

Мониторинг вариаций ионосферы в период подготовки и прохождения землетрясений по данным спутниковых навигационных систем

В.Бондур*, В.Смирнов

Научный центр проблем аэрокосмического мониторинга «Аэрокосмос»
105064, Москва, Гороховский переулок 4, Россия - vgbondur@online.ru

Abstract - Рассмотрен метод радиопросвечивания, позволяющий восстанавливать высотные профили распределения электронной концентрации ионосферы по данным двухчастотных сигналов спутниковых навигационных систем. Спутниковые системы GPS и ГЛОНАСС, несмотря на сложность детектирования ионосферных вариаций, обусловленных сейсмическими эффектами в период подготовки землетрясений, наилучшим образом приспособлены для осуществления глобального мониторинга ионосферы над сейсмоопасными территориями.

Приведены результаты практической реализации предложенного метода в период землетрясений, произошедших в двух регионах, отличающихся сейсмической активностью. Вариации электронной концентрации ионосферы Земли, полученные по наблюдениям спутников навигационной системы GPS, были проанализированы в период подготовки и прохождения землетрясений в Калининградской области 21 сентября 2004 г. (сейсмостойкая область) и в Турции 17 августа 1999 г. (сейсмоактивная область). Для определения высотных профилей ионосферы использовались стандартные RINEX-файлы наблюдений с различных наземных станций. Показано, что пространственно-временные аномалии ионосферы в эпицентральных областях готовящихся землетрясений могут быть использованы в качестве предвестников значительных сейсмических событий.

Keywords: earthquake, ionosphere, radiotranslucence method, GPS, monitoring.

1. ВВЕДЕНИЕ

Обнаружение со спутников различных эффектов сейсмической активности стимулировало использование космической техники для решения проблем прогноза землетрясений (Calais, 1995; Липеровский, 1992; Савин, Бондур, 2000). Процесс подготовки землетрясений занимает, как правило, значительный период времени и поэтому требует проведения длительных наблюдений над их возможными очагами. Такие данные могут быть получены только с применением космических аппаратов, в частности, навигационных спутниковых навигационных систем (Андрианов, Смирнов, 1993; Савин, Бондур, 2000; Бондур, Смирнов, 2005а,б). Последние исследования показали, что спутниковые навигационные системы могут быть успешно использованы для глобального и непрерывного мониторинга ионосферы Земли (Бондур, Смирнов, 2005а,б). Особенности орбитального построения этих систем и большое количество наземных приемных станций, которые могут быть размещены практически в любой точке Земли, позволяют контролировать состояние ионосферы в сейсмоопасных регионах, удаленных от пункта наблюдения на расстояния ~1500 км в одно и тоже время суток.

Анализ критических частот слоя F2, проведенный в работах (Липеровский, 1992; Гохберг и др., 1983; Calais, 1995;) позволил сделать вывод о том, что в широкой области ионосферы в период подготовки землетрясений происходит общее увеличение электронной концентрации в слое F2 за 2-3 суток до момента толчка. За сутки до начала землетрясения отмечается локальный минимум электронной концентрации над эпицентральной областью. Однако, каких-либо общепринятых методик мониторинга ионосферных эффектов, обусловленных влиянием землетрясений, по данным спутниковых навигационных систем до недавнего времени не было.

В настоящей работе рассмотрен метод радиопросвечивания, позволяющий восстанавливать высотные профили распределения электронной концентрации ионосферы с дискретностью регистрации навигационных сигналов, и приведены результаты его практической реализации в период землетрясения в сейсмически спокойной зоне в Калининградской области (2004 г.) и сейсмоактивной зоне в Турции (1999 г.).

2. МЕТОД РАДИОПРОСВЕЧИВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ

Метод радиопросвечивания основан на обращении приведенной разности фаз радиоволн и математически соответствует обращению интегрального уравнения первого рода (Андрианов, Смирнов, 1993; Бондур, Смирнов, 2005а).

