В.М. Смирнов, Е.В. Смирнова
Институт радиотехники и электроники РАН

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СПУТНИКОВЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ ДЛЯ МОНИТОРИНГА СЕЙСМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ

Сейсмичность земной поверхности и возможность прогноза катастрофических событий

Всякое сильное землетрясение – это достаточно продолжительный процесс со стадиями подготовки, реализации и последствий. Процесс подготовки и реализации сейсмического импульса и постсейсмического восстановления относительно равновесия охватывает не только отдельный участок литосферы, но и гидросферу (в основном подземную её часть), биосферу, атмосферу и ионосферу. Проявление сейсмических процессов в той или иной оболочке Земли протекает по-разному и требует, как правило, длительного наблюдения.

Любое землетрясение не может считаться точечным в пространстве и времени и изолированным событием и должно рассматриваться как длительный процесс: нарушение и последующее восстановление равновесия всех земных оболочек и хода долговременных процессов в обширных объёмах природной среды. Область геофизических аномалий (поля напряжений, деформации, силы тяжести, энергетического и магнитных полей) и аномального протекания других процессов (гидрогеологических и атмосферных) по своим размерам обычно на порядок превышает область очага самого землетрясения.

Распределение возмущений и аномалий в окружающих очаг землетрясения средах неравномерно в пространстве и времени. Пространство это выражается в более резкой выраженности аномалии к особо чувствительным зонам, которые могут располагаться на удалении до сотен километров от очага. Ход аномалии во времени также неравномерен, так что всплески значений подчас того же уровня, что и при основном сейсмическом событии, могут и предшествовать ему, и следовать за ним с разными интервалами времени.

Распространение землетрясений по нашей планете связано с границами тектонических плит. Современные сейсмографы фиксируют ежегодно более 100 тысяч землетрясений. Люди ощущают около 10

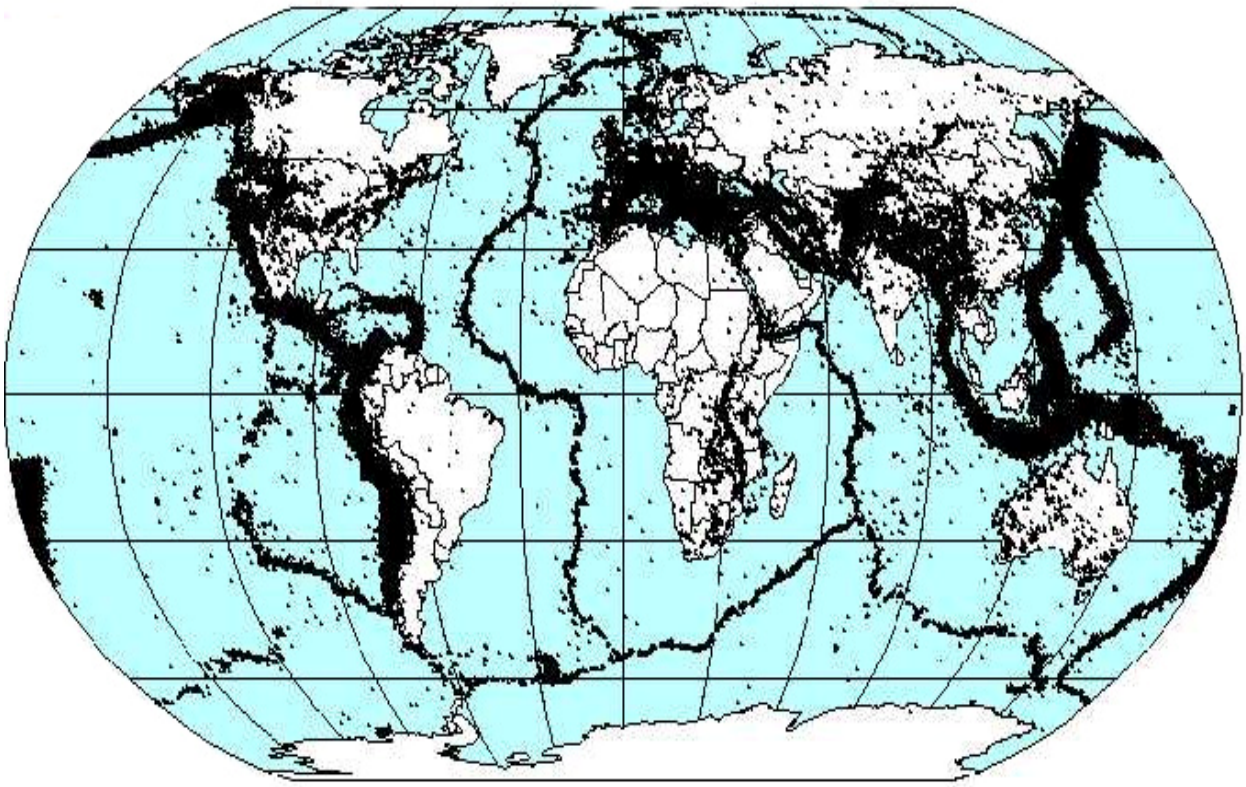


Рис.1. Эпицентры землетрясений за период 1963-1998 гг. по данным NASA CSFC [1]

тысяч землетрясений. Из них примерно 100 бывают разрушительными. Две трети крупнейших землетрясений в мире приходится на Тихоокеанский пояс. Эта наиболее активная из сейсмических зон протягивается вдоль границ нескольких плит (рис.1).

Один из распространенных способов предсказания землетрясений основан на анализе предварительных толчков, хотя отчетливые предварительные толчки до начала главного землетрясения скорее являются исключением, чем правилом.

Физической основой для прогнозирования землетрясений является изменение свойств породы перед землетрясением, что приводит к изменению скорости сейсмических волн. Из-за неоднородности структуры грунта перед землетрясением происходит микроразрушение – появление небольших трещин в коре Земли. Возникновение этих трещин может быть зарегистрировано сейсмографами и служить прогнозом для землетрясений [2-4]. Прогноз землетрясений недостаточно совершенен. Он позволяет лишь предположить, где следует ожидать крупное землетрясение, и с некоторой вероятностью определить время, когда оно произойдет.

Эффективность прогнозирования землетрясений остается весьма низкой, несмотря на высокий уровень развития технологии и большое количество средств, вкладываемых в решение данного вопроса. Проблема оперативного прогноза землетрясений была и остается одной из важнейших нерешенных проблем в геофизике.

Несмотря на то, что в последние годы выявлены многочисленные предвестники различного рода, наблюдавшиеся перед землетрясениями, решение этой задачи еще далеко до завершения, так как для оперативного прогноза необходимы не только сейсмологические исследования. Необходимо исследовать весь комплекс различных явлений, связанных с подготовкой землетрясений.

Анализ существующих данных об атмосферных, гидрогеологических и других процессах на земной поверхности, связанных с землетрясениями, показывает, что при землетрясениях: 1) наблюдаются различные оптические явления; 2) увеличивается температура воды, почвы и воздуха; 3) растет концентрация газов в приземном слое атмосферы; 4) увеличивается концентрация аэрозоля; 5) наблюдаются облака необычной формы; 6) отмечаются электромагнитные явления в атмосфере и ионосфере; 7) происходит деформация земной поверхности, изменение рельефа [5-10].

