

ВАРИАЦИИ ИОНОСФЕРЫ В ПЕРИОД ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ПО ДАННЫМ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Смирнов В.М. (ysmirnov@ire.rssi.ru)

Институт радиотехники и электроники РАН

Рассмотрены вариации ионосферы Земли в период подготовки, во время и после землетрясения, произошедшего 17 августа 1999 года в Турции. Параметры ионосферы были получены методом радиопросвечивания по данным навигационной системы GPS (США). Контроль за состоянием ионосферы проводился в период с 14 по 18 августа. Полученные данные показали заметное изменение электронной концентрации ионосферы за одни сутки до землетрясения. По результатам наблюдения за спутником, проходившим вблизи эпицентра землетрясения, зафиксирован локальный минимум максимума F2 слоя электронной концентрации. Координаты этого минимума совпали с координатами эпицентра землетрясения, произошедшего ровно через одни сутки в этом месте.

Введение

Распространение землетрясений по нашей планете связано с границами тектонических плит. Сопоставление карты распределений землетрясений с картой основных плит, слагающих земную кору, четко показывает взаимосвязь землетрясений с границами плит [1].

Две трети крупнейших землетрясений в мире приходится на Тихоокеанский пояс. Эта наиболее активная из сейсмических зон протягивается вдоль границ нескольких плит, и для живущих здесь людей землетрясения относятся к вполне привычным явлениям, если их можно назвать привычными.

Землетрясения наносят огромный ущерб Японии, расположенной в этом поясе. Катастрофические землетрясения продолжают уносить человеческие жизни в других районах, лежащих в пределах этого пояса: Перу, Калифорния, Никарагуа, Филиппины и т.д.

Второй огромный сейсмический пояс прослеживается вдоль границ плит от Малайского архипелага, вдоль Гималаев и далее в Средиземноморье. Высочайшие горы на Земле Гималаи образовались в результате дрейфа континентов, когда Индия соединилась собственно с Азией. Хотя общее число землетрясений в этом поясе меньше, чем в Тихоокеанском, но примерно 75% жертв землетрясений во всем мире приходится на этот пояс, что объясняется высокой плотностью населения.

2. Ионосфера и землетрясения

Прогноз места, времени и силы землетрясений – проблема, над которой трудятся большие коллективы ученых в разных странах. Есть отдельные удачные прогнозы, известны инструментально зарегистрированные предвестники землетрясений. Что следует понимать под предвестниками землетрясений? В самом общем смысле это необычные, аномальные явления, которые можно заметить и зарегистрировать перед землетрясением.

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. Прогноз землетрясений недостаточно совершенен. Он позволяет лишь предположить, где следует ожидать крупное землетрясение, и с некоторой вероятностью определить время, когда оно произойдет.

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.

Обнаружение на спутниках эффектов сейсмической активности стимулировало использование космической техники для решения проблем прогноза землетрясений [2]. Один из вариантов такого использования основан на изучении ионосферных эффектов землетрясений [2-3]. Ранее наземными методами было установлено, что в ионосфере над эпицентрами готовящихся землетрясений изменяется ряд ионосферных параметров. Проблема заключается в определении области возникновения землетрясений. Частичное решение этой проблемы может быть решено с помощью глобальных навигационных спутниковых систем Навстар (США) и Глонасс (Россия) [4-6], спутниковая сеть которых покрывает всю поверхность планеты. Наличие этих систем и возможность использования навигационных радиотехнических измерений для определения некоторых параметров ионосферы, позволяет уже сейчас осуществлять спутниковый мониторинг сейсмической активности, основанный на ионосферных эффектах. Процесс подготовки землетрясений занимает, как правило, значительный период времени и поэтому требует проведения длительных наблюдений над возможными очагами землетрясений. Густая сеть наземных навигационных станций слежения позволяет осуществлять такие наблюдения за состоянием ионосферы и, следовательно, дает возможность определять ионосферные эффекты землетрясений.

Ионосфера по своей природе, вследствие статистической неоднородности, имеет сильные пространственно-временные изменения. Поэтому ее электронная концентрация в любой точке может быть задана через ее среднее значение $\langle N_e \rangle$ и флуктуацию δ величины $\langle N_e \rangle$. Флуктуация δN_e , как правило, малы по сравнению со средними значениями $\langle N_e \rangle$.

Однако наряду с этими флуктуациями параметров ионосферы наблюдаются регулярные и нерегулярные изменения самих средних значений этих параметров. Эти вариации могут быть соизмеримы со средними значениями электронной концентрации. В любом случае, эти вариации соизмеримы со средними значениями электронной концентрации в данной точке. Отклонения параметров ионосферы от их спокойного суточного хода, имеющие характерные временные масштабы от десятков минут до нескольких суток, проявляются на расстояниях в сотни и тысячи километров [7].

Более того, ионосферные возмущения, связанные с литосферными процессами, гораздо доступнее для обнаружения и регистрации космическими радиофизическими методами.