Практическая реализация метода основана на использовании измерений параметров радиосигналов на трассе “спутник - наземный пункт“ по наблюдениям с одного пункта (Бондур, Смирнов, 2005а). При измерениях в пределах диапазона углов ΔE , минимальный размер которого определяется алгоритмом решения обратной задачи, параметр ΔS_I можно рассматривать как горизонтальный масштаб осреднения в пределах ионосферы при восстановлении высотного профиля электронной концентрации, а сам профиль относить к середине проекции дуги ΔS_I на земную поверхность. При проведении наблюдений под углом места E_0 от 10 до 90° проекция точки пересечения луча зрения спутник – приемник может быть удалена от пункта приема на расстояние L до 1100 км. Численные оценки зон наблюдений для интервала наблюдения $T = 600/30$ сек даны в таблице 1

Таблица 1. Численные оценки зон наблюдений спутниковыми навигационными системами

Параметры	Геометрические масштабы при радиопросвечивании ионосферы				
	10	30	50	70	90
E_0 , град					
ΔE , град	5.8/0.29	6.3/0.31	6.8/0.34	7.1/0.35	7.2/0.36
ΔS_I , км	282/16.8	96/5.4	53/2.9	40/2.1	38/1.9
L , км	1096	467	237	104	0

Интегральное уравнение первого рода, соответствующее такой схеме измерений параметров ионосферы, не имеет аналитического решения и требует разработки методов обращения в классе т.н. некорректных задач (Бондур, Смирнов, 2005а). Эти методы в настоящее время достаточно хорошо развиты в первую очередь благодаря трудам математической школы А.Н. Тихонова (Тихонов, Арсенин, 1986). В существенной мере они опираются на численные алгоритмы расчета и с учетом современной компьютерной техники могут быть применены для обращения измерений радиосигналов.

Некорректность задачи восстановления распределения электронной концентрации по результатам радиопросвечивания не позволяет получить точное решение основного интегрального уравнения, устойчивое к малым изменениям входных данных. В этом случае следует искать некоторое приближенное решение, отбирая одно приемлемое решение из всех возможных. Возникающие при практической реализации этого подхода математические трудности вынуждают нередко отказаться от глобального решения проблемы восстановления параметров среды распространения. При этом часто приходится ограничиваться некоторыми простейшими случаями, для которых можно получить приемлемые результаты.

Полученное в предположении локальной сферически слоистой среды уравнение радиопросвечивания связывает измеренную радиотехническим способом разность псевдодальностей с функцией высотного распределения электронной концентрации $N(z)$ следующим образом (Андрианов, Смирнов, 1993; Бондур, Смирнов, 2005а):

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

где z_1 и z_2 - предполагаемые нижняя и верхняя границы ионосферы соответственно,

$\vartheta = 90 - E$ - зенитный угол наблюдения спутника с пункта измерений,

a - радиус Земли,

z - текущая высота от поверхности Земли,

δ - погрешность радиотехнических измерений,

$f_{1,2}$ - навигационные частоты, $k = (f_1/f_2)^2$.

В операторном виде уравнение радиопросвечивания (1) может быть записано как

$$A\varphi = U_\delta, \quad (2)$$

где A - интегральный оператор,

$\varphi \equiv N(z)$, U_δ - данные радиотехнических измерений.

В (1) выражение слева представляет собой полную электронную концентрацию ионосферы (TEC) вдоль пути распространения навигационного сигнала:

$$TEC = \int_L N(l)dl = 2,475 \cdot 10^{-8} \frac{f_1^2}{k} [\Delta R(f_1, f_2) - \delta] \quad (3)$$

Поиск возможного решения задачи (1) целесообразнее осуществлять с помощью метода сопряженных градиентов (Тихонов, Арсенин, 1986). Он является математически строгим методом решения обратных задач с ограничениями и позволяет получать приемлемые решения на выпуклых множествах.

При переходе к конечномерной аппроксимации функционал

$$\Phi(\varphi) = \|A\varphi - U_\delta\|^2 \quad (4)$$

переходит в квадратичную функцию $\varphi(z)$, которую можно представить в обобщенном виде:

$$\varphi(z) = (z, Qz) + (b, z) + c. \quad (5)$$

где Q, b, c - коэффициенты квадратичного многочлена.

