

МЕТОД МОНИТОРИНГА СЕЙСМООПАСНЫХ ТЕРРИТОРИЙ ПО ИОНОСФЕРНЫМ ВАРИАЦИЯМ, РЕГИСТРИРУЕМЫМ СПУТНИКОВЫМИ НАВИГАЦИОННЫМИ СИСТЕМАМИ

© 2005 г. Академик В. Г. Бондур, В. М. Смирнов

Поступило 08.02.2005 г.

ВВЕДЕНИЕ

Исследования состояния ионосферы во время сейсмической активности показали, что над эпицентрами готовящихся землетрясений модифицируются спектры вариаций ряда ионосферных параметров, прежде всего электронной концентрации в различных слоях, главным образом в слое F2 [1–6]. Выявленные эффекты могут быть использованы для краткосрочного прогнозирования землетрясений при условии регулярного оперативного поступления текущей информации о состоянии ионосферы.

Несмотря на сложность детектирования ионосферных аномалий, обусловленных сейсмическими эффектами, решение задач глобального оперативного мониторинга ионосферы могут обеспечить космические навигационные системы GPS и ГЛОНАСС, позволяющие контролировать практически любые сейсмоопасные регионы Земли. Главным условием является наличие эффективных методов восстановления параметров ионосферы по принимаемым радиосигналам.

В настоящем сообщении рассмотрен метод радиопросвечивания и его алгоритмическая реализация, позволяющие восстанавливать высотные профили электронной концентрации ионосферы, на основании двухчастотных радиосигналов, регистрируемых приемниками спутниковых навигационных систем. Приведены результаты практической реализации предлагаемого подхода для анализа ионосферных предвестников в период землетрясения, состоявшегося в сейсмостойкой зоне (Калининградская обл.) в сентябре 2004 г.

Научный центр проблем аэрокосмического мониторинга "Аэрокосмос", Москва

Институт радиоэлектротехники и электроники Российской Академии наук, Фрязино Московской обл.

МЕТОД РАДИОПРОСВЕЧИВАНИЯ И ЕГО АЛГОРИТМИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

Метод радиопросвечивания основан на обращении приведенной разности фаз радиоволн и математически соответствует обращению интегрального уравнения первого рода. При этом используются измерения параметров радиосигналов на трассе спутник – наземный пункт (рис. 1) по наблюдениям с одного пункта (A) [2, 7]. В процессе измерений (рис. 1) в пределах угла ΔE , минимальный размер которого определяется алгоритмом решения обратной задачи восстановления высотного профиля электронной концентрации, длину дуги BC, связанной с прохождением спутником участка траектории ED, можно рассматривать как горизонтальный масштаб осреднения ΔS_1 в пределах ионосферы, а сам профиль можно относить к середине проекции B'C' дуги на земную поверхность.

Соответствующее этой схеме интегральное уравнение первого рода не имеет аналитического решения и требует разработки методов обращения в классе некорректных задач. Эти методы в настоящее время достаточно хорошо развиты, в первую очередь благодаря трудам А.Н. Тихонова и его школы (см., например, [8]).

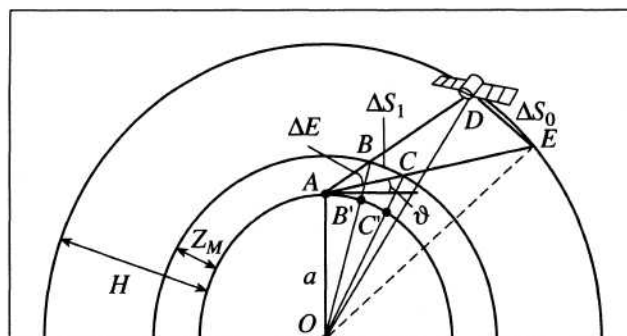


Рис. 1. Схема проведения измерений при реализации метода радиопросвечивания ионосферы.

