

Детектирование сейсмоионосферных вариаций в период геомагнитных возмущений по данным навигационных систем

В.М. Смирнов, Е.В. Смирнова

*Институт радиотехники и электроники РАН
141190, Фрязино, пл. Ак. Введенского, 1
E-mail: vsmirnov@ire.rssi.ru*

Анализ потенциальных возможностей GPS-мониторинга состояния ионосферы при детектировании возможных сейсмических предвестников рассмотрен на примере землетрясения Hector Mine 16 октября 1999 года в Калифорнии, США. Выбор этого события был обусловлен тем, что во время этого достаточно мощного землетрясения (магнитуда $M=7,1$) геомагнитная обстановка была возмущенной. Проведенный анализ показал, что наблюдаемые вариации электронной концентрации ионосферы, скорее всего, связаны с процессами подготовки землетрясения.

Дистанционное радиолокационное зондирование является одним из основных инструментов изучения околоземного пространства. В качестве зондирующих сигналов, несущих информацию о структуре удаленных от точки наблюдения объектов, могут служить спутниковые сигналы. Механизмом, обеспечивающим передачу информации, служит локальное воздействие тех или иных параметров среды на характеристики зондирующего сигнала.

Хорошим индикатором процессов, происходящих на Земле, является ионосфера. Установлено, что на стадии подготовки землетрясения ионосфера над эпицентром испытывает различного рода специфические возмущения. Наземные методы измерений, как правило, не позволяют проводить длительные и непрерывные наблюдения над эпицентрами сейсмических событий. Эта проблема может быть решена при помощи навигационных спутниковых систем, позволяющих осуществлять глобальный мониторинг состояния ионосферы методом радиопросвечивания по трассе навигационный спутник - наземный приемник [1].

Метод определения высотного распределения электронной концентрации ионосферы в полной мере удовлетворяющий приведенным требованиям разработан в работе [2, 3]. Этот метод основан на использовании измерений параметров радиосигналов существующих навигационных систем. В нем практически реализуется алгоритм решения обратных задач рефракции радиоволн, неустойчивых по своей природе и требующих применения специальных математических методов, позволяющих учитывать дополнительную информацию о решаемой задаче.

Он позволяет определять распределение электронной концентрации ионосферы в квазиреальном режиме времени в любом месте земного шара по наблюдениям с одного наземного пункта, что весьма важно для удаленных и труднодоступных регионов. Тем самым он дает возможность контролировать динамические процессы, происходящие в ионосфере, практически в реальном масштабе времени. Более того, учитывая, что многие геофизические явления, такие, например, как землетрясения, связаны с изменением локального состояния ионосферы, данный метод может рассматриваться как один из источников их обнаружения, поскольку географически эти явления и изменения параметров ионосферы наблюдаются одновременно в одном месте. Определение параметров ионосферы методом радиопросвечивания позволяет, в частности, восстанавливать высотные профили распределения электронной концентрации с дискретностью регистрации навигационных сигналов.

Геометрия схемы реализации метода радиопросвечивания для одного из спутников показана на рис. 1.

Результаты численного моделирования показали (рис. 2), что среднеквадратическая ошибка реконструкции функции высотного распределения электронной концентрации ионосферы Земли не

превышает значения $\delta N = 0,02NU$ ($1NU = 10^6 \text{ эл/см}^{-3}$). Расхождение между моделируемым значением в максимуме слоя F2 и восстановленным из решения обратной задачи составляет $\delta N = N_{e \text{ max mod}} - N_{e \text{ max rec}} = 0,014NU$ [3]. Такая точность определения электронной концентрации позволяет определять даже незначительные вариации электронного содержания. На рис.2 приведены высотные профили электронной концентрации, полученные в результате численного моделирования.