Разнообразные процессы, происходящие на поверхности Земли и в ее атмосфере, в связи с сейсмической активностью, представляют основной объект исследований. Для определения методов регистрации атмосферных явлений необходимо соблюдение некоторых условий, которые связаны с мозаичным характером предвестников, распространением их на больших площадях, короткими временными интервалами наблюдения, т. е. необходимо быстрое измерение параметров на больших площадях. Этому условию в настоящее время удовлетворяют только дистанционные методы измерений в наземно-космическом варианте.

Ионосферные эффекты землетрясений

В связи с тем, что свойства ионосферы подвержены как регулярным, так и нерегулярным вариациям, поиски сейсмогенных ионосферных эффектов долгое время не привлекали достаточного внимания и не были направлением исследований.

Трудности в идентификации ионосферных возмущений, обусловленных сейсмогенными эффектами на фоне пространственно-временной изменчивости ионосферы, особенно во время электромагнитного возмущения, являются основным объектом критики при использовании ионосферы как детектора предвестников землетрясений. Вариации электронной плотности ионосферы, интерпретируемые как ионосферные предвестники сильных землетрясений, имеют тот же порядок величины, а иногда даже меньше по амплитуде, чем вариации, связанные с изменчивостью ионосферы. Однако интенсивные исследования сейсмоионосферных связей в течение последних нескольких лет показывают, что сейсмоионосферные явления уникальны среди набора других причин изменчивости ионосферы. Отличие физических механизмов сейсмоионосферных связей от механизмов ионосферных бурь и других источников ионосферной изменчивости ведут к их различному проявлению в ионосферных вариациях [11,12]. Ионосферные же возмущения, связанные с литосферными процессами, гораздо доступнее для обнаружения и регистрации космическими радиофизическими методами. До недавнего времени не было общепринятых методик выделения в ионосфере эффектов, обусловленных сейсмическими процессами, по данным спутниковых навигационных систем.

Появление сейсмогенных вариаций в ионосфере перед сильными землетрясениями объясняется воздействием квазистатического электрического поля, возникающего в атмосфере на поверхности земли в области подготовки сильного землетрясения [9-13]. При этом направление электрического поля может как совпадать с направлением естественного атмосферного электрического поля, так и иметь противоположную направленность. Предлагаемый механизм генерации аномального электрического поля связан с эманациями из земной коры радона [11-

13], производящего ионизацию атмосферных газов и металлических аэрозолей, приводящих к резкому усилению электрического поля. Далее электрическое поле проникает на высоты ионосферы, приводя к вариациям в областях E и F. В зависимости от направленности электрического поля на поверхности Земли и от местного времени в ионосфере могут возникать как положительные, так и отрицательные вариации плотности ионосферной плазмы [11].

Следует особо отметить, что учет всех параметров ионосферного предвестника позволяет выделить его на фоне вариаций ионосферы, вызванных другими воздействиями, что выгодно отличает его от плазменных и электромагнитных вариаций другого типа, предлагаемых в качестве предвестников, поскольку они могут наблюдаться и в результате воздействия других факторов. Полученные результаты позволяют утверждать, что ионосферные предвестники землетрясений – реально существующие явления [11-28], а разработанные методики их обнаружения предоставляют возможность их практического использования в системах предупреждения и краткосрочного прогноза катастрофических землетрясений.

Как известно, на подготовительной стадии землетрясения в окрестности его очага возникают процессы разрушения среды, что сопровождается появлением в зоне разрушений новых механизмов генерации электромагнитного и механического полей, которые связаны между собой. Это все вызывает нарушение проводимости, пористости, химического состояния среды, окружающей очаг землетрясения. Эти нарушения стабильности подстилающей коры в течение от 5-6 суток и до начала самого события с магнитудой больше 5-ти должны иметь отклик и в поведении слоя F2 ионосферы, непосредственное влияние которого должно проявляться в поведении критической частоты Fof2 слоя F2 в диапазоне частот от 5-ти до 15-ти МГц [27].

Применение глобальных навигационных спутниковых систем совместно с методами решения обратных задач позволяют проводить длительные и регулярные измерения, что дает возможность изучать временные и пространственные закономерности, происходящие в ионосфере Земли.

Процесс подготовки землетрясений занимает, как правило, значительный период времени и поэтому требует проведения длительных наблюдений над возможными очагами землетрясений. Существующая сеть наземных навигационных станций слежения позволяет осуществлять такие наблюдения за состоянием ионосферы и, следовательно, дает возможность определять ионосферные эффекты землетрясений.

Использование спутниковых навигационных систем для мониторинга ионосферы

На сегодняшний день в мире существует несколько навигационных систем, основанных на использовании искусственных спутников Земли. Из них только две действительно предлагают глобальный навигационно-геодезический сервис позиционирования практически в любой точке земного шара. Это российская навигационная система Глонасс и американская Навстар, больше известная как GPS.

Наземный и космический сегменты глобальных навигационных спутниковых систем Глонасс и GPS показаны на рис. 2. Для глобального покрытия Земли минимально необходимое количество космических аппаратов должно составлять не менее 18 спутников.

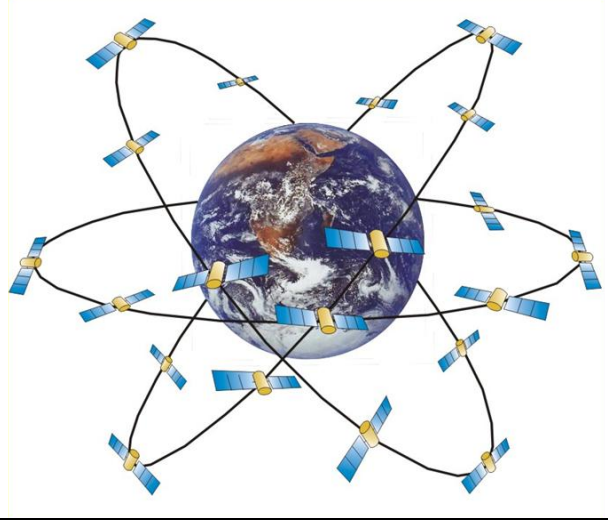
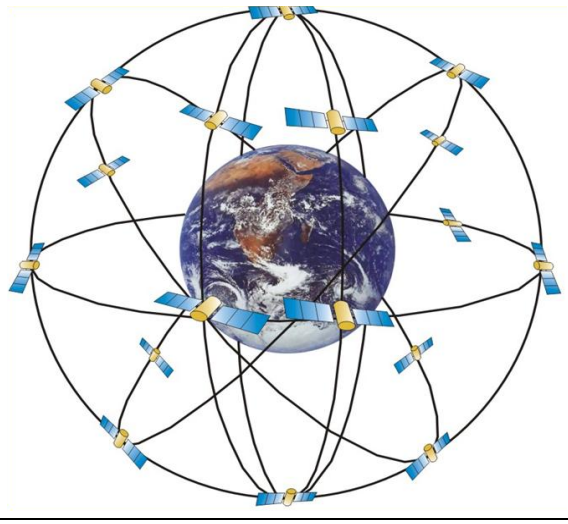
Подсистема космических аппаратов ГЛОНАСС	Подсистема космических аппаратов GPS
	

Рис. 2. Космический сегмент навигационных систем

При таком расположении навигационных спутников обеспечиваются измерения времени, координат искорости движения объектов для решения навигационной задачи в любой точке земного шара в любое время суток и при любой погоде.

