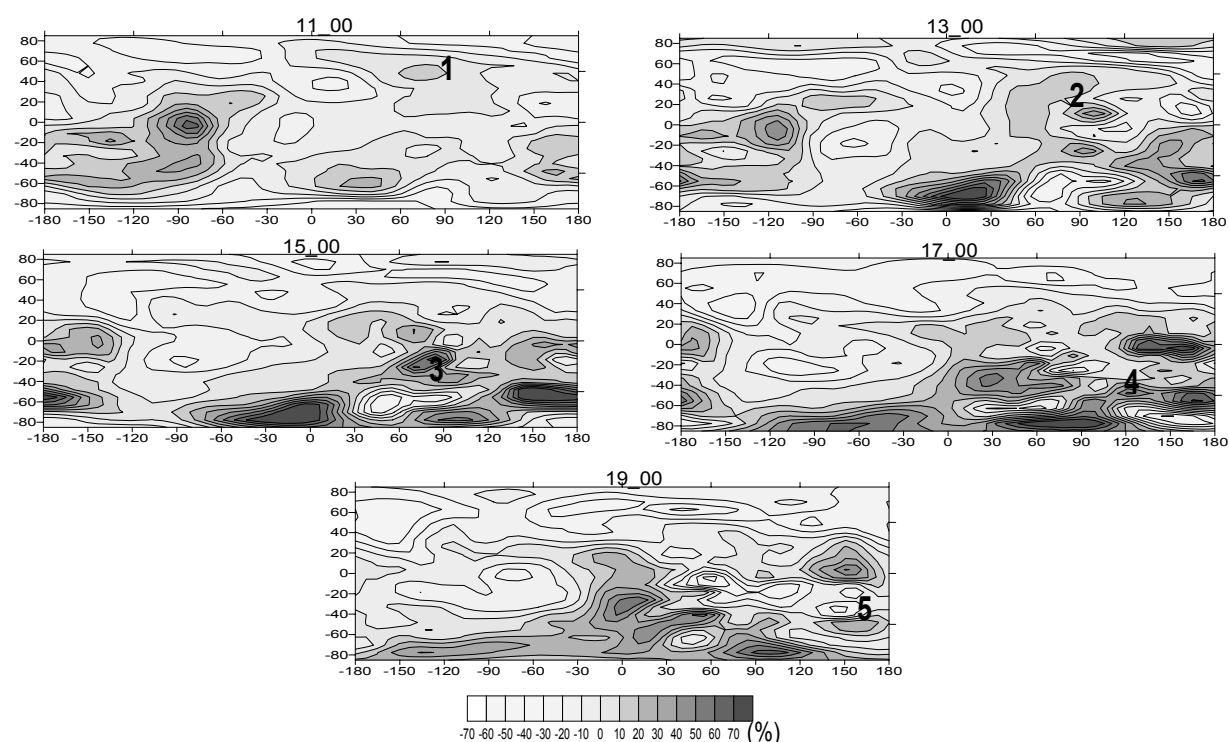


Рис. 2. Мировые карты $\delta T E S$ 16.08.1999 с интервалом 2 часа

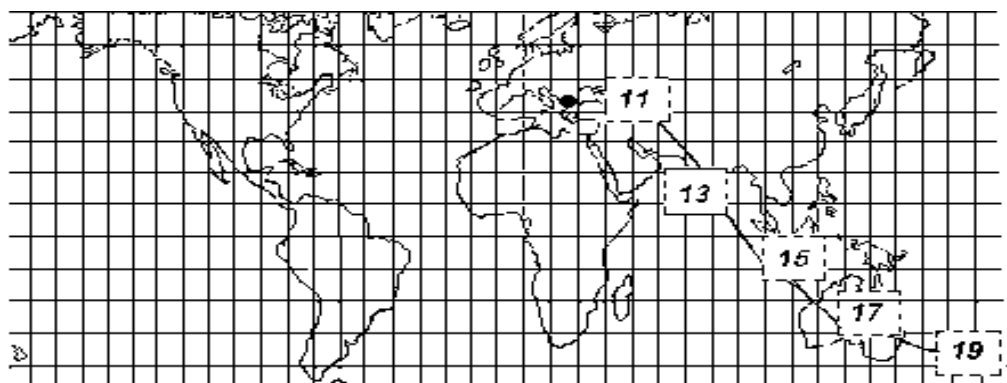


Рис. 3. Положение эпицентра Турецкого землетрясения 17 августа 1999 г. и динамика положительной макромасштабной неоднородности, появившейся при подготовке землетрясения 16.08.1999

3.2. Серия землетрясений 6 мая 1999

Рассмотрим сутки 06 мая 1999 г., когда было 9 землетрясений с магнитудой $M \geq 5$. Данные о них приведены в табл. 1. Положение эпицентров дано квадратиками на карте в проекции Меркатора (рис. 4). Цифры внутри квадратиков соответствуют номеру землетрясения в таблице. Данные $\delta T E C$ в этом примере использованы при совместном рассмотрении данных вертикального зондирования ионосферы сети наземных станций и данных АИС, расположенной на борту КС "Мир". Так, согласно работам (Danilkin, 2001; Danilkin et al., 2005) на плоскости высотно-частотной характеристики бортовой АИС в отдельных случаях, кроме стандартных следов, обусловленных процессом вертикального отражения от земной поверхности, изредка в области частот выше критической наблюдаются аномальные треки с большим временем запаздывания. Для объяснения свойств таких сигналов достаточно предположить, что КС "Мир" пролетала рядом с макромасштабной положительной неоднородностью (с той или другой стороны), что иллюстрировалось соответствующими траекторными расчётами.

Таблица 1. Время, координаты, глубина и магнитуды землетрясений, происходивших 06 мая 1999 г.

№	Время начала, UT	Широта φ , град	Долгота λ , град	Глубина, км	Магнитуда, M
1	040123.88	19.25	145.53	164	5.00
