Ионосферные возмущения в период подготовки сейсмических событий по данным спутниковых навигационных систем

В.Г. Бондур[1], В.М. Смирнов[2]

[1]ЦПАМ «Аэрокосмос»
105064, Москва, Гороховский пер., 4
E-mail: vgbondur@online.ru
[2]ИРЭ РАН, 141190, Фрязино, пл. Б.А.Введенского, 1
E-mail: vsmirnov@ire.rssi.ru

Цель данной работы – анализ потенциальных возможностей GPS-мониторинга при детектировании возможных предвестников землетрясений. Для регионов с разной степенью сейсмической активности (Калининградская область, Турция, Курильские острова) рассмотрены вариации электронной концентрации ионосферы, возникающие в период подготовки сейсмических событий. На основании данных радиопросвечивания ионосферы сигналами навигационных спутниковых систем показано, что над эпицентрами сейсмических событий накануне землетрясений происходит нарушение пространственно-временного хода в распределении электронной концентрации в максимуме F2 слоя.

Введение

Обнаружение на спутниках эффектов сейсмической активности стимулировало использование космической техники для решения проблем прогноза землетрясений. Один из вариантов такого использования основан на изучении ионосферных эффектов землетрясений. Ранее наземными методами было установлено, что в ионосфере над эпицентрами готовящихся землетрясений изменяется ряд ионосферных параметров. Однако традиционные наземные средства прогноза землетрясений не обеспечивают надежной достоверности предсказания, а последние не предсказанные разрушительные землетрясения (Иран, Турция, Тайвань, Суматра, Пакистан) говорят о необходимости привлечения дополнительных признаков для прогноза землетрясений.

Проблема заключается в определении области возникновения землетрясений. Частичное решение этой проблемы может быть решено с помощью глобальных навигационных систем GPS (США) и Глонасс (Россия) (см. рис.1), 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. Существующая сеть наземных навигационных станций слежения позволяет осуществлять такие наблюдения за состоянием ионосферы и, следовательно, дает возможность определять ионосферные эффекты землетрясений.

В последнее время на основе использования спутниковых навигационных систем и специальных методов математической обработки получены новые обнадеживающие результаты, связанные с регистрацией предвестников разрушительных землетрясений в ионосфере Земли. Возможность таких методов предсказания землетрясений подтверждается экспериментальными и теоретическими исследованиями, указывающими на связь физических процессов в литосфере и ионосфере в период подготовки землетрясений. На основе таких методов можно создать систему, которая будет способна осуществлять мониторинг предвестников землетрясений в ионосфере Земли и краткосрочный прогноз с их помощью самих землетрясений.

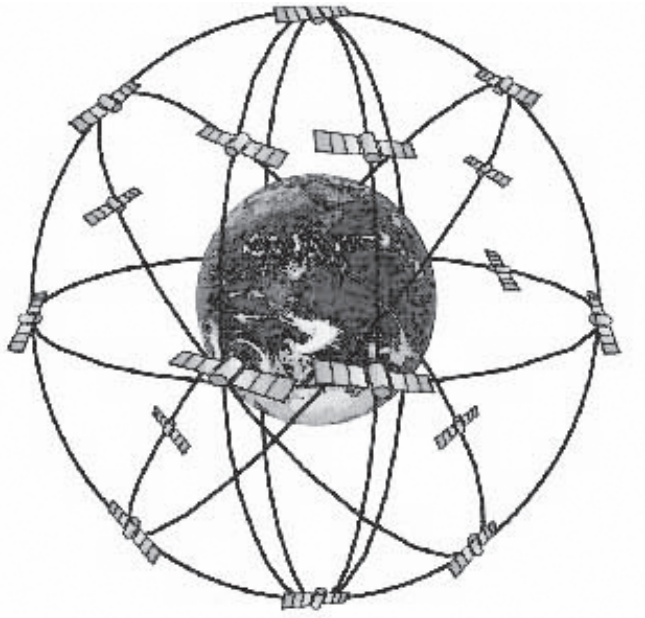


Рис. 1. Спутниковая навигационная система GPS

Характеристики сейсмоионосферных возмущений

Трудности в идентификации ионосферных возмущений, обусловленных сейсмогенными эффектами, на фоне пространственно-временной изменчивости ионосферы, особенно во время сильного 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. Ионосферные же возмущения, связанные с литосферными процессами, гораздо доступнее для обнаружения и регистрации космическими радиофизическими методами.