При проведении измерений в навигационных спутниковых системах типа GPS и ГЛОНАСС могут использоваться как несущие частоты, так и их коды модуляции. Из характера проведения измерений - кодовые измерения или измерения по несущей - уже следует, что измерения на несущей частоте обладают более высокой точностью в силу того, что длительность сигнала с кодовой последовательностью больше длительности сигнала на несущей частоте.

Необходимые для определения профиля электронной концентрации радиотехнические параметры определяются в виде разности псевдодальностей на двух частотах, а именно разности псевдодальностей Р-кода или С/А-кода (Р-код именуется как сигнал точного определения положения, С/А-код называется сигналом грубого или стандартного определения положения). Эта разность дальностей пропорциональна интегральной электронной концентрации ионосферы и может быть использована для определения ее высотного профиля. Полученное в предположении локальной сферически слоистой среды интегральное уравнение связывает измеренную радиотехническим способом разность псевдодальностей с функцией высотного распределения электронной концентрации $N(z)$ следующим образом [29]:

$$\int_{z_1}^{z_2} N(z)\frac{(a+z)dz}{\left[(a+z)^2-a^2\sin^2\vartheta\right]^{1/2}} = 2,475\cdot 10^{-8}\frac{f_1^2}{k}\left[\Delta R(f_1,f_2)-\delta\right]$$

где z_1 и z_2 - предполагаемые нижняя и верхняя границы ионосферы соответственно; ϑ - зенитный угол наблюдения спутника с пункта измерений; a - радиус Земли; z- текущая высота от поверхности Земли.

Выражение слева представляет собой полное электронное содержание (ПЭС) ионосферы (*TEC* в английской аббревиатуре) вдоль пути распространения навигационного сигнала:

$$TEC = \int_L N(l)dl = 2,475\cdot 10^{-8}\frac{f_1^2}{k}\left[\Delta R(f_1,f_2)-\delta\right].$$

Таким образом, формирование разности псевдодальностей, измеренных на двух частотах, фактически эквивалентно определению полной интегральной концентрации ионосферы. Кроме этого, уравнение (1) является интегральным уравнением 1-го рода типа Фредгольма. Решение его относительно неизвестной функции $N(z)$ сводится к решению обратных некорректно поставленных задач рефракции [29-32].

Алгоритм решения этого уравнения, основанный на использовании метода сопряженных градиентов, подробно изложен в [33]. Применение разработанного метода решения обратной задачи позволяет восстанавливать высотное распределение электронной концентрации ионосферы в диапазоне высот от 80 до 1000 км со среднеквадратической погрешностью 0,02 NU (1 NU=10^6 эл/см^3), значения максимума электронной концентрации – 0,014 NU при исходном моделируемом значении электронной концентрации в максимуме слоя F2, равном 0,82 NU.

Результаты сравнения алгоритма восстановления высотного профиля с данными ионозонда приведены на рис. 3. Видно, что восстановленный профиль высотного распределения электронной концентрации достаточно хорошо согласуется с данными ионозондов до высоты максимума слоя F2. Положительные результаты апробации позволяют рассматривать разработанный алгоритм как основу построения современной технологии непрерывного мониторинга, предназначенную для определения пространственно-временных параметров ионосферы методом радиопросвечивания на трассе спутник-Земля радиосигналами спутниковых навигационных систем.

Используя только один наземный пункт, можно наблюдать азимутально-временные вариации электронной концентрации над территорией около трех млн.км^2. Определяя электронную концентрацию над определенной территорией можно выявить наличие возможных особенностей в распределении электронной концентрации ионосферы. В течение суток только по одной системе с одного пункта можно получить более 30 траекторий подионосферных точек, каждая из которых содержит в среднем не менее 500 измерений с дискретностью 30 с. Это позволяет получить в течение суток более 10000 высотных профилей электронной концентрации, примеры которых приведены на рис. 4.

Вариации электронной концентрации ионосферы в период подготовки и прохождения землетрясения

Анализ потенциальных возможностей GPS-мониторинга при детектировании возможных сейсмических предвестников рассмотрен на примере землетрясения Hector Mine 16 октября 1999 года в Калифорнии [21-34]. Выбор этого события был обусловлен тем, что во время этого достаточно мощного землетрясения (магнитуда M=7,1) геомагнитная обстановка была умеренно возмущенной.

Выбранное землетрясение произошло на территории, характеризуемой повышенной сейсмичностью. Высокая сейсмичность территории вносит дополнительные трудности, возникающие при интерпретации ионосферных возмущений. Поэтому для того, чтобы разделить ионосферные эффекты, обусловленные