В связи с тем, что свойства ионосферы подвержены и нерегулярным вариациям, поиски сейсмогенных ионосферных эффектов долгое время не привлекали достаточного внимания и не были направлением исследований. Исследования последних лет показали, что ионосфера чувствительна ко многим процессам, происходящим на Земле. Излучения Солнца и вулканическая деятельность, цунами и землетрясения, грозы и циклоны, запуск спутников и ракет, преодоление летательными аппаратами звукового барьера и мощные взрывы - все это находит отклик в ионосфере [8-9].

Анализ критических частот слоя F2, проведенный в [2], позволил сделать вывод, что в широкой области ионосферы в период подготовки землетрясений происходит общее увеличение электронной концентрации в слое F2 за 2-3 суток до момента толчка, а за сутки

до начала землетрясения отмечается относительный минимум электронной концентрации над эпицентральной областью.

Возмущения в максимуме слоя F2 характеризуются, как правило, изменениями критических частот (максимума электронной концентрации) и высоты максимума слоя F2. Они могут быть весьма значительными и приводить к перераспределению пространственно-временной структуры ионосферы.

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. Получаемые в результате инверсии навигационных измерений высотные профили могут служить основой для изучения таких пространственно-временных закономерностей ионосферы.

3. Геометрия навигационных спутниковых систем

Конфигурации навигационных спутниковых систем Глонасс и GPS наилучшим образом приспособлены для проведения непрерывных и длительных наблюдений за состоянием ионосферы.

Все спутники системы GPS находятся на круговых орбитах на высоте около 20183 км. Высота орбиты выбрана так, что период обращения спутника равняется половине синхронного, т.е. 11 час 57 мин 58,3 сек. Такой выбор орбиты приводит к ежедневному повторению траектории спутника относительно земной поверхности или, другими словами, период обращения получается таким, что каждый спутник проходит над одной и той же точкой земной поверхности через 23 ч 55 мин 56,6 сек, т.е. через звездные сутки [10].

В системе «Глонасс» спутники располагаются на круговых орбитах и имеют период обращения вокруг Земли около 11 час 15 мин, высота орбиты 19100 км, наклонение – 64,8 градусов. Полностью развернутая группировка должна содержать 24 спутника. Спутники располагаются в трех орбитальных плоскостях, разнесенных по экватору на 120 градусов. Спутники в каждой плоскости смещены относительно друг друга на 45 градусов, причем все аппараты, принадлежащие одной плоскости, сдвинуты по истинной аномалии по отношению к спутнику в соседней плоскости на 15 градусов [6, 11].

В отличие от спутников системы «Навстар» космические аппараты системы «Глонасс» не имеют острого резонанса с вращением Земли. Период обращения спутников подобран таким образом, что за 8 суток они совершают 17 оборотов вокруг Земли. Причем начало каждого витка смещается относительно поверхности Земли приблизительно на 21 градус по долготе. В результате чего через каждые 8 суток спутник проходит над одними и теми же точками на поверхности Земли. Кроме того, за счет смещения спутников внутри орбитальных плоскостей все ИСЗ системы «Глонасс» движутся относительно поверхности Земли практически по одному и тому же следу [11], что дает возможность непрерывного проведения наблюдений за состоянием ионосферы в определенном регионе.

4. Ионосферные вариации в период землетрясений

Применение метода радиопросвечивания позволило проследить поведение максимума электронной концентрации вдоль траектории подионосферной точки для отдельных спутников в период сильнейшего землетрясения в Турции 17 августа 1999 г. Стихийное бедствие 17 августа 1999 года можно считать самым разрушительным землетрясением, произошедшим в XX веке в Турции. Это землетрясение первоначально было оценено в 6,7 балла, но позднее сейсмологи признали, что в эпицентре сила толчка составила 7,7 балла.

Траектории подионосферных точек для 5 спутников, наблюдаемых в период прохождения землетрясения, представлены на рис.1. 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.