В работах [1-5] перечислены основные характеристики ионосферных предвестников сильных землетрясений:

- Ионосферные предвестники представляют собой вариации плотности ионосферной плазмы (отклонения от невозмущенного значения), наблюдаемые за 1-5 суток.
- Длительность вариации одного знака невелика и составляет 4-6 часов. Только в случае очень сильных землетрясений она может быть значительной ~ 12 ч.
- В среднем сейсмоионосферные вариации имеют ту же амплитуду, что и ежедневная изменчивость ионосферы (15%-25%), но в определенные моменты местного времени они могут превышать 100%.
- Знак и форма сейсмоионосферных вариаций зависят от местного времени. По всей видимости, эти зависимости различны для разных регионов планеты и требуют дополнительного исследования в каждом конкретном случае.
- Размер модифицированной области ионосферы на высоте максимума слоя F2 зависит от магнитуды землетрясения.

• Положение максимума модифицированной области в ионосфере не совпадает с вертикальной проекцией эпицентра будущего землетрясения.

Полученные в работах [6 (http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2001/153.pdf), 7] результаты, показывают, что в эпицентральной области за 3-5 суток наблюдается рост электронной концентрации в максимуме слоя F2 с дальнейшим ее уменьшением за 1-3 суток. При этом накануне землетрясения (за 1-2 суток), происходит нарушение пространственно-временного хода максимума электронной концентрации.

Детектирование сейсмоионосферных вариаций методом радиопросвечивания

Метод радиопросвечивания ионосферы Земли опирается на обращение приведенной разности фаз радиоволн и математически соответствует обращению интегрального уравнения первого рода [7-9]. Проблема реализации методов реконструкции параметров ионосферы (например, распределения электронной концентрации) по данным радиопросвечивания заключается в том, что некорректность задачи восстановления не позволяет получить точное решение основного интегрального уравнения, которое было бы устойчивым к малым изменениям входных данных..

Практическая реализация метода основана на использовании измерений параметров радиосигналов на трассе “спутник - наземный пункт“ по наблюдениям с одного пункта. При проведении наблюдений под углом места от 10 до 90 градусов проекция точки пересечения луча зрения спутник – приемник с максимумом F2 слоя ионосферы может быть удалена от пункта приема на расстояние до 1100 км. Высокая точность определения электронной концентрации (среднеквадратическая погрешность определения профиля электронной концентрации 0,02 NU [9]) вполне приемлема для детектирования ионосферных возмущений, обусловленных как сейсмоиносферными возмущениями.

Рассмотрим результаты применения метода радиопросвечивания на примере двух землетрясений разной магнитуды и прошедших в регионах с разной сейсмической активностью – Калининградская область (зона низкой сейсмической активности), Измит (Турция) и Курильские острова (зоны высокой сейсмической активности).

Ионосферные вариации в период сейсмических событий

21 сентября 2004 г. в районе г. Калининград (Россия) произошло 2 землетрясения с магнитудами M=5 и M=4.8 (см. рис. 2). В Калининграде получили ранения 3 человека, было разрушено 17 зданий. Толчки были ощутимы в Польше, Эстонии, Латвии, Литве, Дании, Финляндии, Норвегии и на юге Швеции [www.rian.ru]. Это самое сильное землетрясение из когда-либо зарегистрированных в этом регионе. Последнее значимое землетрясение было зафиксировано на этой территории в 1977 г.

Особенностью этих землетрясений является то, что они произошли в зоне, не являющейся сейсмоактивной. Данный район не рассматривался специалистами как сейсмически опасный. Не существует никаких естественных причин для того, чтобы в этом месте произошло столь сильное землетрясение.

Калининградская область располагается на западной окраине Восточно-Европейской или Русской равнины, которая в геоструктурном отношении представляет собой плиту. Под Русской плитой подразумевается та часть Восточно-Европейской платформы, где кристаллический фундамент погружается на значительную глубину, а сверху на нем залегает мощная толща (до 3 км и более) платформенных осадочных отложений [www.emsc-csem.org].