2	041926.72	56.48	-152.86	24	5.10
3	065446.12	-11.22	66.08	10	5.30
4	090508.29	-32.79	-179.37	109	5.20
5	111530.98	-5.32	141.76	40	5.20
6	132132.30	-34.02	-178.97	33	5.50
7	135635.70	-5.25	141.71	33	5.10
8	230053.12	29.50	51.88	33	6.30
9	231324.85	29.40	51.90	33	5.30

На рис. 4 толстой пунктирной линией (от Японии до Южно-Китайского моря) показаны места, в которых бортовой ионозонд зарегистрировал на ионограммах аномальные следы. Расчёты показали, что спутниковая регистрация края неоднородности на всём участке траектории КС, представленной на рис. 4, длиной около $5 \cdot 10^3$ км произошла в ~ 15.30 UT. Данная регистрация относится именно к совокупности неоднородностей от части землетрясений, представленных в таблице. Анализируя ситуацию в ионосфере 6 мая 1999 г., можно предположить, что во время полёта КС "Мир" 06.05.1999 г. на участке от севера Японии до Южно-Китайского моря бортовая АИС регистрировала края целой совокупности неоднородностей. Одна из них двигалась от Персидского залива на юг Китая (момент регистрации её края бортовой АИС) и далее к Австралии (землетрясение № 8 в таблице). Другая неоднородность от этого же источника (землетрясение № 9 в таблице), где с малым интервалом времени было два землетрясения с $M = 6.3$ и $M = 5.3$, двигалась далее к Японии (момент регистрации неоднородности бортовой АИС). Третья неоднородность передвигалась от Новой Зеландии к Китаю (момент её регистрации), далее к Западной Сибири вблизи Новосибирска и Москве (землетрясение № 7 в таблице). Края всех трёх неоднородностей располагались западнее траектории ИСЗ.