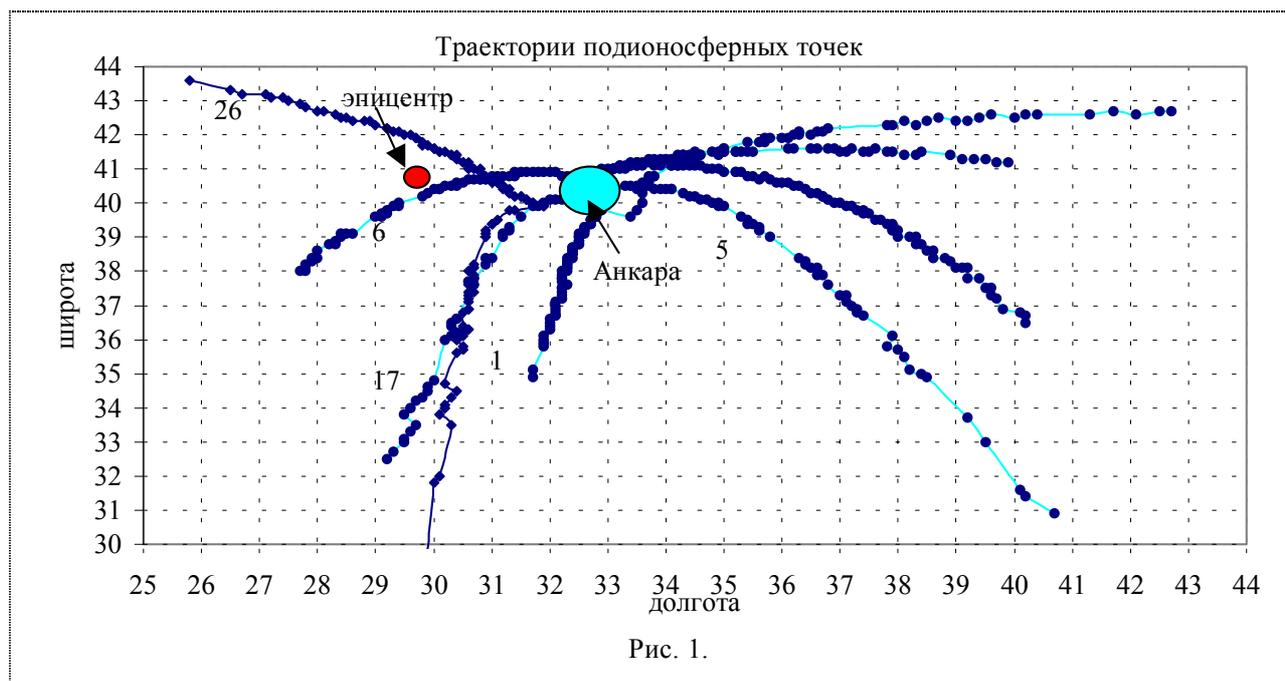


Рис. 1.

На рис. 1 видно, что траектории подионосферных точек для спутников №26 и 6 проходили практически над эпицентром землетрясения. Спутник №6 наблюдался с 0 до 5 часов по UT в период прохождения землетрясения, спутник №26 наблюдался в дневное время с 18 до 22 часов по шкале UT. Землетрясение произошло 17 августа в 1 час 39 мин 48 сек. Координаты подионосферных точек определялись для проекции точки пересечения луча зрения ИСЗ-приемник с ионосферой на высоте максимума. Высота максимума F2 слоя ионосферы определялась из решения обратной задачи радиопросвечивания. В качестве примера, на рис.2 представлены высотные профили электронной концентрации ионосферы, полученные из решения обратной задачи радиопросвечивания по наблюдениям за спутником №6 в период 14-17 августа. На рисунке хорошо видно изменение максимума F2 слоя ионосферы, обусловленное как суточным ходом ионосферы, так и влиянием землетрясения на состояние ионосферы (рис.2 в, г).

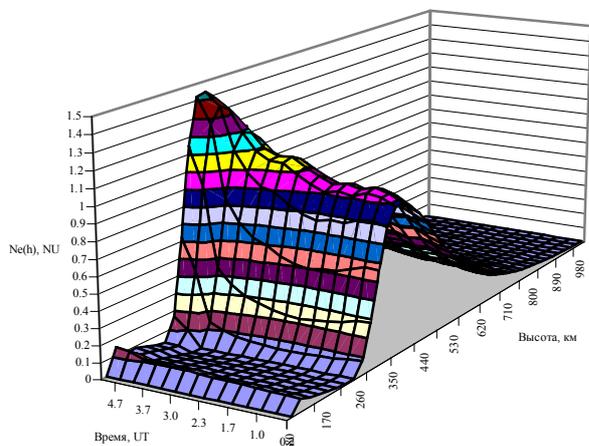
Для 4-х наблюдаемых спутников резкое изменение поведения максимума ионосферы наблюдается 16 августа, за одни сутки до землетрясения. Результаты определения максимума ионосферы представлены на рис.3. Для спутника №26 (рис.3а) поведение максимума ионосферы несколько отличается от остальных. Для этого спутника характер поведения ионосферы 14 и 15 августа разный.

Отличия проявляются как в значениях максимума ионосферы, так и на высоте 100 км. Значения электронной концентрации на высоте 100 км для этого спутника представлены на рис.4а. Следует заметить, что резкое изменение (увеличение) электронной концентрации на высоте 100 км происходило при прохождении подионосферной точки над областью с координатами примерно 40,1° с.ш. и 29,7° в.д. нетрудно заметить, что это практически совпадает с эпицентром землетрясения (40,7° с.ш. и 29,99° в.д.). Форма поведения электронной концентрации на этой высоте от 15 августа также отличается от остальных дней. В этот день при прохождении вблизи эпицентра наблюдалось повышенное значение электронной концентрации.