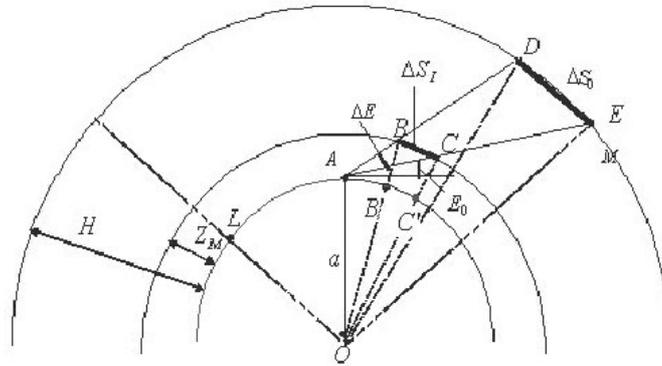


Рис. 1. Схема проведения измерений для одного спутника

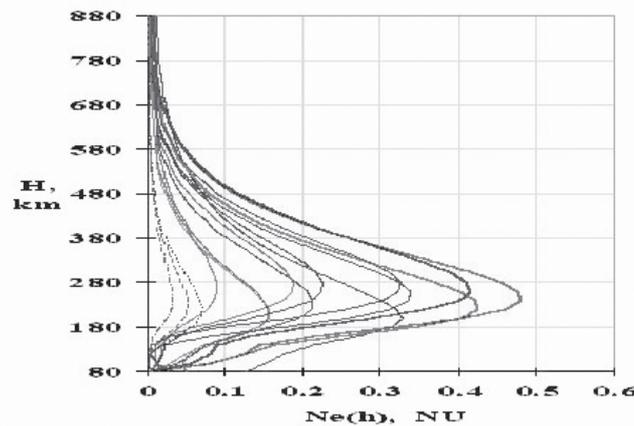


Рис. 2. Результаты численного моделирования (высотные профили распределения электронной концентрации в течение суток)

Процесс подготовки землетрясений занимает, как правило, значительный период времени и поэтому требует проведения длительных наблюдений над возможными очагами землетрясений. Полученные ранее результаты по мониторингу ионосферы над сейсмоопасными регионами показали, что для анализа состояния ионосферы достаточно использовать данные наблюдений за пять суток.

Анализ потенциальных возможностей GPS-мониторинга при детектировании возможных сейсмических предвестников рассмотрен на примере землетрясения Hector Mine 16 октября 1999 года в Калифорнии. 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. Сейсмичность территории и расположение эпицентра события показаны на рис. 3. Высокая сейсмичность территории вносит дополнительные трудности, возникающие при интерпретации ионосферных возмущений. Поэтому для того, чтобы разделить ионосферные эффекты, обусловленные воздействием гелиофизических факторов, от сейсмических, для мониторинга ионосферы использовались приемники, расположенные как вблизи эпицентра сейсмического события, так и вдали от него.

концентрации, но и «нарушение» ее пространственно-временного хода относительно предыдущих дней. Это хорошо видно на 2D-представлениях распределения электронной концентрации.

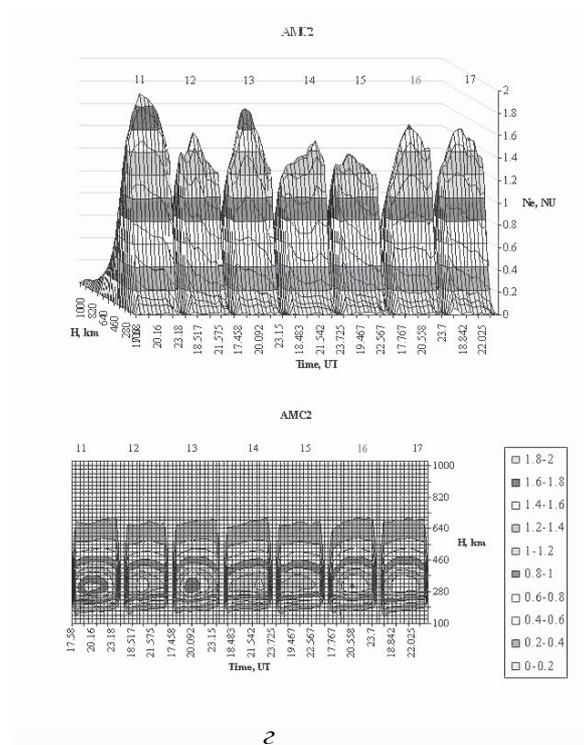
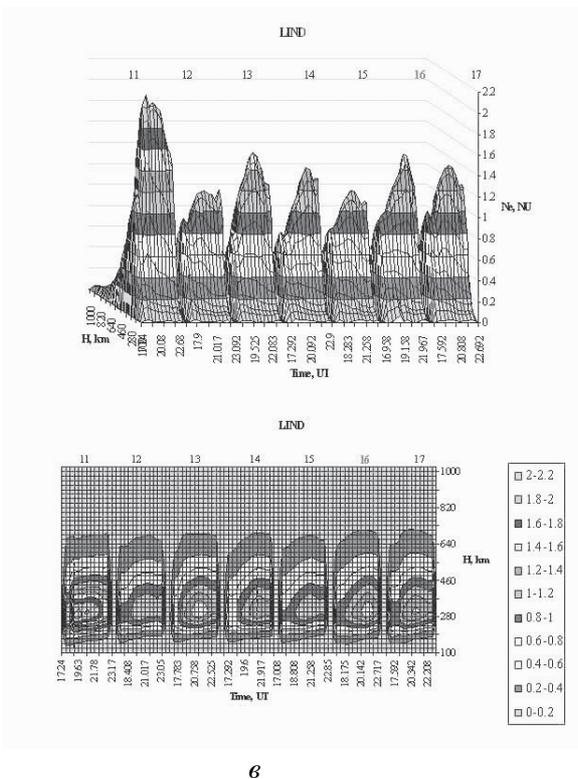
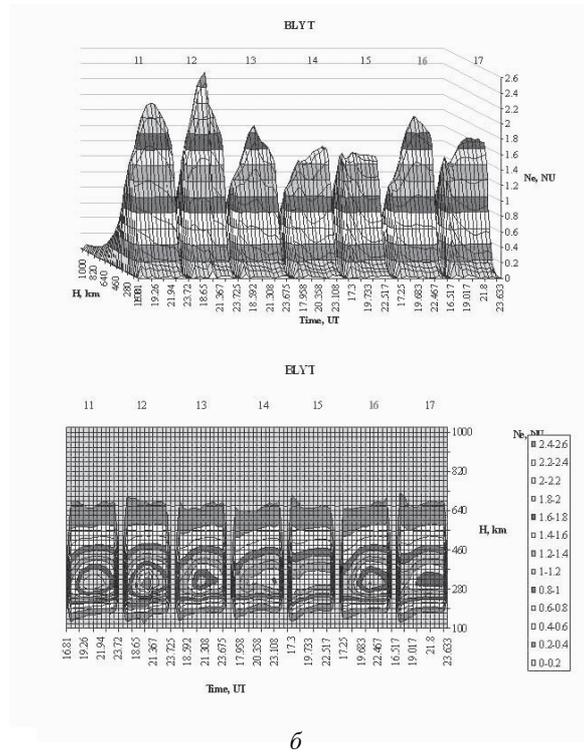
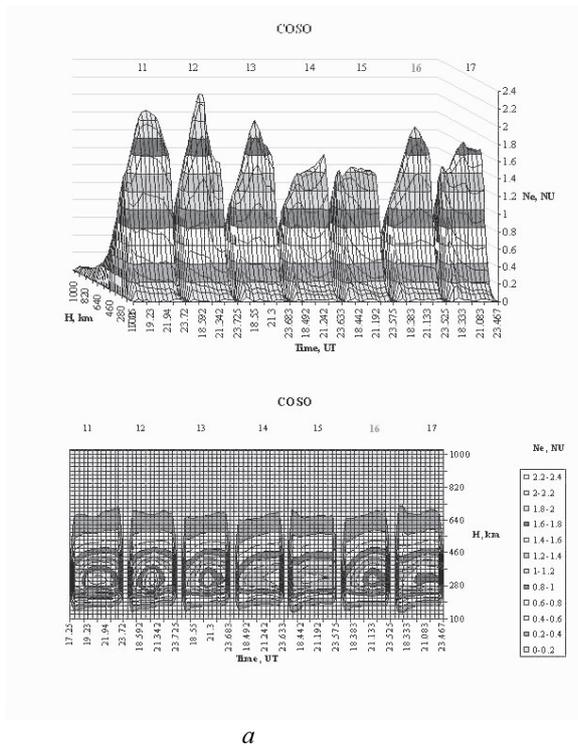