Зондирование ионосферы производилось на основании радиосигналов спутников GPS, зарегистрированных с помощью двухчастотных геодезических приемников, расположенного в Латвии и Польше, вблизи эпицентра землетрясений. Траектории подионосферных точек для нескольких спутников, одновременно наблюдавшихся с указанных на рисунке приемников в период подготовки и прохождения землетрясения, показаны на рис. 2.

Для мониторинга состояния ионосферы были выбраны, в основном, спутники, наблюдавшиеся в моменты времени, близкие к моментам прохождения землетрясения. Один из спутников (№23) наблюдался ранним утром 21 сентября 2004 г. за 4-7 часов до начала землетрясения.

На рис. 2 приведены высотные профили N_e за период с 16 по 21 сентября 2004 г., полученные по данным спутника № 26 системы GPS. Здесь же представлены результаты для удаленного приемника. Анализ этих профилей показывает, что с 16 по 18 сентября 2004 г. (за 3-5 дней до землетрясения) начинается общий рост максимальной электронной концентрации слоя F2 ионосферы (см. рис. 2). Начиная с утренних часов 19 сентября 2004 г. за два дня до землетрясения выявлен резкий спад (~ в 1,7 раза) электронной концентрации по сравнению с аналогичным временем 18 сентября 2004 г. Этот спад сменяется резким подъемом максимума N_{emax} 20 сентября 2004 г. (за день до землетрясения).