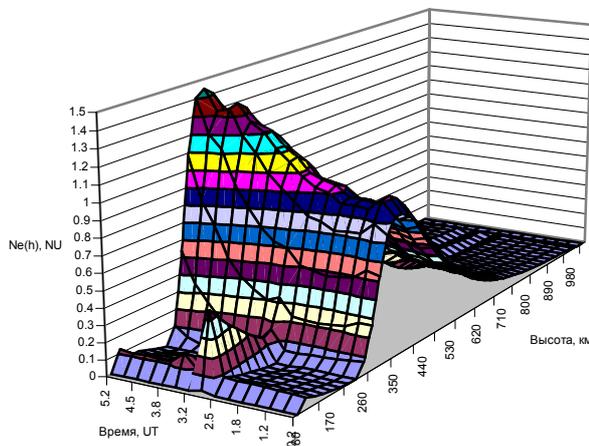
Анализ поведения ионосферы для остальных спутников показывает, что изменение состояния ионосферы 16 августа аналогичны изменениям, наблюдавшимся 14-15 августа. Так для спутника №1 (рис.3б, рис.4б), наблюдаемого в дневное время с 8 час 40 мин до 13 час 20 мин, изменение поведения ионосферы наблюдалось как на высоте максимума, так и на высоте 100 км. Характер поведения резко отличается от предыдущих дней. Резкое увеличение наблюдалось для максимума ионосферы в ближайшей к эпицентру проекции

Профили электронной концентрации, полученные по данным спутника №6 в период землетрясения в Турции 14-17 августа 1999г

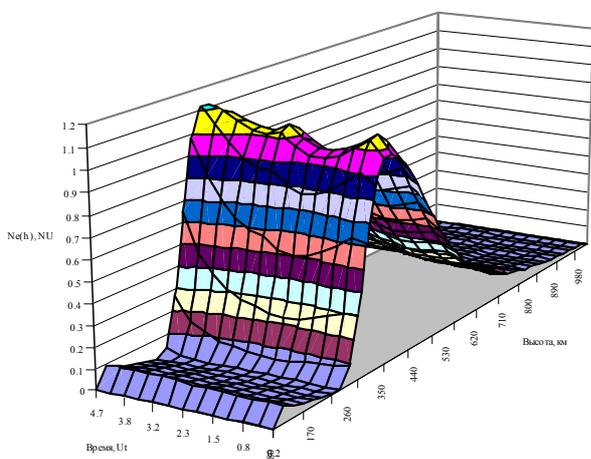
14 августа



15 августа



16 августа



17 августа

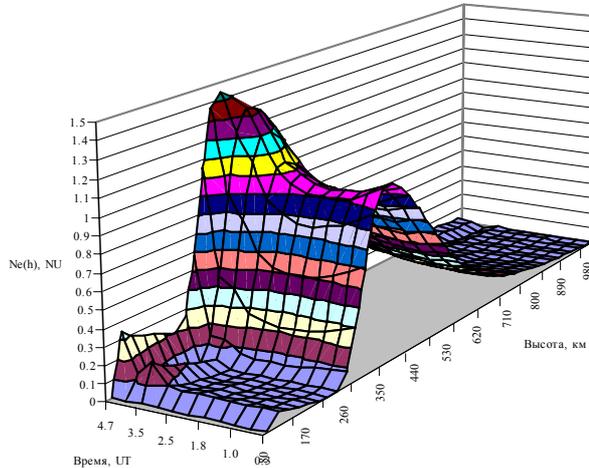


Рис. 2.

Поведение ионосферы в период землетрясения в Турции 14-18 августа 1999 г.
(спутник № 26)