Именно такой уникальный "парад" неоднородностей обусловил тот факт, что участок траектории КС, на котором бортовая АИС регистрировала их края, был существенно длиннее (до 5000 км), чем, например, 21 апреля и 31 марта, когда длина участка траектории регистрации одиночных неоднородностей на бортовой АИС (над Филиппинами и Андами соответственно (Danilkin, 2001) не превышала 1000 км.

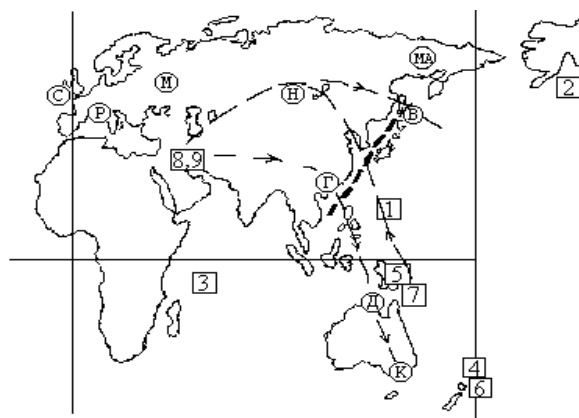
Рис. 4. Положения эпицентров землетрясений (квадратики). Цифры внутри квадратиков соответствуют номеру землетрясения в таблице.

Кружочки – положения следующих наземных ионосферных станций:

М – Москва, Н – Новосибирск, МА – Магадан,
В – Вакканай, Г – Гуанчжоу, Д – Дарвин,
К – Канберра.

Пунктирные линии – траектории движения неоднородностей от эпицентров землетрясений №7,8,9.

Толстый пунктир – участок траектории полёта КС "Мир".



Для обнаружения данных неоднородностей были использованы глобальные ТЕС-карты. На рис. 5, на котором представлены карты $\delta T E S$ 06.05.1999, показаны последовательные моменты зарождения и передвижения неоднородностей, возникших во время подготовки землетрясений № 7, 8, 9. Необходимо отметить, что в этот день положительные неоднородности не являются изолированными, что, на наш взгляд, может быть следствием "парада землетрясений". Кроме этого, практически перед всеми землетрясениями увеличивался $A E$ -индекс, что является индикатором магнитосферных суббурь. Поэтому общая картина изменений $\delta T E S$ 6 мая 1999 г. представляет суперпозицию движущихся макромасштабных положительных неоднородностей, образовавшихся в ходе подготовки 9 землетрясений и ионосферных эффектов суббурь. Для иллюстрации магнито-ионосферной обстановки в эти сутки на рис. 6 приведены вариации $A E$, $D s t$ и $K p$ индексов и зависимости $f o F 2(t)$ для ряда наземных ионосферных станций. Необходимо отметить, что в указанный период имело место положительное возмущение, связанное с магнитным возмущением, что вызвало в Евро-Азиатском регионе положительное ионосферное возмущение, которое наблюдается на картах $\delta T E S$ и в вариации $f o F 2(t)$. На фоне общего повышения электронной концентрации на картах $\delta T E S$ проявляются указанные крупномасштабные неоднородности. Таким образом, для рассматриваемого сложного случая удалось идентифицировать и проследить движение неоднородностей, ассоциированных с землетрясениями.

