

Мониторинг ионосферных предвестников цунамигенных 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 - Распределение ионосферных возмущений в области очагов землетрясений, в том числе подводных, неравномерно в пространстве и времени. Учитывая, что цунами, как правило, вызываются только сильными землетрясениями ($M > 7$), можно предположить, что возмущения ионосферы в эпицентральной области могут быть уверенно детектированы при организации глобального мониторинга сейсмо- и цунамиопасных акваторий.

На примере подводных землетрясений продемонстрированы возможности детектирования аномалий, возникающих в плазменной оболочке Земли в период подготовки и прохождения сейсмических событий. Приведены результаты мониторинга состояния ионосферы в период сильнейшего подводного цунамигенного землетрясения, произошедшего в Индийском океане 26 декабря 2004 г. ($M=9$). Мониторинг осуществлялся путем реализации метода радиопросвечивания с использованием спутниковых навигационных систем. Показано, что ионосферные вариации в период цунамигенных землетрясений имеют свои характерные особенности и могут использоваться в качестве краткосрочных предвестников этих природных катастроф.

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

1. ВВЕДЕНИЕ

Одним из наиболее опасных последствий сильных подводных землетрясений является возникновение цунами. Катастрофические волны-цунами в преобладающем большинстве случаев связаны именно с этими сейсмическими событиями, хотя могут вызываться также извержениями подводных вулканов, оползнями и т.п. Эмпирически установлено, что интенсивность волн цунами, регистрируемых на морских побережьях, коррелирует с магнитудой подводных землетрясений. В среднем, чем больше магнитуда землетрясения, тем больше интенсивность цунами. Этот факт используется в настоящее время для оперативного предупреждения об опасных цунами.

Если очаг землетрясения находится в Мировом океане, то перемещения его дна могут привести к формированию волнового фронта, который пронизывает всю толщу воды (Бобрович, 1990). Скорость этого фронта в каждой конкретной точке тем выше, чем больше глубина океана в области эпицентра, и может составлять до 1000 км/час. Внезапность возникновения, практически неограниченная дальность распространения, огромная скорость и большая разрушительная сила волн цунами делают проблему их предсказания чрезвычайно актуальной.

Критерием для объявления тревоги о возникновении цунами служит превышение магнитудой некоторого порогового значения M_p . В [Болотина, 2002]. На основании результатов численного моделирования

показано, что для средней высоты волны на побережье 1 м, пороговое значение магнитуды составляет $M_p=7-7,25$. Утверждается, что при магнитудах $M < 7$ землетрясения не являются цунамигенными [Болотина, 2002]. При $M > 7,25$ цунами возникают практически всегда. При определенных значениях магнитуд существует вероятность возникновения аномально сильного цунами при некоторой оптимальной глубине эпицентра подводного землетрясения.

Однако, так как природа генератора цунами может изменяться от землетрясения к землетрясению [Бобрович, 1990; Иванов, 1991], этот критерий работает не всегда. Даже самые сильные подводные землетрясения не обязательно влекут за собой цунами. Многие зависят от характера колебаний, глубины эпицентра и географического положения ближайших участков суши.

Так, например, 24 декабря 2004 года, всего за двое суток до катаклизма в Индийском океане у берегов Суматры, произошло землетрясение в южной части Тихого океана - в районе острова Макуаре, который находится на полпути между Австралией и Антарктидой. Поскольку магнитуда этого землетрясения составила 8,1 балла, оно могло угрожать Австралии, Тасмании и Новой Зеландии сильнейшими цунами. Однако ничего подобного не случилось, и уровень воды у этих берегов практически не изменился.

Цунами далеко не единственное проявление реакции океана на подводные землетрясения. Подобные сейсмические события сопровождаются излучением акустических волн, возмущениями электромагнитного поля, возникновением тепловых аномалий и т.п. [Носов, Скачко, 1999а,б]. Изучение сопутствующих явлений дает дополнительную информацию об общих закономерностях взаимодействия подводных землетрясений в системе земная кора – океан – атмосфера – ионосфера (Бондур, Смирнов, 2005а). При этом существует потенциальная возможность использования тех или иных проявлений подводных землетрясений в качестве маркеров (предвестников) зон катастрофических землетрясений и очагов цунами, а также создания методов их регистрации и мониторинга. Одним из таких предвестников могут быть пространственно-временное изменение состояния ионосферы в эпицентральной зоне (Бондур, Смирнов, 2005а, б, в).