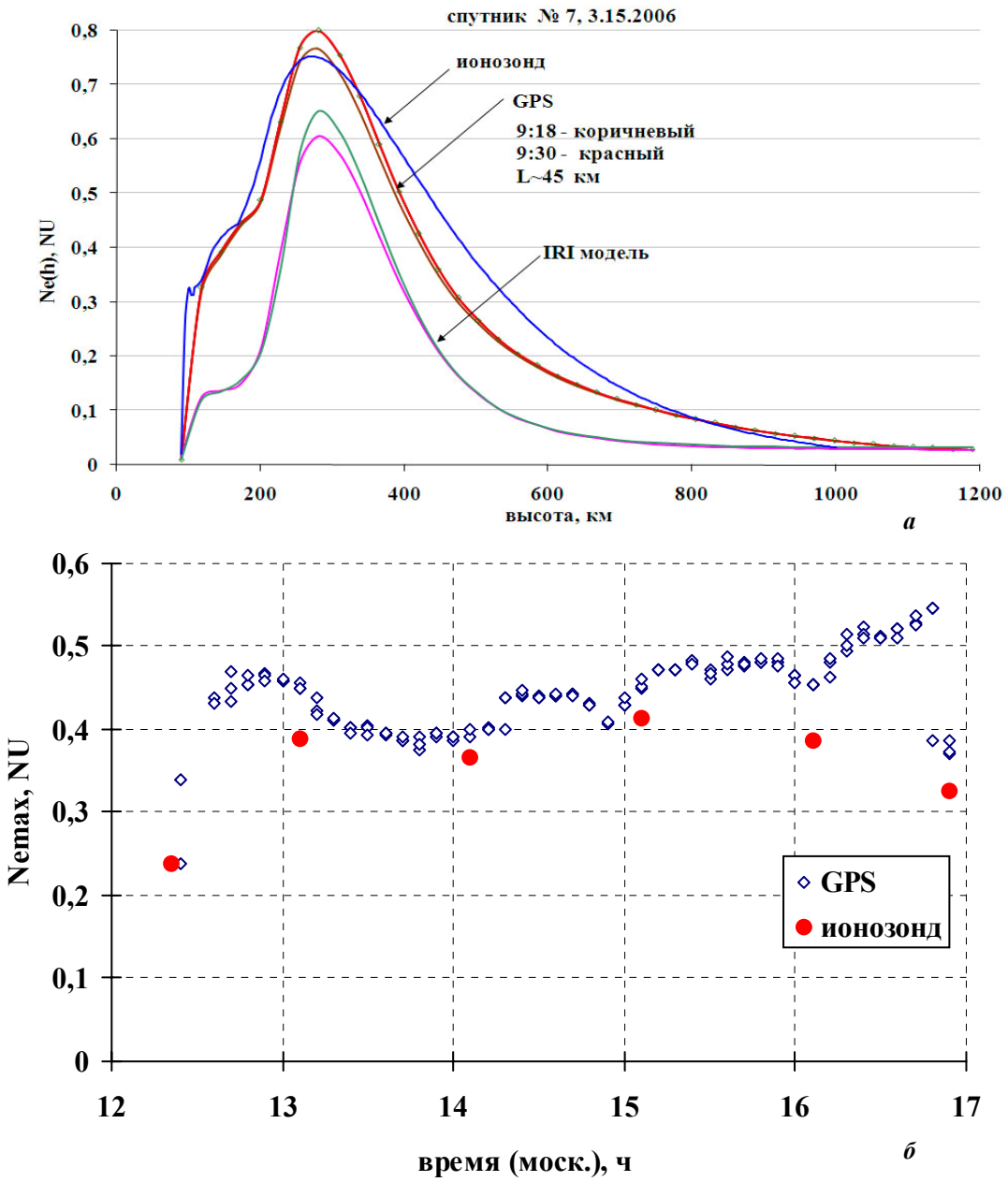


Рис. 3. Сравнение результатов восстановления по наблюдениям спутников GPS с данными ионозондов (Grahamstown, ЮАР (*а*) и ИЗМИРАН (*б*))

воздействием гелиофизических факторов от сейсмических, для мониторинга ионосферы использовались приемники, расположенные как вблизи эпицентра сейсмического события, так и вдали от него.

Анализ вариаций распределения электронной концентрации, полученной при использовании метода радиопросвечивания, проводился на протяжении достаточно длительного интервала времени, включающего день землетрясения (с 11 до 17 октября 1999 г.).

Трассы подионосферных точек относительно места расположения эпицентра землетрясения и навигационных приемников, используемых для мониторинга, показаны на рис. 5.

Высотные профили распределения электронной концентрации, полученные в период с 11 по 17 октября 1999 г. методом радиопросвечивания, представлены на рис. 6. Здесь показаны профили, полученные с помощью приемников, расположенных как вблизи эпицентра сейсмического события, так и вдали от него. Анализ изменения распределения электронной концентрации показывает увеличение электронной концентрации за 3-5 суток и значительное ее уменьшение за 1-3 суток до предстоящего землетрясения. Такой характер изменения электронной кон-

центрации наблюдался для всех станций, расположенных вблизи эпицентра события. При этом происходит не только уменьшение электронной концентрации, но и «нарушение» ее пространственно-временного хода относительно предыдущих дней. Это хорошо видно на 2D-представлениях распределения электронной концентрации.

Иная картина наблюдалась на удаленных станциях LIND и AMC2. Здесь нет выраженного роста электронной концентрации за 4-5 суток и ее резкого уменьшения за 1-3 суток до свершения сейсмического события. Следует заметить, что для станции LIND, расположенной на близкой к землетрясению долготе, но удаленной по широте, не наблюдается выраженной модификации пространственно-временного хода. Некоторая модификация профиля, менее выраженная по сравнению со станциями COSO, AVRY и BLYT, наблюдалась для станции AMC2, расположенной на близкой к эпицентру землетрясения широте.

Разный характер пространственно-временного хода электронной концентрации в данном регионе не может быть объяснен воздействием геомагнитного возмущения, наблюдаемого в этот период. Анализ гелиогеофизической обстановки в период 11-17 октября 1999 г. показал, что наличие в это время возмущенной геомагнитной обстановки не могло привести к столь значительным изменениям в распределении электронной концентрации ионосферы в данном регионе.

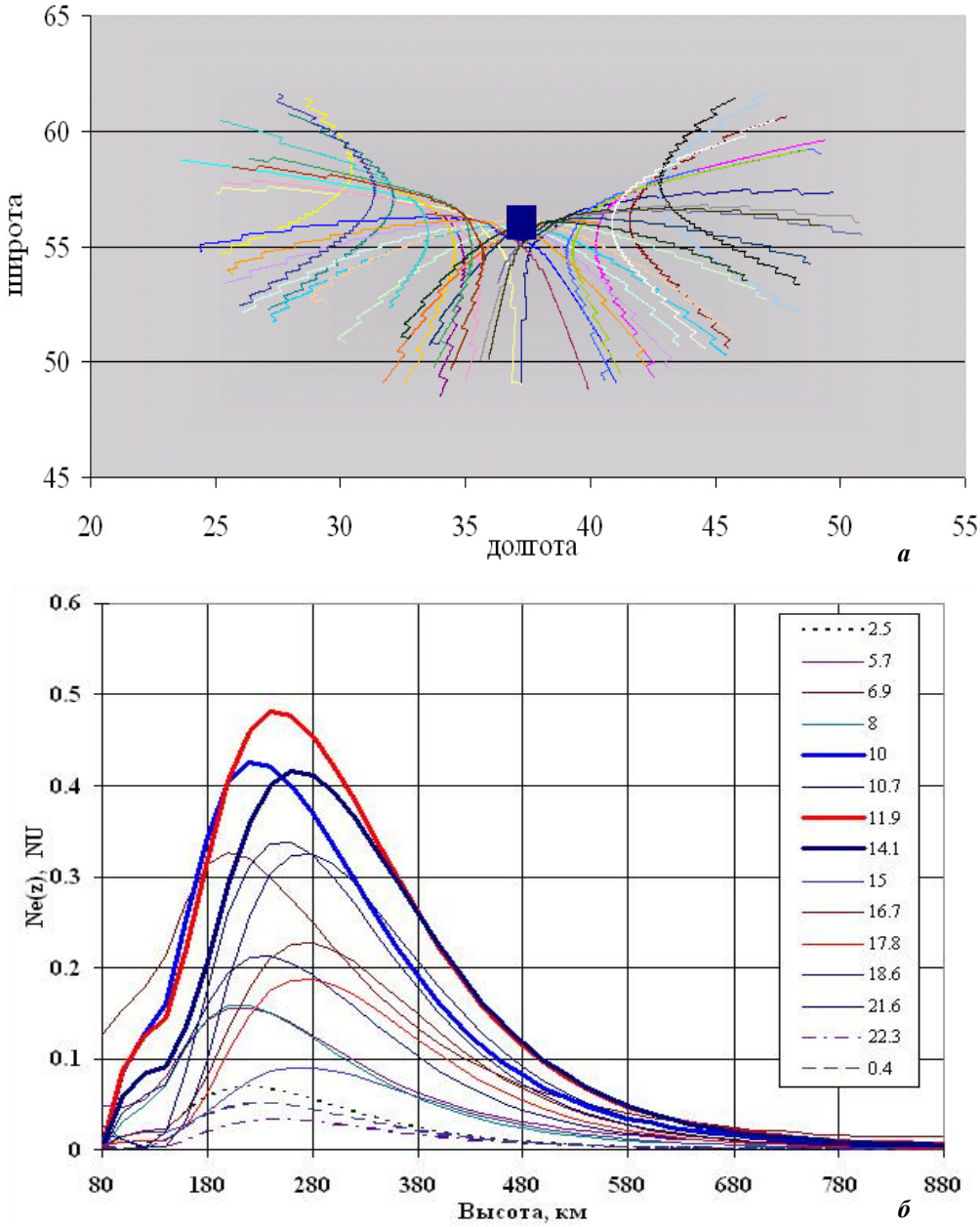


Рис. 4. Траектории подионосферных точек (*а*) и профили электронной концентрации (*б*), полученные в течение суток по наблюдениям с одного пункта