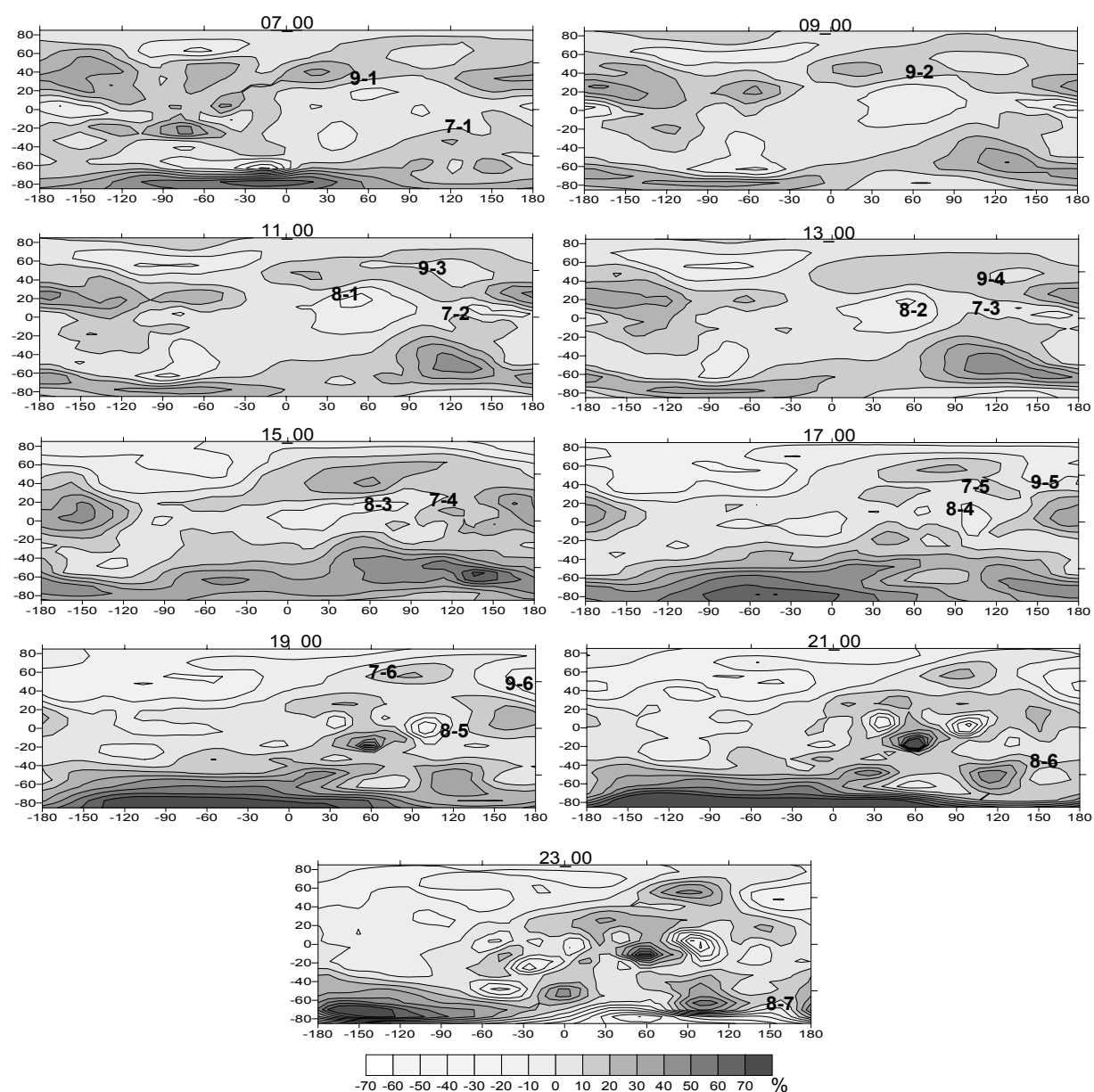


Рис. 5. Мировые карты $\delta T E S$ за 06.05.1999 с интервалом 2 часа

4. Выводы

Анализ глобальных TEC-карт, полученных с помощью GPS-наблюдений, показал наличие макромасштабных движущихся положительных неоднородностей, возникающих в ионосфере за 10-15 ч до сильных землетрясений в окрестностях эпицентра. Ранее данные неоднородности были выявлены в F2 слое ионосферы по ионозондовым измерениям. Оценка скорости перемещения данных неоднородностей по картам TEC показала, что ее величина составила около 1000 м/с. Полученные новые данные стали дополнительным подтверждением гипотезы, сформулированной в работе (Калинин, Сергеенко, 2002).