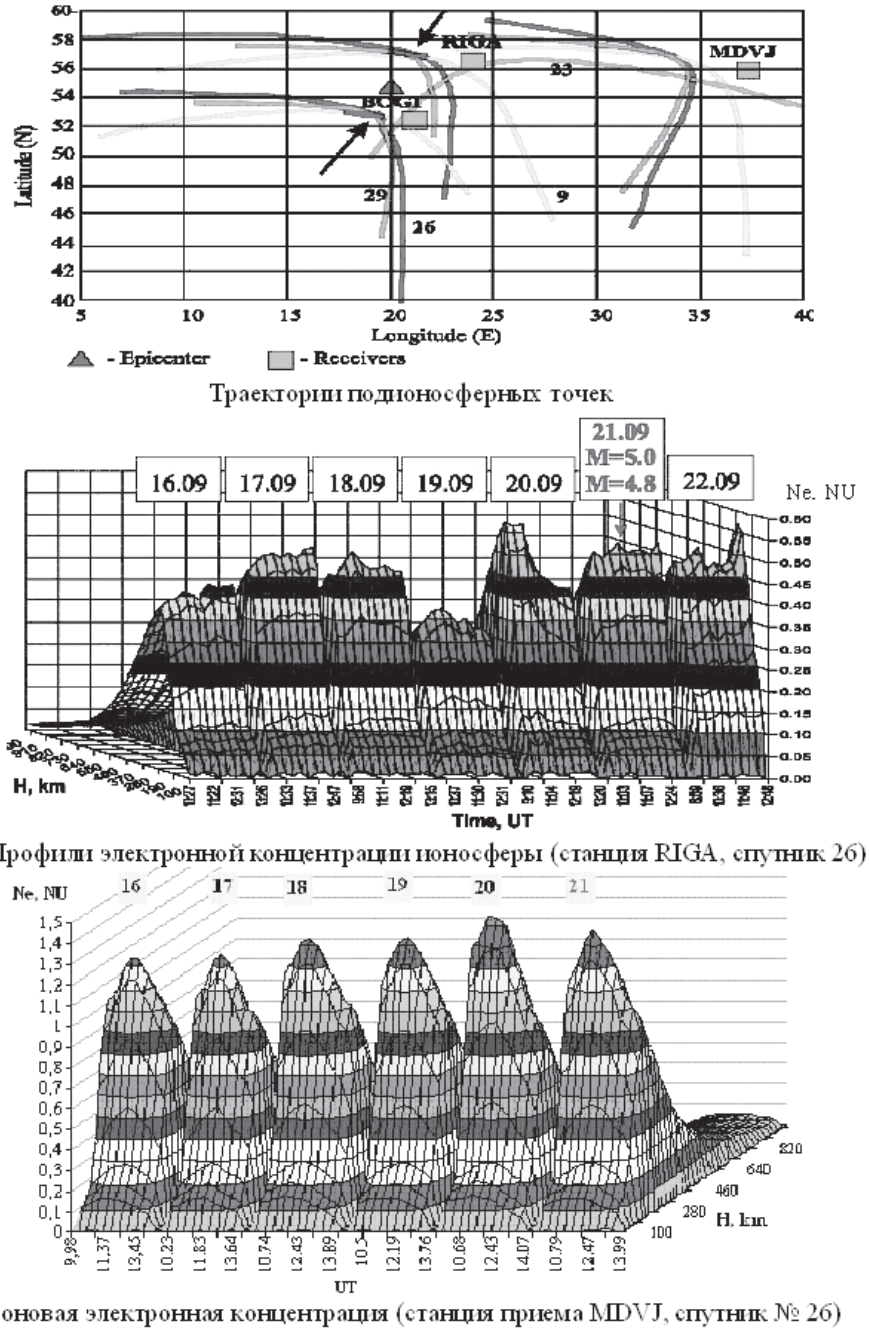


Рис. 2. Результаты мониторинга ионосферы в Калининградской области в период землетрясения 21 сентября 2004 года

Характер изменения пространственно-временных распределений электронной концентрации, полученных соответственно для спутников №7, 9, 26, 29, наблюдавшихся с 18 по 21 сентября 2004 г. в период времени с 8 до 17 часов (UT), практически одинаков. Для этих четырех спутников 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.

Следует также обратить внимание на тот факт, что по данным, полученным со всех спутников, 20 сентября 2004 г. (за день до землетрясения), в ближайших к будущему эпицентру областях отмечается резкое уменьшение электронной концентрации. Оно зарегистрировано в этот день примерно с 11 часов UT по данным, полученным со спутников №26 и №29 (рис. 2), а также с 12:30 UT по данным, полученным со спутника № 7.

Изменение максимумов электронной концентрации ионосферы, полученное 20 сентября 2004 г. (за день до землетрясения) по данным спутника №9, имело седловидный характер. В этот день минимальное значение Ne выявлено в ближайшей к эпицентру области ионосферы (~ 280 км) в период 12:50 – 13:30 UT. Такое изменение электронной концентрации в максимуме F2 слоя ионосферы в период подготовки к землетрясению, состоявшемуся в районе г. Калининграда 21 сентября 2004 г. в условиях спокойной сейсмической и геомагнитной обстановки, полностью соответствует поведению электронной концентрации ионосферы при подготовке сильных землетрясений, описанному ранее [1-2].

Землетрясение в районе г. Калининграда, состоявшееся 21 сентября 2004 г., проходило на фоне спокойной сейсмической обстановки. До начала этого достаточно сильного землетрясения (M=5,0; M=4,8) не наблюдалось заметных толчков в анализируемом регионе. В момент прохождения данного сейсмического события также зарегистрирована спокойная геомагнитная обстановка.

Таким образом, можно сделать вывод, что мониторинг состояния ионосферы для данного региона позволил бы зарегистрировать подготовку землетрясения за 1-2 суток до момента свершения сейсмического события. При этом удалось бы практически локализовать и месторасположение предполагаемого эпицентра землетрясения.

Катастрофическое землетрясение с магнитудой M=7,6 по шкале Рихтера произошло 17 августа 1999 г в районе города Измит (Турция) (см. рис. 3). Общая продолжительность толчков составила 37 секунд. В результате землетрясения погибли около 17 тысяч человек. Еще 50 тысяч получили ранения. Более 500 тысяч человек остались без крова. В результате землетрясения произошло смещение земной коры вдоль Северо-Анатолийского разлома, длина которого составила более 5 метров.

Турция - горная страна, характеризующаяся повышенной сейсмической активностью. Средняя высота ее территории над уровнем моря составляет 1132 метров. Почти вся территория Турции занята Малоазиатским нагорьем, в состав которого входят высокие горные хребты с мощными вершинами, обширные сухие нагорья и плоскогорья.