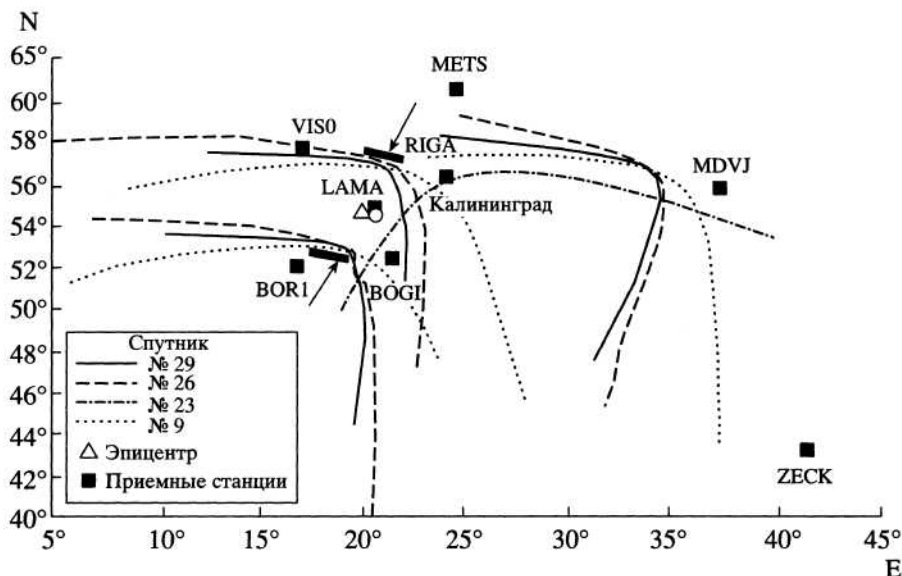


Рис. 2. Траектории подионосферных точек для различных спутников GPS относительно эпицентра землетрясения в Калининграде и различных приемных станций.

Таким образом, 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. При произвольном выборе метода получения приближенного решения легко получить неверный результат. Для исключения случайных факторов и определения общих методов решения некорректной задачи реконструкции параметров ионосферы методом радиопросвечивания должны разрабатываться новые подходы. При этом необходимо использовать дополнительную априорную информацию о состоянии ионосферы [7, 9]. Применяемые для этого алгоритмы должны:

хорошо восстанавливать параметры ионосферы независимо от конкретной ситуации при проведении измерений;

обладать устойчивостью к погрешностям измерений, которая должна обязательно достигаться с использованием общего математического подхода, допускающего автоматическую обработку данных измерений на всей трассе полета космического аппарата;

давать возможность управления процессом восстановления для учета специфической структуры ионосферы;

иметь наращиваемую структуру для введения дополнительных ограничений, приводящих к сужению области допустимых решений, в зависимо-

сти от имеющихся априорных сведений и вычислительной схемы решения задачи;

обеспечивать возможность получения количественных оценок каждого ограничения на основе результатов независимых измерений.

Применение итерационной процедуры решения задачи радиопросвечивания, основанной на использовании метода сопряженных градиентов, который является математически строгим методом решения обратных задач с ограничениями, а также априорной информации о состоянии ионосферы практически полностью удовлетворяет приведенным требованиям.

В предположении локальной сферически-слоистой среды уравнение радиопросвечивания, связывающее измеренную радиотехническим способом разность псевдодальностей с функцией высотного распределения электронной концентрации $N(z)$, выглядит следующим образом [7]:

$$\int_{z_1}^{z_2} N(z) \frac{(a+z)dz}{[(a+z)^2 - a^2 \sin^2 \vartheta]^{1/2}} = 2.475 \cdot 10^{-8} \frac{f_1^2}{k} [\Delta R(f_1, f_2) - \delta], \quad (1)$$

где z_1 и z_2 – предполагаемые нижняя и верхняя границы ионосферы соответственно, ϑ – зенитный угол наблюдения спутника из пункта измерений A (рис. 1), a – радиус Земли, z – текущая высота от поверхности Земли, δ – погрешность ра-

диотехнических измерений, $f_{1,2}$ – навигационные частоты, $k = \left(\frac{f_1}{f_2}\right)^2$.

В операторном виде уравнение радиопросвечивания (1) можно записать следующим образом:

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

где A – интегральный оператор, $\psi = N(z)$, U_δ – данные радиотехнических измерений.

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

$$\begin{aligned} \text{TEC} &= \int_L N(l) dl = \\ &= 2.475 \cdot 10^{-8} \frac{f_1^2}{k} [\Delta R(f_1, f_2) - \delta]. \end{aligned} \quad (3)$$

Поиск решения задачи (1) производится с помощью метода сопряженных градиентов, позволяющего получать решения на выпуклых множествах. В этом случае при конечномерной аппроксимации функционал вида

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

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

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

где Q, b, c – коэффициенты квадратичного многочлена.