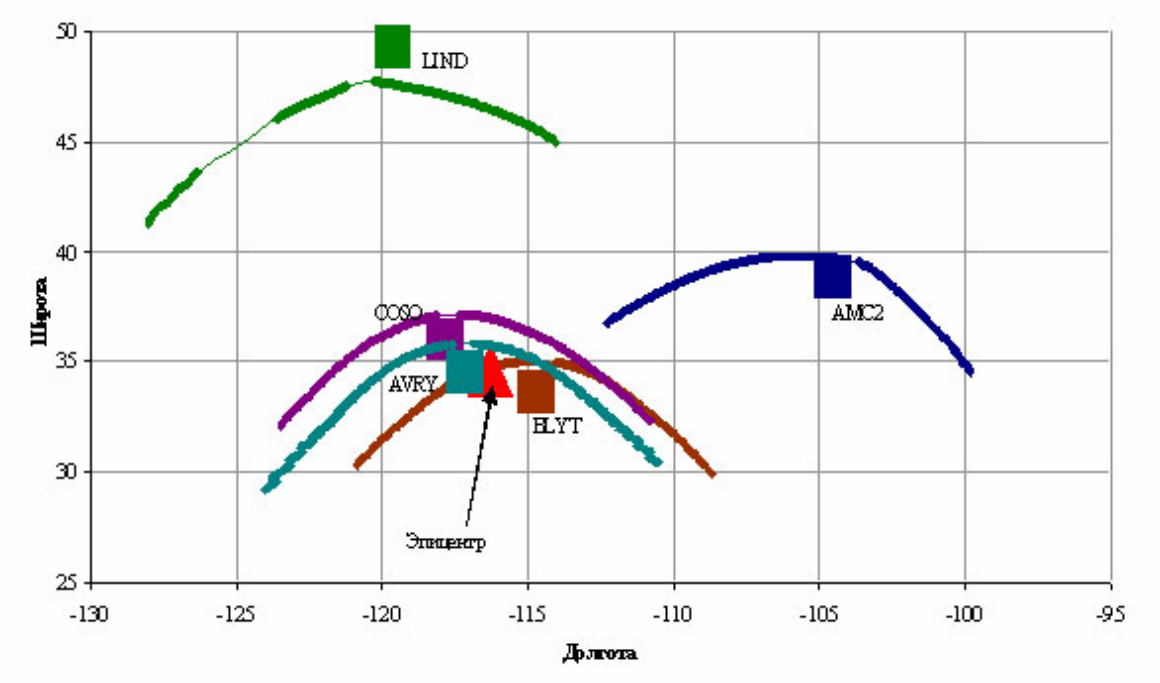


Рис. 5. Траектории подионосферных точек для одного из спутников

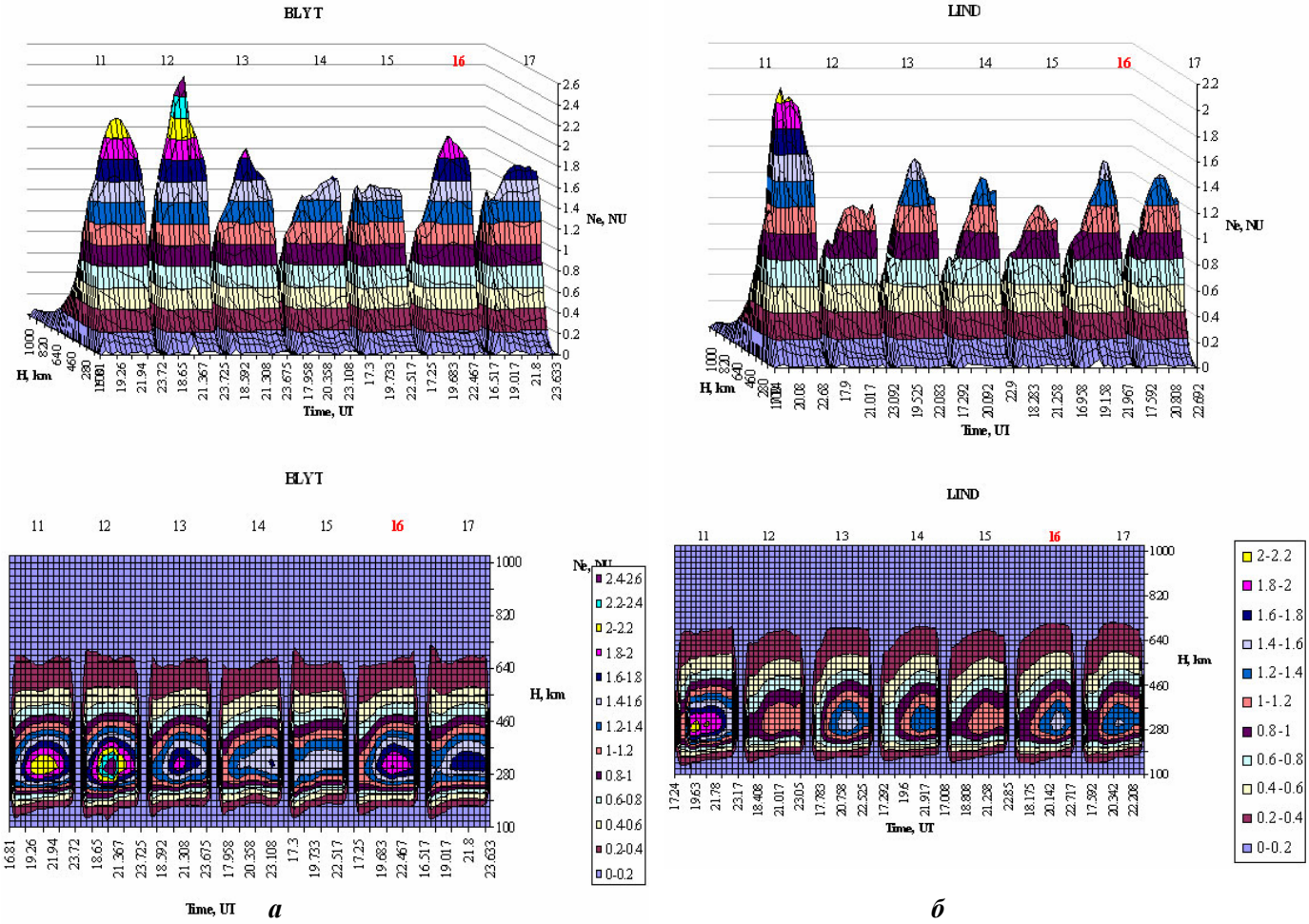


Рис. 6. Высотные профили электронной концентрации (3D-представление) и их двумерное отображение (2D-представление) вблизи (*а*) и вдали от эпицентра (*б*)