Высокое временное и пространственное разрешение GPS наблюдений позволяет фиксировать неоднородности в слое F2 ионосферы в условиях гелио- и геофизических возмущений, когда сеть станций вертикального зондирования обнаружить их не может, в первую очередь в силу их неравномерного расположения и просто недостаточного количества.

Результаты проведенного исследования показали, что регулярный мониторинг ионосферы на основе сети GPS-станций может стать эффективным инструментом для краткосрочного прогнозирования землетрясений.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант 04-05-64924.

Литература

- Baran L.W., Shagimuratov I.I., Tepenitsina N.J.** The use of GPS for ionospheric studies. *Artificial Satellites*, v.32, N 1, p.49-60, 1997.
- Codrescu M.V., Palo S.E., Zhang X., Fuller-Rowell T.J., Poppe C.** TEC climatology derived from TOPEX/POSEIDON measurements. *Journal of Atmospheric and Solar-Terr. Physics*, v.61, p.281-298, 1999.
- Danilkin N.P.** The results of the satellite radio sounding of the ionosphere in the vicinity of the F-layer maximum. *Int. J. Geomagn. Aeron.*, v.2, N 3, p.173-180, 2001.
- Danilkin N.P., Kalinin Yu.K., Kotonaeva N.P., Larichev I.L., Sergeenko N.P.** Macroscale ionospheric irregularities registered by the Mir onboard ionosonde. *International Journal of Geomagnetism and Aeronomy*, v.5, N 1 GI1002, p.1-6, 2005.
- Houminer Z., Soicher H.** Improved short-term predictions of f_0F_2 using GPS time delay measurements. *Radio Science*, v.31, N 5, p.1099-1108, 1996.
- Jakowski N., Sardon E.** Comparison of GPS/IGS-derived TEC data with parameters measured by independent ionospheric probing techniques. *Paper presented at International GPS Service Symposium, Silver Spring, Md.*, 19-21 Marc, 1996.
- Kalinin U.K., Romanchuk A.A., Sergeenko N.P., Shubin V.N.** The large-scale isolated disturbances dynamics in the main peak of electronic concentration of ionosphere. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, v.65, Issue 11-13, p.1175-1177, 2003.
- Krankowski A., Baran L.W., Shagimuratov I.I.** Modeling and forecasting of TEC obtained with IGS Network over Europe. *Proceed. Workshop&Symposium, 10 years IGS, March 01-05, Berne, Switzerland*, 2004.
- Larkina V.I., Nalivayko A.V., Gershenson N.I., Gokhberg M.B., Liperovskiy V.A., Shalimov S.L.** Observation of VLF emission related with seismic activity on the Intercosmos-19 satellite. *Geomagn. Aeron.*, v.23, p.684-687, 1983.