Задача поиска минимума для (5) сводится к построению последовательности, элементы φ_i которой должны минимизировать квадратичную функцию $\Phi(z)$ и удовлетворять при этом ограничениям, накладываемым априорной информацией.

Процедура минимизации заключается в следующем. Элементы φ_i последовательности определяем, исходя из того, что каждый последующий элемент φ_{i+1} связан с предыдущим элементом φ_i соотношением

$$\begin{aligned} \varphi_{i+1} &= \varphi_i - \beta_i p_i, \\ p_i &= -\text{grad} \Phi|_{z=\varphi_i} + \frac{\|\text{grad} \Phi(z_i)\|^2}{\|\text{grad} \Phi(z_{i-1})\|^2} p_{i-1}, \\ \beta_i &= \frac{1}{2} \frac{(\text{grad} \Phi(z_i), p_i)}{(Q p_i, p_i)}, \end{aligned} \quad (6)$$

где p_i – градиент функции, $p_0 = -\text{grad} \Phi(z_0)$; β_i – шаг градиента; $\varphi(z_0)$ – начальное приближение решения, в качестве которого можно использовать общепринятые модели ионосферы.

При решении задачи применяется следующая априорная информация: наличие максимума (точ-

ки перегиба) высотного профиля распределения электронной концентрации ионосферы $N(z)$; существенная для радиотехнических измерений область ионосферы расположена в пределах высот $H = 100$ – 1000 км [4, 5].

При практической реализации метода для получения начального приближения искомого профиля электронной концентрации ионосферы используется некоторое среднее значение уровня солнечной активности. Применение такой информации позволяет успешно решать задачу определения высотного профиля распределения электронной концентрации $N(z)$.

Результаты численного моделирования показали, что среднеквадратическая ошибка реконструкции искомой функции $N(z)$ не превышает значения $\delta_N = 0.02 \text{ NU}$ ($1 \text{ NU} = 10^6 \text{ эл/см}^3$). Расхождение в максимуме электронной концентрации ионосферы между моделируемым значением и восстановленным из решения обратной задачи составляет $\delta N = 0.014 \text{ NU}$ [9].

На основании предложенного метода и алгоритма его реализации разработано программное обеспечение, которое использовано для детектирования ионосферных предвестников землетрясений на основании двухчастотных сигналов космических навигационных систем.

СЕЙСМОИОНОСФЕРНЫЕ ВАРИАЦИИ В ПЕРИОД ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ В КАЛИНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ

Рассмотрим конкретный пример применения описанного подхода для исследования ионосферных предвестников землетрясений с магнитудами $M = 5$ и $M = 4.8$, состоявшихся 21 сентября 2004 г. в районе г. Калининград (Россия). Последнее значимое землетрясение было зафиксировано на этой территории в 1977 г.

С использованием предложенного метода проанализированы вариации электронной концентрации ионосферы в период подготовки и прохождения землетрясения с 16 по 22 сентября 2004 г. Землетрясения произошли практически в одном месте (54.91 с.ш., 20.17 в.д. и 54.79 с.ш., 20.06 в.д.) с интервалом в 2.5 ч (11 : 05 : 04 UTC и 13 : 32 : 31 UTC). Зондирование ионосферы проводили с нескольких наземных пунктов спутниковой системы GPS. Координаты приемников (рис. 2), данные с которых в качестве примеров приводятся в настоящей работе: RIGA, 24.00 с.ш., 56.57 в.д.; BOGI, 52.475 с.ш., 21.0352 в.д.; MDVJ, 56.03 с.ш., 37.22 в.д. Расстояние между эпицентром землетрясения и станциями RIGA и BOGI составляло ~260 и ~320 км. Приемник MDVJ располагался на значительном расстоянии (~1100 км) от места события и использовался для определения фоновое состояние ионосферы (рис. 2). Траектории по-