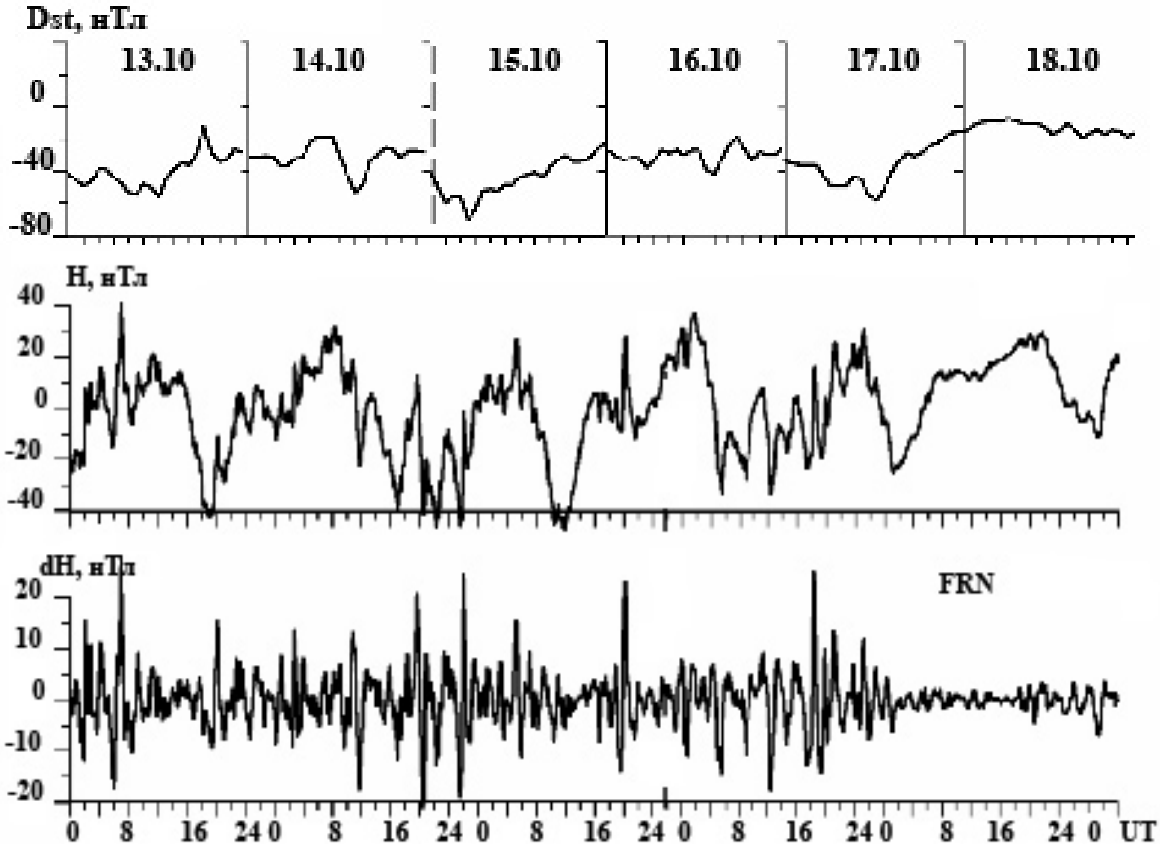


Рис. 7. Вариации геомагнитного индекса Dst, магнитного поля H и его временных изменений за 13-18 октября 1999 г. по данным магнитовариационной станции FRN