Территория Турции относится к сейсмически активному региону, к зоне столкновения двух плит: Аравийской и Евроазиатской. Эта страна подвергалась землетрясениям на протяжении всей своей истории.

Большая часть континентальной коры представлена Анатолийским блоком, испытывающем сжатие в западном направлении. Блок ограничен с севера Северо-Анатолийским, с юго-востока – Восточно-Анатолийским разломами.

Мониторинг состояния ионосферы осуществлялся методом радиопросвечивания в период с 11 по 18 августа 1999 года. Для его проведения использовались как данные приемника, расположенного в эпицентральной зоне, так и вдали от него.

Траектории подиносферных точек для некоторых спутников GPS, наблюдавшихся в период 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 (39,89°с.ш., 32,76°в.д.) и был удален от эпицентра землетрясения на расстояние до 400 км.

На рис. 3 видно, что траектории подионосферных точек для навигационных спутников № 26 и 6 системы GPS проходили практически над эпицентром землетрясения. Спутник №6 наблюдался с 0 до 5

часов по UT в период землетрясения. Спутник № 26 наблюдался в дневное время с 18 до 22 часов по шкале UT.

На рис. 3 представлены высотные профили электронной концентрации ионосферы, полученные из решения обратной задачи радиопросвечивания по наблюдениям за спутником №6 в период 14-17 августа 1999 г. На этом рисунке хорошо видно изменение максимума электронной концентрации слоя F2 ионосферы, обусловленное как суточным ходом ионосферы, так и влиянием землетрясения на ее состояние. Видно, что резкое изменение пространственно-временного хода электронной концентрации ионосферы наблюдалось 16 августа 1999 г., за одни сутки до землетрясения.

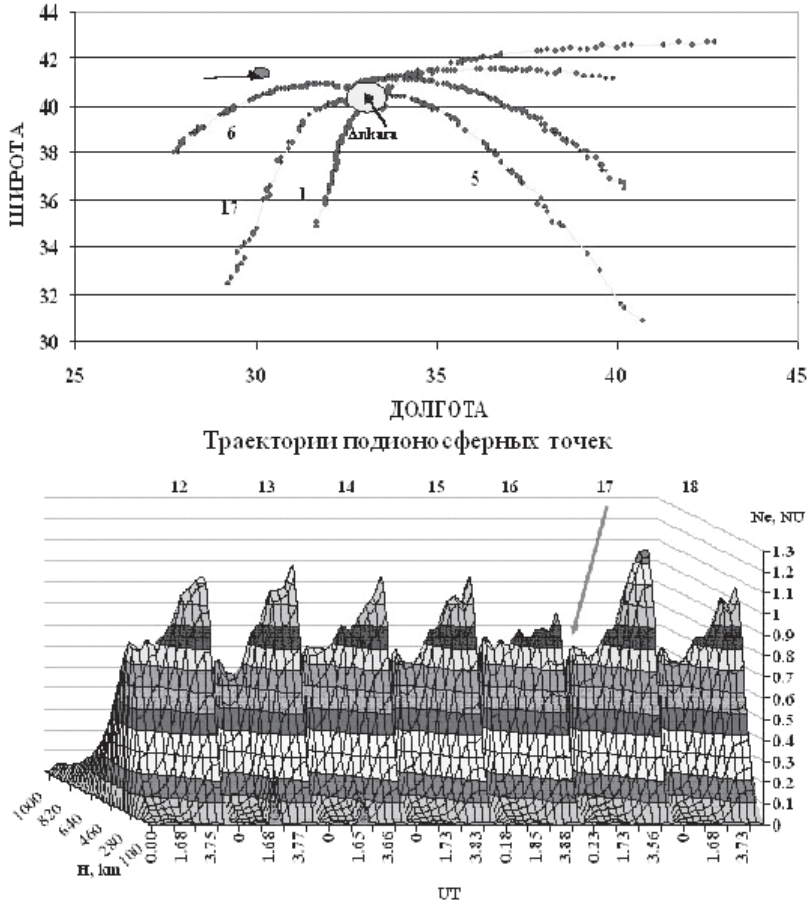
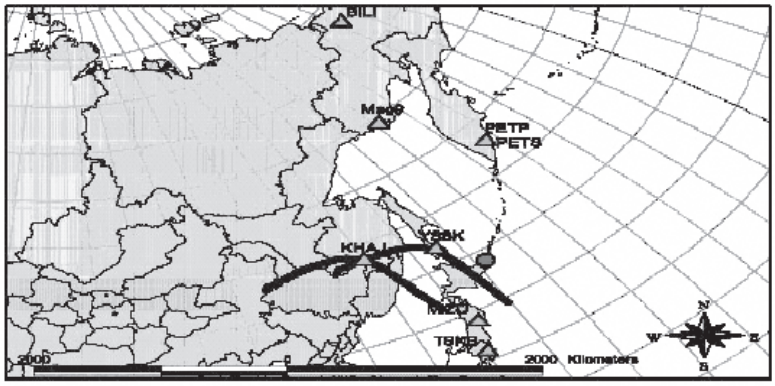