на высоте максимума ионосферы

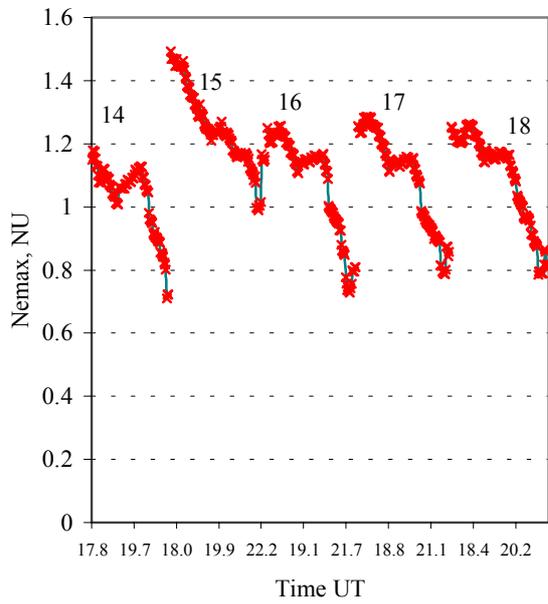


Рис. 3 а

на высоте 100 км

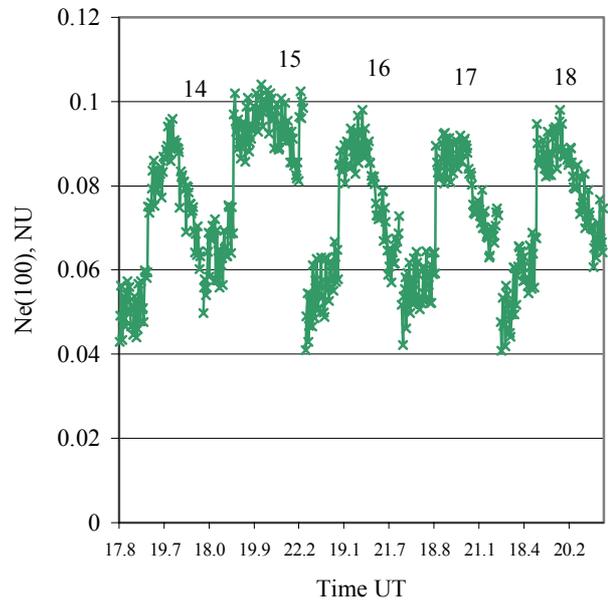


Рис. 4 а

Поведение ионосферы в период землетрясения в Турции 14-18 августа 1999 г.
(спутник № 1)