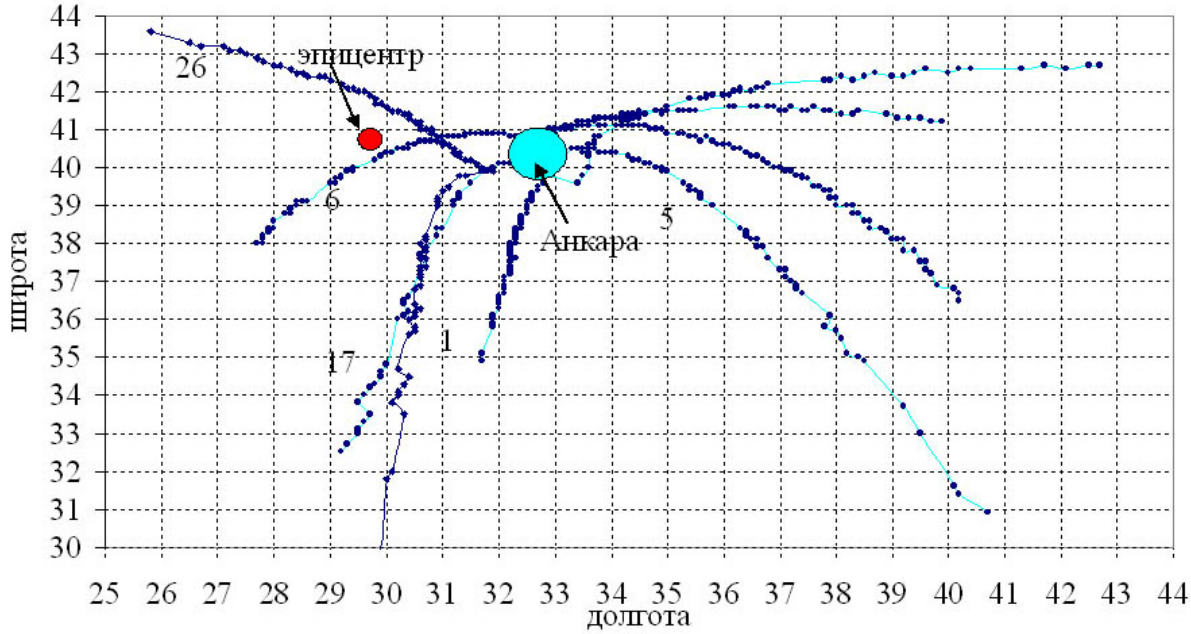


Рис. 8. Траектории подионосферных точек

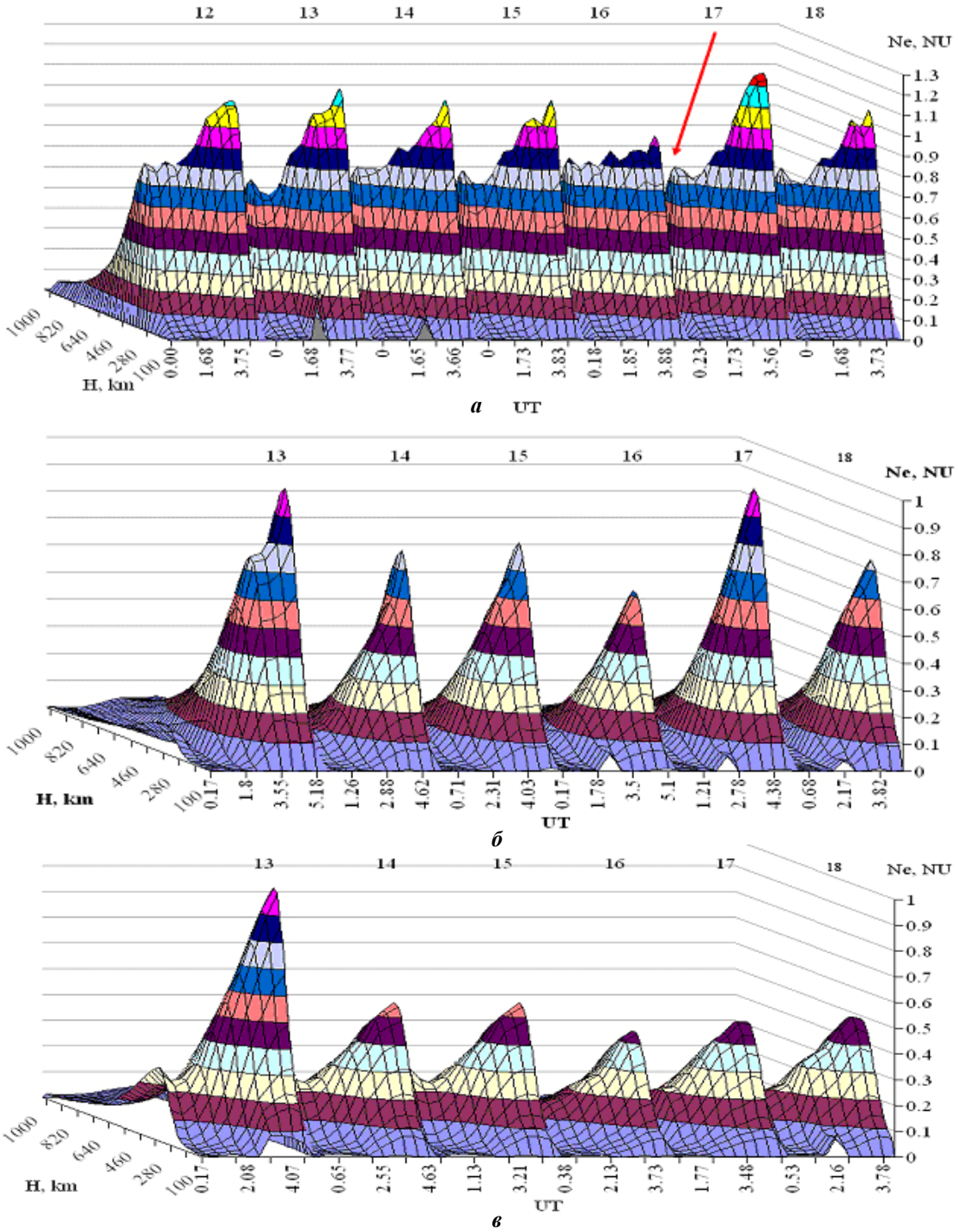


Рис. 9. Профили электронной концентрации, полученные по данным спутника №6 12-18 августа 1999 г. для станций ANKR (*а*), ZECK (*б*) и ZWEN (*в*).

Данные по геомагнитным индексам Dst и Kp за 11-17 октября 1999 г., представленные на сайте мирового центра данных, дают основание отнести данный интервал времени к периоду умеренной геомагнитной активности. Величина Kp индекса изменялась в диапазоне 2-4, а 15 октября 1999 г. достигла 5. Dst индекс варьировался в диапазоне 20-60 нТл с максимальным отклонением до 70 нТл за сутки до землетрясения (рис. 7). Анализ геомагнитных вариаций позволяет сделать вывод, что изменения в пространственно-временном распределении электронной концентрации, наблюдаемые на станциях COSO, AVRY и BLYT, могут быть вызваны эффектами сейсмического происхождения.

Применение метода радиопросвечивания позволило проследить поведение максимума электронной концентрации вдоль траектории подионосферной точки для отдельных спутников в период сильней-

шего землетрясения в Турции 17 августа 1999 г. [17, 34]. В эпицентре сила толчка составила 7,7 балла.

Траектории подионосферных точек для 5-ти навигационных спутников, наблюдаемых в период подготовки и прохождения землетрясения, представлены на рис. 8. Эпицентр землетрясения находился в районе с координатами 40,70°с.ш. и 29,99°в.д. Центр наблюдения за спутниками находился в Анкаре (координаты -39,89°с.ш., 32,76°в.д.) и был удален от эпицентра землетрясения на расстояние до 400 км.

На рис. 9 представлены высотные профили электронной концентрации ионосферы, полученные из решения обратной задачи радиопросвечивания по наблюдениям за спутником №6 в период 14-17 августа 1999 г. Для сравнения здесь же приведены высотные профили электронной концентрации, полученные для станций, расположенных вдали от эпицентра землетрясения. При этом станция ZWEN располагалась примерно на долготе эпицентра, а ZECK – на широте. Из этих данных видно, что пространственно-временная модификация высотного распределения электронной концентрации наблюдалась только вблизи станции ANKR. Для станции ZECK отмечено незначительное изменение значения в максимуме ионосферы без какой-либо заметной модификации в высотном распределении. Это может свидетельствовать о том, что на стадии подготовки сейсмического события над эпицентральной областью происходит нарушение пространственно-временного хода распределения электронной концентрации, что может служить характерным признаком готовящегося землетрясения.

На представленных рисунках хорошо видно изменение значения электронной концентрации в максимуме F2 слоя ионосферы, обусловленное как суточным ходом ионосферы, так и влиянием землетрясения на состояние ионосферы.

Заключение

Развитая технология определения высотного профиля электронной концентрации позволяет уверенно диагностировать состояние ионосферы и развитие процесса возникновения ионосферных возмущений над огромной территорией. При этом эта технология не зависит от условий наблюдения возникающих в ионосфере процессов. Одновременность наблюдения на большой территории позволяет выявить особенности, возникающие в ионосфере при воздействии на нее тех или иных факторов.

Применение метода радиопросвечивания, основанного на результатах обработки данных с навигационных спутниковых систем, дает возможность проведения длительного мониторинга состояния ионосферы в сейсмоопасный период. Результаты обработки таких данных показали, что изменение состояния ионосферы в сейсмоопасных районах можно контролировать с помощью навигационных спутниковых систем. В отличие от ионосферных станций вертикального зондирования предложенный подход позволяет локализовать возможные районы землетрясения и определить время возникновения этого явления.

Анализ состояния ионосферы в период подготовки землетрясений в рассмотренных регионах показал, что отчетливо прослеживается тенденция к уменьшению электронной плотности ионосферы за несколько суток (1-2) до предстоящего землетрясения, что хорошо подтверждается известными из литературы данными. Более того, в эпицентральной области предстоящего землетрясения наблюдается четко выраженная пространственно-временная модификация профиля распределения электронной концентрации, что может служить характерным признаком подготовки сейсмического события и рассматриваться как предвестник возможного землетрясения.

Литература

1. Seismicity catalogs. Volume 2. Global and regional. 2150 B.C. – 1998 A.D.
2. Дубров М.Н. Возбуждение земной поверхности и ионосферы, регистрируемые лазерным деформографом и ионосферным профилометром на основе GPS данных // Тез. докл. X регион. конф. по распростр. радиоволн / М.Н. Дубров, В.М. Смирнов. – СПб.: Изд-во СПбГУ, 2004. – С.69-70.
3. Dubrov M. N. Excitation of the Earth surface and ionosphere recorded simultaneously by laser strainmeter and GPS data processing // XXIII General Assembly of the Int. Union of Geodesy and Geophysics (IUGG2003) / M. N. Dubrov, V.M. Smirnov. – June 30-July 11, Sapporo, Japan, 2003. – JSA02/01P/D-003. – A7.
4. Лазерное сканирование природных поверхностей и его возможности в решении проблемы прогноза землетрясений и контроля окружающей среды // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов. ВИНИТИ. / В.И. Григорьевский, В.П. Садовников, В.М. Смирнов [и др.]. – 2005. – Вып.6. – С.53-59.
5. Войтов Г.И. О газовом дыхании Земли / // Природа / Г.И. Войтов. – 1975.- № 3.- С. 90–98.
6. Войтов Г.И. Гидрогеохимические предвестники землетрясений / Г.И. Войтов. – М.: Наука, 1985. – 286 с.
7. Гохберг М.Б. Сейсмо-электромагнитные явления / М.Б. Гохберг, В.А. Моргунов, О.А. Похотелов. – М.: Наука, 1988. – 174 с.
8. Морозова Л.И. О современных тектонических процессах Туранской плиты и ее горного обрамления (по динамике линейных облачных аномалий над разломами землетрясений) // Изв. РАН. Физика Земли / Л.И. Морозова. – 1997. – № 5. – С.65–72.