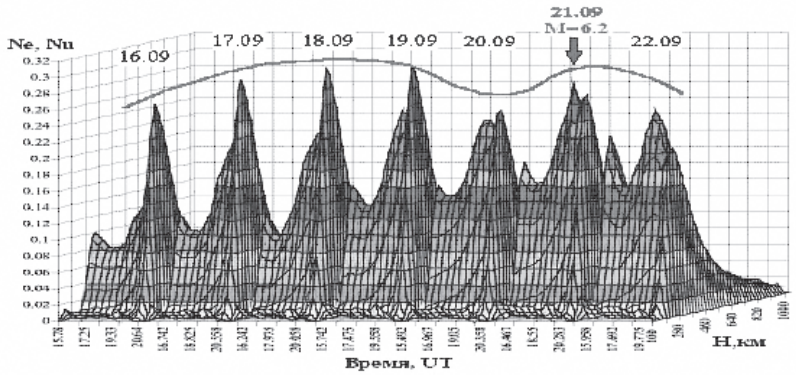
Рис. 3. Результаты исследования землетрясения в Турции 17 августа 1999 года

В период 16 по 22 сентября 2005 г. по наблюдениям GPS приемников KHAJ и YSSK проводился мониторинг состояния ионосферы на Курильских островах, относящихся к зоне высокой сейсмической активности. Карта расположения приемников и траектории подспутниковых точек приведены на рис.4. Здесь же указан и эпицентр землетрясения. Землетрясение, магнитудой M=6,2 произошло 21 сентября 20005 г. в 02:25:07 UTC на Курильских островах. Координаты эпицентра – 43.927° с.ш., 146.082° в.д. Эпицентр землетрясения находился в море на глубине 95,4 км.

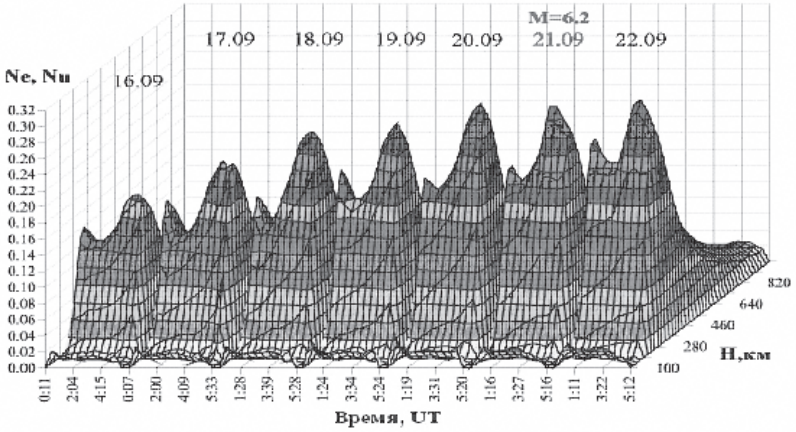
На рис. 4 приведены графики пространственно-временного распределения электронной концентрации. Хорошо видна структура высотного распределения и ее характерные изменения. В период 16-19 сентября наблюдался устойчивый рост электронной концентрации.. При этом по данным станции KHAJ, используемой в качестве фоновой, характер изменения состояния ионосферы практически не просматривается (рис.4, KHAJ).