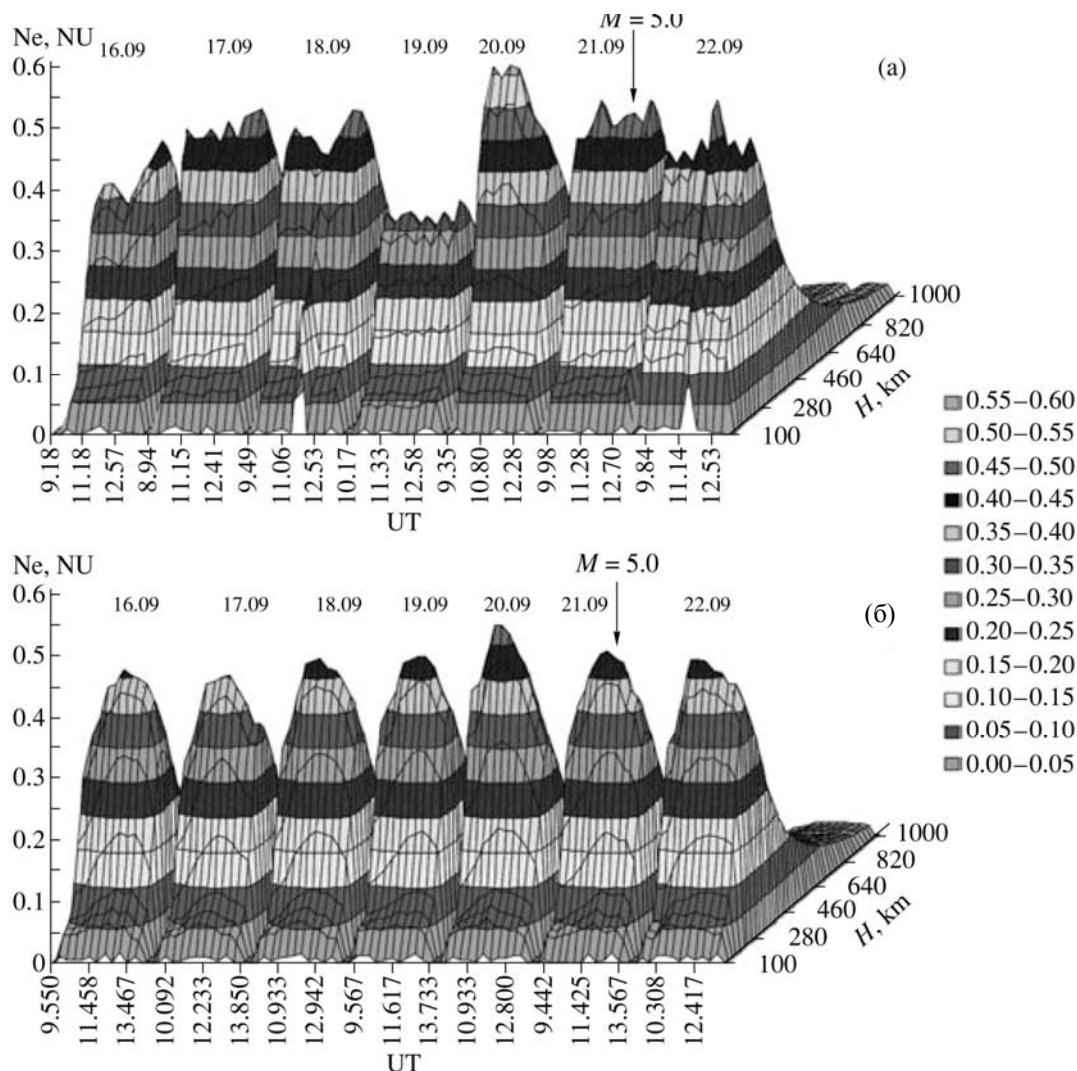


Рис. 3. Профили электронных концентраций, восстановленные в период с 16 по 22 сентября 2004 г. под эпицентральной областью Калининградского землетрясения по данным наземной станции RIGA (а) и на расстоянии 1100 км от эпицентра для станции MDVJ (б) для навигационного спутника № 29.

дионосферных точек для некоторых спутников, наблюдавшихся одновременно со станций RIGA, BOGI и MDVJ в исследуемый период, показаны на рис. 2.

Для мониторинга состояния ионосферы были выбраны в основном спутники, наблюдавшиеся в период землетрясения.