Рис. 5. Высотные профили электронной концентрации (3D-представление) и их двумерное отображение (2D-представление) вблизи эпицентральной области (а, б) и вдали от нее (в, г)

Несколько 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 ярко 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 показал, что наличие в это время возмущенной геомагнитной обстановки.

Данные по геомагнитным индексам Dst и Kp за 11-17 октября 1999 г., представленные на сайте [WDC], дают основание отнести данный интервал времени к периоду умеренной магнитной 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. Поэтому, изменения в пространственно-временном распределении электронной концентрации, наблюдаемые на станциях COSO, AVRY и BLYT, могут быть вызваны эффектами сейсмического происхождения.

Таким образом, применение метода радиопросвечивания, основанного на результатах обработки данных с навигационных спутниковых систем, дает возможность проведения длительного мониторинга состояния ионосферы в сейсмоопасный период и при наличии геомагнитной возмущенности.

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 предполагаемого землетрясения и определить время возникновения этого явления.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты РФФИ №№ 04-05-64207, 04-05-08045_офи-а).

Литература

1. Андрианов В.А., Смирнов В.М. Определение высотного профиля электронной концентрации ионосферы Земли по двухчастотным измерениям радиосигналов искусственных спутников Земли // Радиотехника и электроника, 1993. Т.38. №7. С.1326-1337.
2. Андрианов В.А., Мосин Е.Л., Смирнов В.М. Определение регулярных вариаций F2- области ионосферы Земли по измерениям параметров сигналов навигационных спутников // Исследование Земли из космоса, 2000. №1. С.15.
3. Смирнов В.М. Решение обратной задачи радиопросвечивания ионосферы Земли градиентными методами // Радиотехника и электроника, 2001. №1. С.47-52.
4. Афраимович Э.Л. и др. Поиски предвестников землетрясений в вариациях полного электронного содержания в ионосфере по данным GPS во время землетрясения НЕСТОР MINE 16 октября 1999 г. // 3 международная конференция «Солнечно-земные связи и электромагнитные предвестники землетрясений». 16-21 августа 2004, ИКИР. Т.1. С.3-18.