на высоте максимума ионосферы

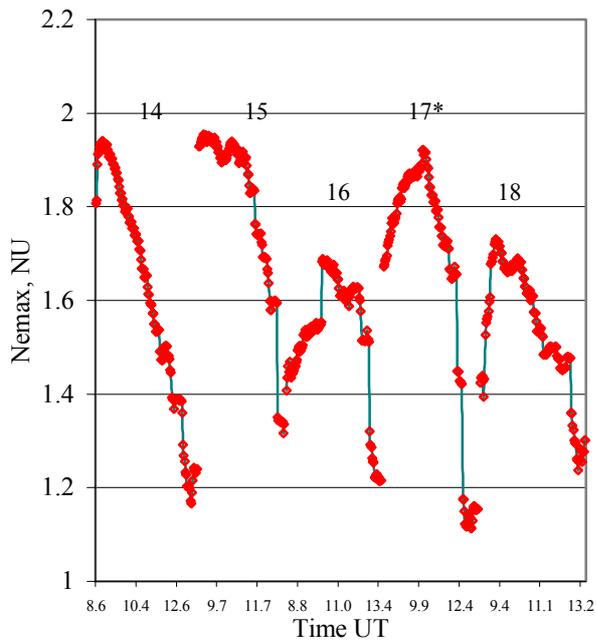


Рис. 3 б

на высоте 100 км

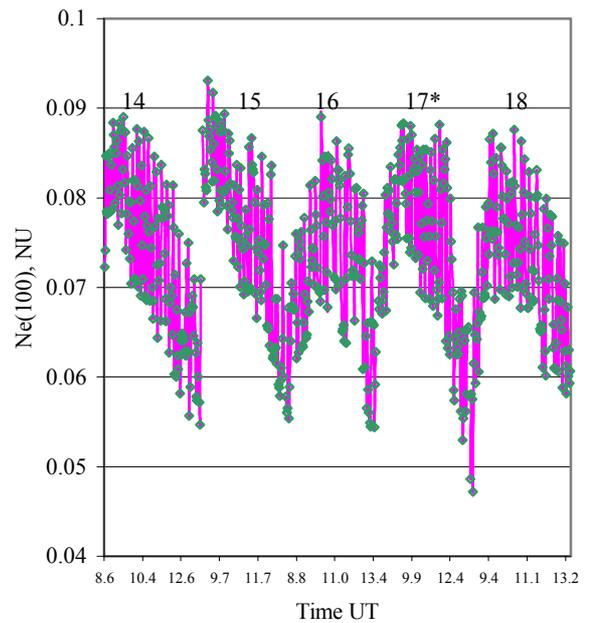
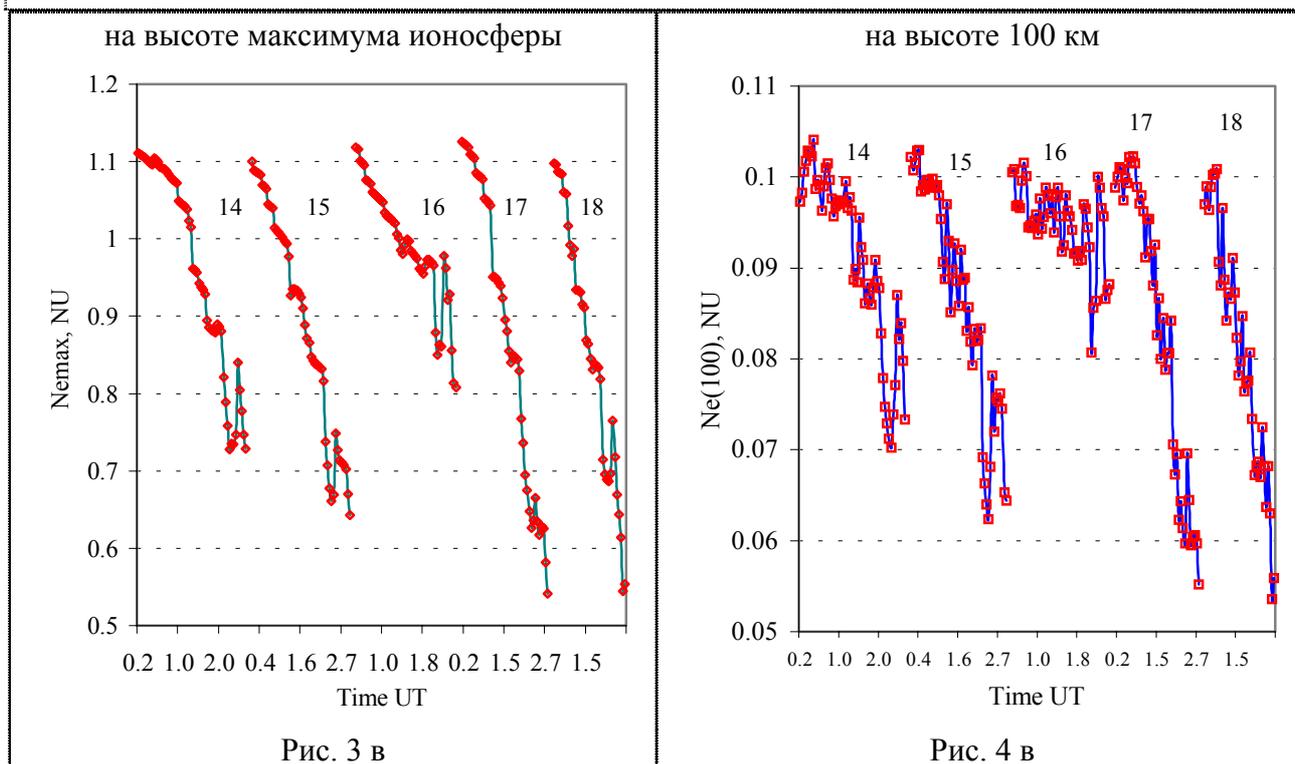


Рис. 4 б

подионосферной точке. Поведение ионосферы на высоте максимума для 16 августа можно аппроксимировать параболой, в то время как 14 и 15 августа наблюдается четко выраженный линейный тренд. Результаты определения параметров ионосферы по наблюдениям за спутниками №5 (рис.3в и 4в) и №17 (рис.3г и рис.4г) вписываются в общую картину поведения ионосферы. При этом следует заметить, что указанные спутники находились вдали от эпицентра. Особенно заметно изменение ионосферы происходило на высоте 100 км для спутника №17.

Поведение ионосферы в период землетрясения в Турции 14-18 августа 1999 г.
(спутник № 5)