9. Tronin A.A. Atmosphere-litosphere coupling. Thermal anomalies on the Earth surface in seismic processes // Seismo Electromagnetics: Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling ed. by M. Hayakawa, O.A. Molchanov / A.A. Tronin. Tokyo: TERRAPUB, 2002.–P.173-176.
10. Милькис М.Р. Метеорологические предвестники сильных землетрясений // Изв. АН СССР. Физика Земли / М.Р. Милькис. – 1986. – С.36–47.
11. Пулинец С.А. Ионосферные предвестники землетрясений // Краткосрочный прогноз катастрофических землетрясений с помощью радиофизических наземно-космических методов: докл. конф., Москва, 2-3 октября 1997г. / С.А. Пулинец, Й.Я. Лью. – М., 1997. – С. 26-44.
12. Pulinets S.A. Quasielectrostatic model of atmosphere-thermosphere-ionosphere coupling //Adv. Space Res / S.A. Pulinets [et al] – 2000. – V.26. – N8. – P.1209-1218.
13. Кузнецов В.Д. Изучение ионосферных явлений, предшествующих землетрясениям и другим природным и техногенным катастрофам (проект Вулкан) // Сб. докл. XXI Всерос. науч. конф. Йошкар-Ола, 25-27 мая 2005 г. / В.Д. Кузнецов, Ю.Я. Ружин.- Йошкар-Ола: 2005. – Т.1. – С.27-38.
14. Липеровский В.А. Ионосферные предвестники землетрясений / В.А. Липеровский, О.А. Похотелов, С.Л. Шалимов. – М.: Наука, 1992. – 304 с.
15. Pulinets S.A. Ionospheric Precursors of Earthquakes. Springer / S.A. Pulinets, K.A. Boyarchuk. – 2003. – 312 p.
16. Бондур В.Г., Смирнов В.М. Метод мониторинга сейсмоопасных территорий по ионосферным вариациям, регистрируемым спутниковыми навигационными системами // Доклады Академии наук / В.Г. Бондур, В.М. Смирнов. – 2005. – Т.402. – №5. –С.675-679.
17. Смирнов В.М. Вариации ионосферы в период землетрясений по данным навигационных систем // Электронный журнал "Исследовано в России" / В.М. Смирнов. – 2001. – № 153. – С. 1759-1767. http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2001/153.pdf.
18. Oraevsky V.N. Seismoionospheric Precursors and Atmospheric Electricity // J.of Physics / V.N. Oraevsky, Yu.Ya. Ruzhin, A.Kh. Depueva. – 1994.– V.18.– №11.– P.1229-1234.
19. Бондур В.Г. Ионосферные возмущения в период подготовки сейсмических событий по данным спутниковых навигационных систем // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: сб. науч. ст. / В.Г. Бондур, В.М. Смирнов. – М.: Изд-во ООО «Азбука-2000». – 2006. – Т.2. – Вып.3. – С.190-198.
20. Смирнов В.М. Детектирование сейсмоионосферных вариаций в период геомагнитных возмущений по данным навигационных систем // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: сб. науч. ст. / В.М. Смирнов, Е.В. Смирнова. – М.: Изд-во ООО «Азбука-2000». – 2006. –Т.2. – Вып.3. – С.242-246.
21. Smirnov V.M. About detecting seismoionospheric variations during geomagnetic perturbations according to GPS data // EGU General Assembly. Vienna, 15-20 April 2007.- Geophysical Research Abstracts / V.M. Smirnov, E.V. Smirnova. – 2007. – V. 9. – CD-R.
22. Ким В.П. О возможном ионосферном предвестнике землетрясений // Физика Земли / В.П. Ким, В.В. Хегай, П.В. Иллич-Свитыч. – 1994. – №3. – С.37-40.
23. Шарадзе З.С. Сильные землетрясения и связанные с ними возмущения в ионосфере и геомагнитном поле // Изв. АН СССР. Физика Земли / З.С.Шарадзе [и др.]. – 1989. –№1. –С.20-32.
24. Liu J.Y. Seismo-ionospheric signatures prior to M>6.0 Taiwan earthquakes // Geophysical Research Letters / J.Y.Liu [et al.]. – 2000. – V.27. – №.19. – P.3113-3116.
25. Liu J.Y. Variations of ionospheric total electron content during the Chi-Chi earthquake //Geophysical Research Letters / J.Y.Liu [et al.]. – 2001. – V.28. – №.7. – P.1383-1386.
26. Казакова Н.А. Мониторинг электромагнитных предвестников землетрясений // Вестник МГУ. Серия 3, Физика. Астрономия / Н.А. Казакова, Б.М. Шинкевич. – 1998. – №4. – С. 10-13.
27. Боярчук К.А. Выделение и анализ предвестника сильных землетрясений на основе сейсмоионосферного эффекта по ежечасным значениям критической частоты f0 слоя F2 ионосферы // Тез. докл. 7 рег. конф. по распростр. радиоволн. Санкт-Петербург, 2001 / К.А Боярчук [и др.]. – СПб.: Изд-во СПбГУ, 2001. – С.54.
28. Bondur V. Seismoionospheric variations during the earthquake in Pakistan (September 2005) as potential precursor of seismic events // International Conference on Advances in Space Technologies (ICAST 2006): Space Technologies for Disaster Management and Rehabilitation / V. Bondur, V. Smirnov. – Islamabad-Pakistan, 2-3 September 2006. – P. AST06-108. – P.11-15. – CD-R.
29. Андрианов В.А. Определение высотного профиля электронной концентрации ионосферы Земли по двухчастотным измерениям радиосигналов искусственных спутников Земли // Радиотехника и электроника / В.А. Андрианов, В.М. Смирнов. – 1993. – Т.38. – №7. – С.1326-1335.
30. Арманд Н.А. Восстановление профиля коэффициента преломления тропосферы по измерениям частоты сигналов искусственного спутника Земли // Радиотехника и электроника / Н.А. Арманд, В.А. Андрианов, В.М. Смирнов. – 1987. – Т.32. – №4. – С.673-680.
31. Павельев А.Г. К решению обратной задачи рефракции // Радиотехника и электроника / А.Г. Павельев. – 1980. – Т.25. – №12. – С.2504.
32. Рыжиков Г.А. Томография и обратные задачи дистанционного зондирования / Г.А. Рыжиков, В.Н. Троян. – С-Пб.: Изд-во С-ПбГУ, 1994. – 220 с.
33. Смирнов В.М. Решение обратной задачи радиопросвечивания ионосферы Земли градиентными методами // Радиотехника и электроника / В.М. Смирнов. – 2001. – Т.46. – №1. – С.47-52.
34. Смирнов В.М. Модификация профиля электронной концентрации над эпицентром землетрясения по данным GPS // Сб. докл. 21 Всерос. науч. конф. Йошкар-Ола, 25-27 мая 2005г. / В.М. Смирнов, Е.В. Смирнова. –Йошкар-Ола: Изд-во МарГТУ, 2005. – Т.1. – С.277-281.