При разностной аппроксимации задача минимизации сводится к построению минимизирующей последовательности, элементы которой φ_i должны минимизировать квадратичную функцию $\varphi(z)$ и удовлетворять при этом ограничениям, накладываемым априорной информацией. Процедура минимизации заключается в следующем. Элементы φ_i минимизирующей последовательности определяются по приведенной далее схеме. Каждый последующий элемент φ_{i+1} связан с предыдущим φ_i соотношением:

$$\varphi_{i+1} = \varphi_i - \beta_i p_i, \quad (6)$$

где $p_i = -grad\varphi|_{z=z_i} + \frac{\|grad\varphi(z_i)\|^2}{\|grad\varphi(z_{i-1})\|^2} p_{i-1}$ - градиент

функции,

$$p_0 = -grad\varphi(z_0), \beta_i = \frac{1}{2} \frac{(grad\varphi(z_i), p_i)}{(Qp_i, p_i)} \quad - \text{ шаг}$$

градиента,

$\varphi(z_0)$ - начальное приближение решения задачи.

Результаты численного моделирования показали, 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 и восстановленным из решения обратной задачи составляет $\delta N = N_{e \text{ max mod}} - N_{e \text{ max rec}} = 0,014NU$ (Смирнов, 2001).

Рассмотрим применение данного метода в период подготовки и прохождения землетрясений, которые произошли в Калининградской области 21 сентября 2004 года (сейсмостойкая зона) и в Турции 17 августа 1999 г. (сейсмоактивная зона).

3. СЕЙСМОИОНОСФЕРНЫЕ ВАРИАЦИИ В ПЕРИОД ПОДГОТОВКИ И ПРОТЕКАНИЯ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

21 сентября 2004 года в районе г. Калининград (Россия) произошло 2 землетрясения с магнитудами $M=4,8$ и $M=5$. Особенностью этих землетрясений является то, что они произошли в зоне, не являющейся сейсмоактивной. Значимое последнее землетрясение было зафиксировано на этой территории в 1977 г.

Оба землетрясения наблюдались практически в одном месте с интервалом в 2,5 часа (11:05:04 UTC и 13:32:31

UTC). Эпицентры землетрясений соответствовали 54.914 с.ш., 20.172 в.д. и 54.789 с.ш., 20.055 в.д., соответственно.

Траектории подионосферных точек для некоторых спутников навигационной системы GPS, наблюдавшихся одновременно с пунктов RIGA, BOGI и MDVJ в период подготовки и прохождения землетрясения, показаны на рис.1.

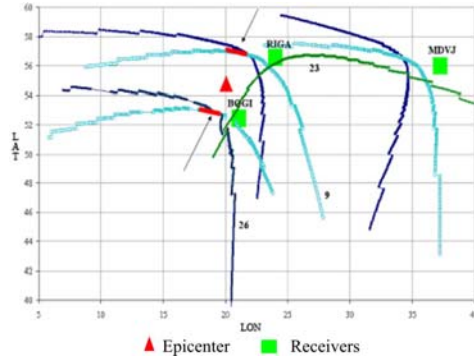


Рис.1. Траектории подионосферных точек относительно эпицентра и приемников (Калининград, 21 сентября 2004 года)

Для мониторинга состояния ионосферы были выбраны в основном, спутники, наблюдавшиеся в период прохождения землетрясения. Один из этих спутников, №23, наблюдался ранним утром за 4-7 часов до момента землетрясения. Наименьшее расстояние от подионосферной точки до эпицентра землетрясения было около 180 км для спутника №23, 290 км для спутника №26 и 230 км для спутника №9.

Для анализа фонового состояния ионосферы использовались данные наблюдений за шесть полных суток – с 16 по 21 сентября 2004 г. на удаленной станции MDVJ (Бондур, Смирнов, 2005а). На рис. 2 приведены высотные профили распределения электронной концентрации, полученные по наблюдениям GPS спутника № 26 с наземной станции RIGA.