Траектории подионосферных точек



Аномальная электронная концентрация (станция приема YSSK, спутник № 2)



Фоновая электронная концентрация (станция приема KHAJ, спутник № 2)

Рис. 4. Результаты мониторинга ионосферы на Курильских островах в период землетрясения 21 сентября 2005 года

Анализ вариаций геомагнитного поля, проведенный в период с 17 по 22 сентября 2005 г. по данным геофизических обсерваторий, показал, что в наблюдаемое время (16-20 часов UTC, местное время от 21 до 1 часа) отмечены незначительные вариации геомагнитного поля. Исходя из этих данных, можно было сделать вывод, что вариации магнитного поля не могли привести к тем явлениям, которые наблюдались по данным GPS-измерений.

Следует заметить, что гелиофизическая обстановка в анализируемый период была слабо возмущенной. По данным [Solar Terrestrial Activity Report], 16-17 сентября 2005 г. было зарегистрировано несколько вспышек класса C и M. 20 сентября была зарегистрирована одна вспышка класса C. Мощность потока ультрафиолетового излучения (Solar flux) в период 16-22 сентября медленно уменьшалась – с F10.7=111,8 16 сентября до F10.7=83,7 22 сентября. Число солнечных пятен (Sunspot number) было также достаточно низким. Общепланетарная магнитная активность (Planetary A index) накануне землетрясения 19-20 сентября также была достаточно низкой. Следует обратить внимание, что K-индекс не превышал накануне землетрясения 19-20 сентября значения 2, что свидетельствует о спокойной геомагнитной обстановке.

Таким образом, анализ геофизической обстановки показывает, что существенные изменения электронной концентрации, наблюдаемые 20 сентября на станции YSSK, не могут быть вызваны гелиогеофизическими вариациями. Характерное изменение электронной концентрации в максимуме слоя F2 (рост 16-19 сентября с резким уменьшением 20 сентября, за сутки до землетрясения) свидетельствует о подготовке сейсмического события в рассматриваемом регионе.

Выводы

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 время возникновения этого явления. Анализ состояния ионосферы в период землетрясений показывает, что отчетливо прослеживается тенденция уменьшения электронной концентрации за 1-3 суток до предстоящего землетрясения, что хорошо подтверждается известными из литературы данными.

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

Литература

1. *Пулинец С.А, Лью Й.Я.* Краткосрочный прогноз катастрофических землетрясений с помощью наземно-космических методов. Доклады конференции. Москва, 2-3 октября 1997. С.27-44.
2. *Липеровский В.А., Похотелов О.А., Шалимов С.Л.* Ионосферные предвестники землетрясений // М.: Наука, 1992. 304 с.
3. *Гохберг М.Б., Пилипенко В.А., Похотелов О.А.* О сейсмических предвестниках в ионосфере // Физика Земли, 1983. Т.10. С.17-21.
4. *Пулинец С.А., Боярчук К.А., Ломоносов А.М., Хегай В.В., Лю Й.Я.* Ионосферные предвестники землетрясений: предварительный анализ данных критических частот f_oF2 наземной станции вертикального зондирования ионосферы Чунг-Ли (о. Тайвань). // Геомагнетизм и аэрономия, 2002. Т.42. №4. С.435-447.
5. *Пулинец С.А., Легенька А.Д., Зеленова Т.И.* Зависимость сейсмо-ионосферных вариаций в максимуме слоя F от местного времени // Геомагнетизм и аэрономия, 1998. Т.38. С.178-183.

6. *Смирнов В.М.* Вариации ионосферы в период землетрясений по данным навигационных систем // Электронный журнал "Исследовано в России", 2001. № 153. С.1759-1767.
7. *Бондур В.Г., Смирнов В.М.* Метод мониторинга сейсмоопасных территорий по ионосферным вариациям, регистрируемым спутниковыми навигационными системами // Доклады Академии наук, 2005. Т.402. №5. С.675-679.
8. *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.1326-1335.
9. *Смирнов В.М.* Решение обратной задачи радиопросвечивания ионосферы Земли градиентными методами // Радиотехника и электроника, 2001. №1. С.47-52.