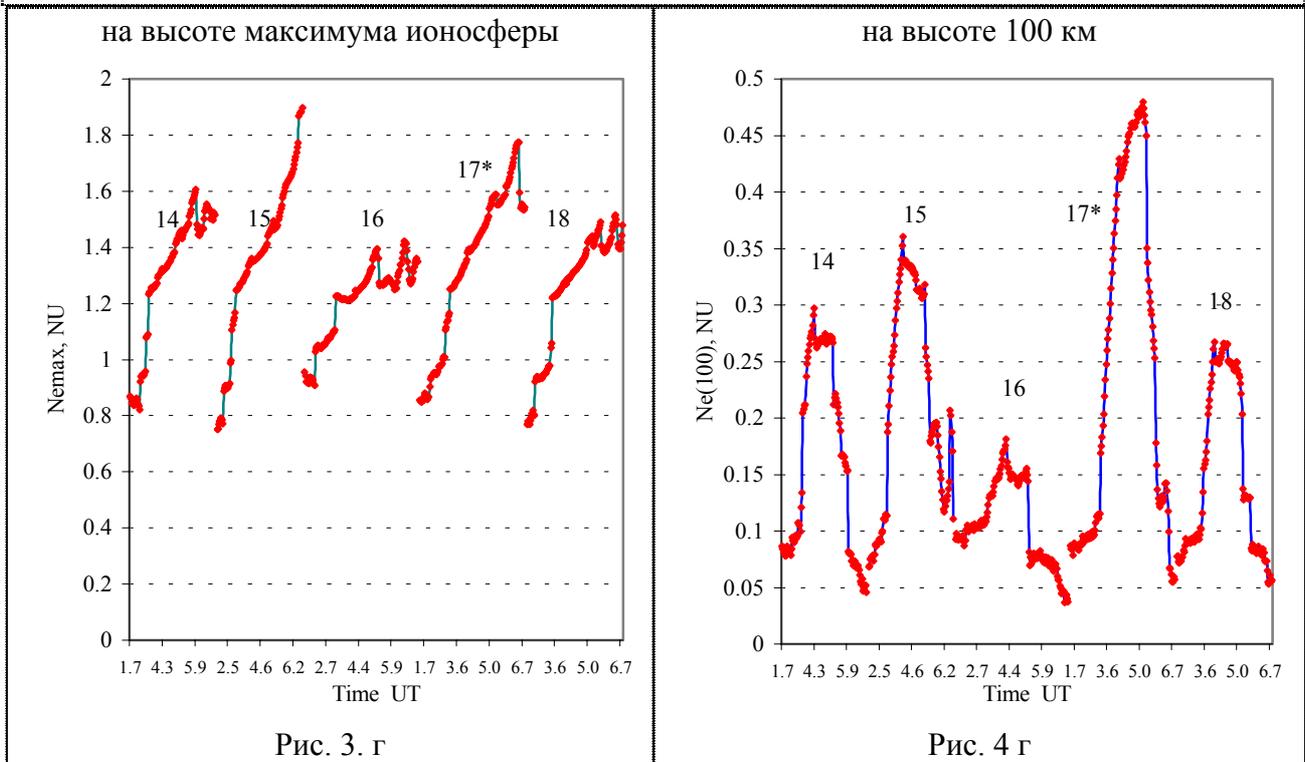


При сравнительно низком уровне значения электронной концентрации 16 августа наблюдалось резкое изменение формы 14, 15, 17 и 18 августа (рис.3 г и рис.4 г). 17 августа произошло увеличение электронной концентрации на этой высоте более чем в 3 раза по сравнению с 16 августа. 18 августа состояние ионосферы вернулось на уровень 14-15 августа.

Среди наблюдаемых спутников наиболее информативным является спутник №6, так как он наблюдался в период прохождения землетрясения, и трасса проекции подионосферных точек проходила вблизи эпицентра землетрясения в момент его возникновения. Из рис. 3 д, что поведение максимума ионосферы 14 и 15 августа практически одинаково. Резкое изменение произошло 16 августа. В начале наблюдения незначительный рост электронной концентрации в F2 слое сменился уменьшением (примерно на протяжении 1 часа). В точке с координатами 40,7 с.ш. и 30, 8 в.д. в 1 час 40 мин был достигнут минимум электронной концентрации в слое F2, который затем сменился незначительным ростом. Уменьшение и возрастание электронной концентрации наблюдалось в интервале от 0 час 30 мин до 3 часов, при этом координаты поиносферных точек изменялись от 39,0° с.ш. и 28,6° в.д. до 42,1° с.ш. и 33,8° в.д. Заметим, что минимум электронной концентрации наблюдался практически в эпицентре происшедшего 17 августа землетрясения. По-видимому, ионосфера чувствительна к изменениям в земной коре накануне землетрясения в области как минимум 250 км по широте и 600 км по долготу. При этом есть вероятность определить время и место

возникновения землетрясения. Для подтверждения такого предположения необходимо провести обработку данных измерений по другим землетрясениям.

Поведение ионосферы в период землетрясения в Турции 14-18 августа 1999 г.
(спутник № 17)