Как следует из анализа этого рисунка, 19 сентября 2004 г. (за двое суток до землетрясения) значение максимума электронной концентрации в F2 слое ионосферы, заметно уменьшилось по сравнению с данными за 18 сентября 2004 г. 16-18 сентября отмечался рост электронной концентрации. Такое состояние ионосферы характерно для периода подготовки землетрясения. Более того, изменение значений максимума электронной концентрации ионосферы, полученной по данным спутника №29, траектория подионосферной точки

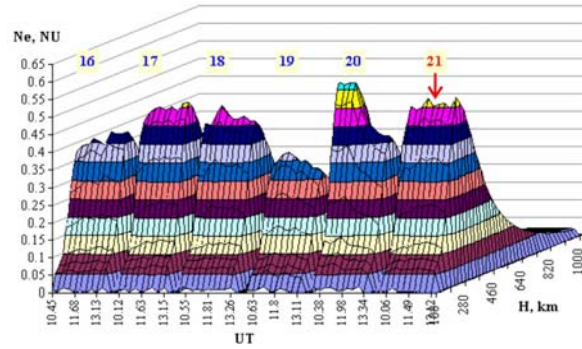


Рис.2. Профили электронной концентрации в период 16-21 сентября 2004 года (RIGA, спутник №26)

которого близка к траектории спутника 26, носила волнообразный характер с периодом около 1 часа. Изменение максимума электронной концентрации $N_{e,max}$ ионосферы, полученное по наблюдениям спутника №9, имело седловидный характер. Минимальное значение $N_{e,max}$ наблюдалось в ближайшей к эпицентру области ионосферы в период с 12:50 по 13:30 UT. Характер изменения высотного распределения электронной концентрации, полученной с помощью приемника BOGI, аналогичен.

На рис. 1 область локального минимума указана стрелками. По-видимому, эта область была вытянута в северо-восточном направлении, так как была зафиксирована одновременно приемниками станций RIGA и BOGI. Профили электронной концентрации, полученные с помощью приемника станции MDVJ на расстоянии более 1000 км, не имеют каких-либо вариаций (Бондур, Смирнов, 2005а). Это позволяет сделать вывод о том, что изменения в ионосфере, регистрируемые приемниками станций RIGA и BOGI, обусловлены воздействием факторов, связанных с землетрясением.

Применение метода радиопросвечивания позволило проследить поведение максимума электронной концентрации вдоль траектории подионосферной точки для нескольких спутников системы GPS в период подготовки и протекания сильнейшего землетрясения в Турции 17 августа 1999 г. В эпицентре магнитуда этого землетрясения составила 7.7.

Траектории подионосферных точек для спутников, наблюдаемых в период прохождения Измитского землетрясения, представлены на рис. 3. 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.

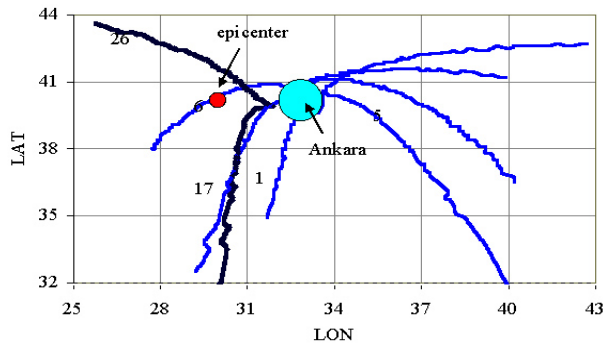


Рис.3. Траектории подионосферных точек относительно эпицентра и приемников (Турция, Измит, 17 августа 1999г.)

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, а спутник №26 наблюдался в дневное время с 18 до 22 часов UT. Для 4-х спутников резкое изменение поведения максимума электронной концентрации ионосферы наблюдалось 16 августа 1999 г. (за одни сутки до землетрясения). Результаты определения максимума электронной концентрации ионосферы по данным спутника №6 представлены на рис. 4.