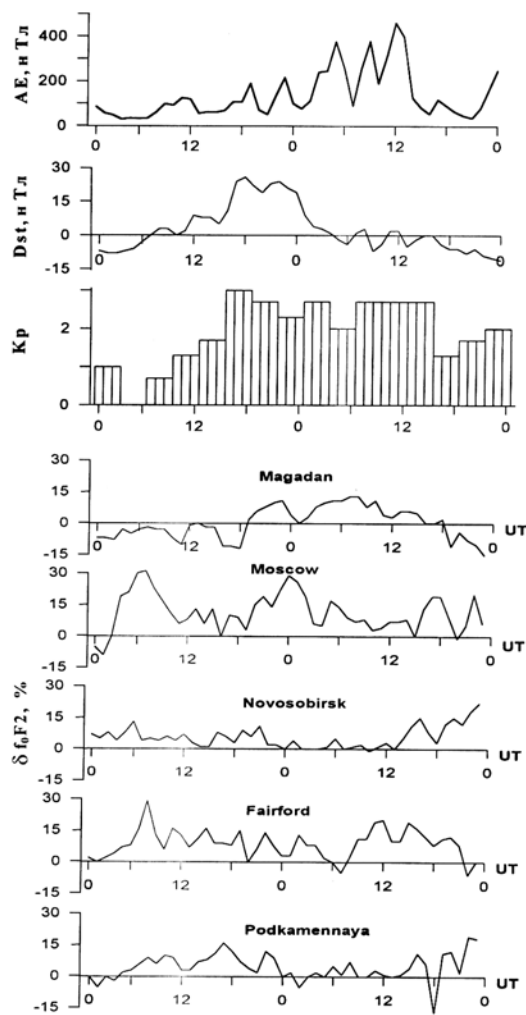


Рис. 6. Вариации AE , Dst , Kp -индексов и временная изменчивость относительной вариации критической частоты $\delta f_0F_2(t)$ на цепочке ионосферных станций 5-6 мая 1999 г.

- Manucci A.J., Wilson B.D., Yuan D.N., Ho C.M., Lindqwister U.J., Runge T.F.** A global mapping technique for GPS-derived ionospheric total electron content measurements. *Radio Science*, v.33, № 3, p.565-582, 1998.
- Pulinets S.A., Boyarchuk K.A.** Ionospheric precursors of earthquakes. *Springer*, 273 p., 2004.
- Pulinets S.A., Legen'ka A.D., Gaivoronskaya T.V., Depuev V.Kh.** Main phenomenological features of ionospheric precursors of strong earthquakes. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, v.65, p.1337-1347, 2003.
- Ruzhin Yu.Ya., Oraevsky V.N., Shagimuratov I.I., Sinelnikov V.M.** Ionospheric precursors of earthquakes revealed from GPS data and their connection with "sea-land" boundary. *Proceed. 16th Wroclaw EMC Symposium*, 2002.
- Schaer S.** Mapping and predicating the Earth's ionosphere using the Global Positioning System. *Ph.D. thesis, Bern Univ., Bern, Switzerland*, 164 p., 1999.
- Tiuri M., Kraus J.** Ionospheric disturbances associated with echo 1 as studied with 19-Megacycles-per-Second Radar. *J.Geophys.Res.*, v.68, N 19, p.5371, 1963.
- Wilson B.D., Manucci A.J., Edwards C.D.** Subdaily northern hemisphere ionospheric maps using an extensive network of GPS receivers. *Radio Science*, v.30, N 3, p.639-648, 1995.
- Гайворонская Т.В., Зеленова Т.И.** Анализ вариаций критических частот f_0F_2 во время землетрясений 1976 и 1984 гг. в Средней Азии. Препринт № 5 (831). М., ИЗМИРАН, 20 с., 1989.
- Калинин Ю.К., Сергеенко Н.П.** Движущиеся уединенные макромасштабные неоднородности, возникающие в ионосфере за несколько часов до катастрофических землетрясений. *ДАН*, т.387, № 1, с.105-107, 2002.
- Калинин Ю.К., Сергеенко Н.П., Сазанов А.В.** Динамика макромасштабных ионосферных неоднородностей, возникающих в главном максимуме в окрестностях эпицентров сильных землетрясений. *Геомагнетизм и аэрономия*, т.44, № 2, с.239-244, 2004.
- Краткосрочный прогноз катастрофических землетрясений с помощью радиофизических наземно-космических методов. Под ред. В.Н. Страхова, В.А. Липеровского. М., ОИФЗ РАН, 176 с., 1999.
- Липеровский В.А., Похотелов О.А., Шалимов С.А.** Ионосферные предвестники землетрясений. М., Наука, 304 с., 1992.
- Пулинец С.А., Легенька А.Д., Зеленова Т.И.** Зависимость сейсмо-ионосферных вариаций в максимуме слоя от местного времени. *Геомагнетизм и аэрономия*, т.38, № 3, с.188-193, 1998.