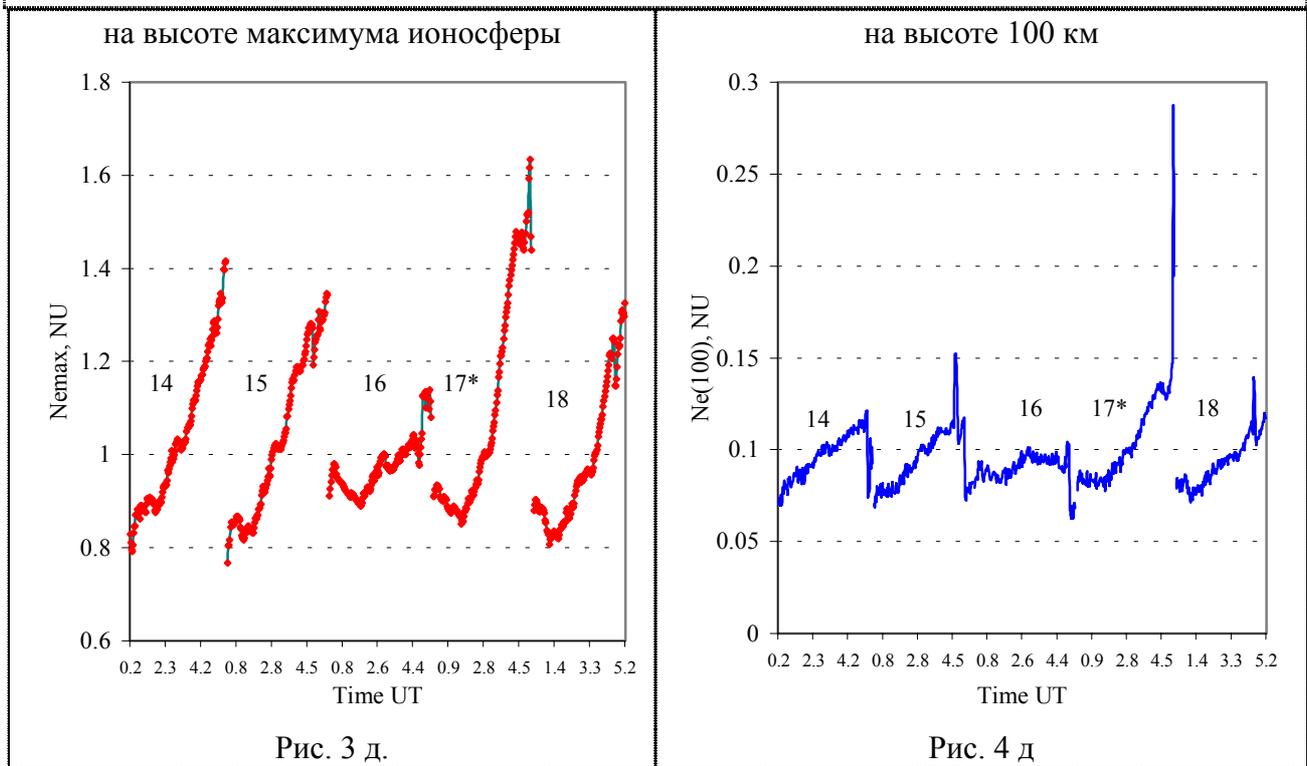


4. Выводы

Таким образом, применение метода радиопросвечивания, основанного на результатах обработки наблюдений навигационных спутниковых систем, дает возможность проведения длительного мониторинга ионосферы в сейсмоопасный период. Результаты обработки данных наблюдений 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, по-видимому, локализовать возможные районы предполагаемого землетрясения и определить время возникновения этого явления. Анализ состояния ионосферы в период землетрясения в Турции показал, что отчетливо прослеживается тенденция уменьшения электронной концентрации за сутки до предстоящего землетрясения, что хорошо подтверждается известными из литературы данными. Более того, при прохождении трассы подионосферной точки вблизи эпицентра землетрясения, наблюдалось дополнительное уменьшение электронной концентрации. При этом минимальное значение наблюдалось в ближайшей к эпицентру подионосферной точке. В частности, по наблюдениям спутника №6 минимум электронной концентрации наблюдался ровно за сутки до произошедшего в этом месте землетрясения. Естественно, делать строгие выводы из этого совпадения было бы преждевременно. Для этого необходимо провести обработку навигационных данных и анализ состояния ионосферы в период возникновения других землетрясений.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант 01-05-64040.

Поведение ионосферы в период землетрясения в Турции 14-18 августа 1999 г.
(спутник № 6)



Литература

1. Садовский М.А. Разломы и сейсмичность. //Докл. АН СССР. 1989.Т.307. №5. С.1089-1091.
2. Липеровский В.А., Похотелов О.А., Шалимов С.Л. Ионосферные предвестники землетрясений. М.: Наука. 1992. 304 с.
3. Ким В.П., Хегай В.В., Иллич-Свитыч П.В. О возможном ионосферном предвестнике землетрясений. //Физика Земли. 1994. №3. С.37-40.
4. Сетевые спутниковые радионавигационные системы. /Под ред. П.П.Дмитриева, В.С.Шебшаевича. М.: Радио и связь. 1992, 272 с.
5. Глобальная навигационная система Глонасс. Интерфейсный контрольный документ. Москва, КНИЦ ВКС, 1995, 54 с.
6. Глобальные навигационные системы. Тем. выпуск. //Труды Инст. инж. по электротехн. и радиоэлектронике. 1983, №10, с.71.
7. Долуханов М.П. Флуктуационные процессы при распространении радиоволн. М.: Связь. 1971, 183 с.
8. Шарадзе З.С. и др. Сильные землетрясения и связанные с ними возмущения в ионосфере и геомагнитном поле. //Изв. АН СССР. Физика Земли. 1989. №1. С.20-32.
9. Davies K, Hartmann G.K. Studying the ionosphere with the Global Positioning System. //Radio Sci., 1997, v.32, n.4, p.1695
10. Медведев П.П., Баранов И.С. Глобальные космические навигационные системы. //Итоги науки и техники. Сер. Геодезия и аэросъёмка. М.: ВИНТИ, 1992, т.29, 159 с.
11. Быханов Е.В. Определение параметров вращения Земли по данным траекторных измерений навигационных ИСЗ ГЛОНАСС. //Тр. 5 Российского симп. «Метрология времени и пространства». 11-13 октября 1994 г., ИМВП ГП ВНИИИФТРИ, Менделеево, с.81-85.