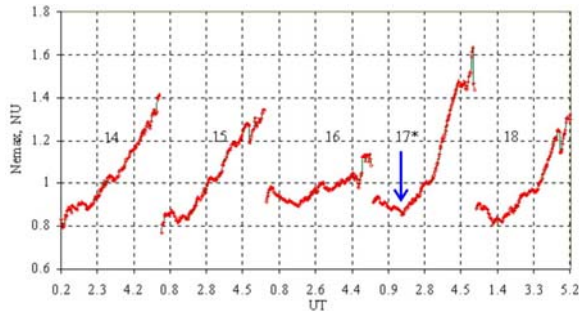


Рис.4. Вариации максимума электронной концентрации ионосферы в период 14-18 августа 1999 г. (станция Анкара, спутник №6)

Минимум $N_{e,max}$, зафиксированный 16 августа 1999 г., наблюдался в точке, наиболее близкой к эпицентру землетрясения. Профили электронной концентрации, полученные с 12 по 18 августа 1999 г., представлены на рис. 5. Здесь хорошо проявляется существенное изменение их формы за сутки до землетрясения.

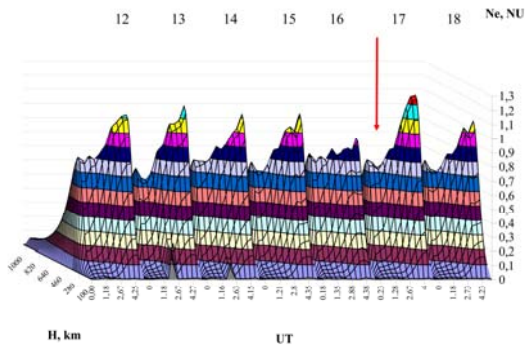


Рис.5. Высотные профили электронной концентрации ионосферы с 12-18 августа 1999 г. (Измит, Турция)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение метода радиопросвечивания ионосферы дает возможность проведения длительного мониторинга ионосферы в сейсмоопасных районах Земли. Приведенные результаты показали, что изменение состояния ионосферы в период подготовки землетрясений можно контролировать с помощью спутниковых навигационных систем. В отличие от ионосферных станций вертикального зондирования предложенный подход позволяет локализовать возможные районы предполагаемых землетрясений и определить время возникновения этих опасных природных явлений. Мониторинг состояния ионосферы с использованием двухчастотных радиосигналов спутниковых навигационных систем в период подготовки и свершения землетрясений показал, что отчетливо прослеживается тенденция увеличения электронной концентрации за 3 – 5 суток до предстоящего землетрясения и уменьшения электронной концентрации за 1-3 суток до него.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Андреанов 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.
- Бондур В.Г., Смирнов В.М. (а) Метод мониторинга сейсмоопасных территорий по ионосферным вариациям, регистрируемым спутниковыми навигационными системами //Доклады академии наук, 2005, т. 403, № 1.
- Бондур В.Г., Смирнов В.М. (б) Мониторинг ионосферных предвестников цунамигенных землетрясений по данным спутниковых навигационных систем (в настоящих материалах), 2005.
- Гохберг М.Б., Пилипенко В.А., Похотелов О.А. О сейсмических предвестниках в ионосфере. //Физика Земли, 1983, т. 10, с. 17-21.
- Липеровский В.А., Похотелов О.А., Шалимов С.Л. Ионосферные предвестники землетрясений. М.: Наука, 1992.
- Савин А.И., Бондур В.Г. Научные основы создания и диверсификации глобальных аэрокосмических систем. Оптика атмосферы и океана. № 1, 2000. с. 46-62.
- Calais E., Minster J.B. GPS detection of ionospheric perturbations following the January 1994, Northridge earthquake. //Geophys. Res. Lett. 1995, v.22, no.15, p.1045-1048.
- Смирнов В.М. Решение обратной задачи радиопросвечивания ионосферы Земли градиентными методами. //Радиотехника и электроника. 2001, №1, с.47-52.
- Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1986, 288 с.