На рис. 3 в качестве примеров приведены высотные профили распределения электронной концентрации, восстановленные по данным GPS спутника № 29, полученным с 16 по 21 сентября 2004 г. на станциях RIGA и MDVJ. Анализ результатов, полученных на основании данных станции RIGA, показал, что за 3–5 сут до землетрясения (с 16 по 18 сентября 2004 г.) отмечался рост электронной концентрации, а за 2 сут до него (19 сентября 2004 г.)

максимум электронной концентрации ионосферы заметно уменьшился по сравнению с данными за 18 сентября. Такое состояние ионосферы характерно для периода подготовки землетрясения. Изменение значений максимума электронной концентрации ионосферы носило волнообразный характер с периодом около 1 ч. Аналогичный приведенному на рис. 3 (станция RIGA) характер изменения пространственно-временных распределений электронной концентрации выявлен в эти дни для данных спутника № 26, а также для данных, зарегистрированных со спутников № 29 и № 26 на других станциях BOGI, близких к эпицентру (см. рис. 2). Изменение максимума концентрации ионосферы, полученное по наблюдениям спутника № 9, носило седловидный характер.

Следует также обратить внимание на тот факт, что для всех спутников 19–20 сентября в период 10:30–11:30 LT отмечено резкое уменьшение электронной концентрации в ближайших к эпицентру областях. Характер изменения высотного распределения электронной концентрации, полученной с помощью приемника BOGI, аналогичен. На рис. 2 область локального минимума (размер ~250 км) показана стрелками. По-видимому, эта область была вытянута в северо-восточном направлении, так как зафиксирована одновременно приемниками RIGA и BOGI.

Профили электронной концентрации, полученные с помощью приемника MDVJ, удаленного на расстояние ~1100 км от эпицентра, не имеют каких-либо вариаций. Это подтверждает, что изменения в ионосфере, зарегистрированные приемниками, расположенными близко к эпицентру, обусловлены сейсмическими эффектами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложены методология и ее алгоритмическая реализация для восстановления параметров ионосферы по данным двухчастотного радиопросвечивания спутниковых навигационных систем, которые использованы для исследования ионосферных предвестников землетрясения, состоявшегося 21 сентября 2004 г. (магнитуда 4.8–5.0) в сейсмостойкой зоне в районе г. Калининград. При этом выявлено, что за 3–5 дней до землетрясения происходил рост электронной концентрации ионосферы. За 1–2 сут до него произошло значительное уменьшение электронной концентрации. Изменение максимума электронной концентрации носило волнообразный характер с периодом в 1 ч. Все существенные вариации характеристик ионо-

сферы в районе эпицентра землетрясения в Калининграде (область размером ~150–250 км) выявлены в дневное время, когда фотохимические процессы носят квазистационарный характер.

Предложенный подход может быть использован для организации оперативного мониторинга сейсмоопасных территорий.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 04-05-64207.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Савин А.И., Бондур В.Г. // Оптика атмосферы и океана. 2000. № 1. С. 46–62.
2. Calais E., Minster J.B. // Geophys. Res. Lett. 1995. V. 22. № 15. P. 1045–1048.
3. Афраимович Э.Л., Косоголов Е.А., Плотников А.В. // Космич. исследования. 2002. Т. 40. № 3. С. 241–254.
4. Липеровский В.А., Похотелов О.А., Шалимов С.Л. Ионосферные предвестники землетрясений. М.: Наука, 1992. 304 с.
5. Пулинец С.А., Боярчук К.А., Ломоносов А.М. и др. // Геомагнетизм и аэрономия. 2002. Т. 42. № 4. С. 435–447.
6. Смирнов В.М. // Электрон. журн. "Исследовано в России". 2001. № 153. С. 1759–1767. <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2001/153.pdf>
7. Davies K., Hartmann G.K. // Radio Sci. 1997. V. 32. № 4. P. 1695–1703.
8. Гохберг М.Б., Пилипенко В.А., Похотелов О.А. // Физика Земли. 1983. Т. 10. С. 17–21.
9. Андрианов В.А., Смирнов В.М. // Радиотехника и электроника. 1993. Т. 38. № 7. С. 1326–1337.
10. Смирнов В.М. // Радиотехника и электроника. 2001. № 1. С. 47–52.
11. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1986. 288 с.