2. ОСОБЕННОСТИ ОРГАНИЗАЦИИ МОНИТОРИНГА

Мониторинг состояния ионосферы Земли в период сильнейшего подводного цунамигенного землетрясения в Индийском океане ($M=9$) осуществлялся с 19 по 26 декабря 2004 года. Для мониторинга использовались средства спутниковой навигационной системы GPS-NAVSTAR. В качестве пунктов наблюдения использовались наземные станции международной геофизической сети (IGS). Наиболее близкая станция (NTUS) располагалась на расстоянии ~ 1000 км от

эпицентра землетрясения. Расположение GPS приемников и траектории подионосферных точек, полученные по наблюдениям за навигационными спутниками в период подготовки и протекания этого цунамигенного землетрясения, приведены на рис. 1. Анализ вариаций параметров ионосферы осуществлялся методом радиопросвечивания [Андрианов, Смирнов, 1993; Савин, Бондур, 2000; Бондур, Смирнов, 2005б,в]. Метод радиопросвечивания позволяет осуществлять мониторинг области ионосферы, удаленной от пункта наблюдения на расстояние до 1500 км (Бондур, Смирнов, 2005б,в). Наиболее близко к эпицентру землетрясения (~180 км) проходила траектория спутника № 7 системы GPS. По результатам наблюдения этого спутника в эпицентральной области исследуемого подводного землетрясения было зарегистрировано anomalous изменение электронной концентрации в слое F2 ионосферы (Бондур, Смирнов, 2005а).

Приемники GPS, расположенные в пунктах HYDE и BAN2 использовались как для определения фонового состояния ионосферы, так и для проверки функционирования бортовой аппаратуры наблюдаемого спутника.

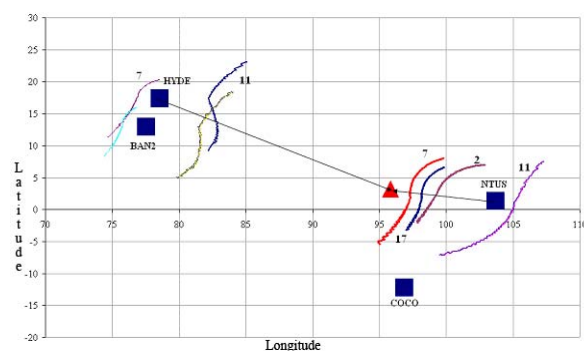


Рис.1. Расположение GPS приемников и траекторий подионосферных точек относительно эпицентра землетрясения

3. РЕЗУЛЬТАТЫ МОНИТОРИНГА И ИХ АНАЛИЗ

Результаты обработки данных радиопросвечивания ионосферы (спутник №7) в период с 19 по 26 декабря 2004 г. с 4 до 7:30 UT приведены на рис. 2. Результаты обработки показали, что в некоторые дни в период времени примерно с 5:30 до 6:30 UT в области, ограниченной координатами (2.01 – 5.33)° с.ш. и (97.3 – 97.4)° в.д., выявлено заметное уменьшение электронной концентрации в F2 слое (см. рис. 2). Нетрудно видеть, что эта область близка к эпицентру землетрясения (координаты 3.259° с.ш., 95.824° в.д.). На рис. 2 хорошо проявляется уменьшение максимума электронной концентрации $N_{e,max}$ в F2-слое ионосферы, начавшееся 21 декабря 2004 г. (за 5 дней до землетрясения), а также 25 декабря 2004 г. (за день до землетрясения). Какого-либо заметного изменения электронной концентрации, полученной на удаленных наземных пунктах HYDE и BAN2, не обнаружено. По-видимому, это уменьшение $N_{e,max}$ вызвано процессами, связанными с сейсмической

активностью, так как использование других спутников, наблюдавшихся в этот же период времени в других областях, не выявило каких-либо особенностей в изменении электронной концентрации этого слоя ионосферы. Более того, зафиксированное уменьшение $N_{e,max}$ наблюдалось в момент времени, когда в ионосфере в данном регионе должен был наблюдаться (по местному времени) дневной максимум электронной концентрации в F2 слое. Возможно, что такое изменение состояния ионосферы может быть характерным для цунамигенных землетрясений (Бондур, Смирнов, 2005а).

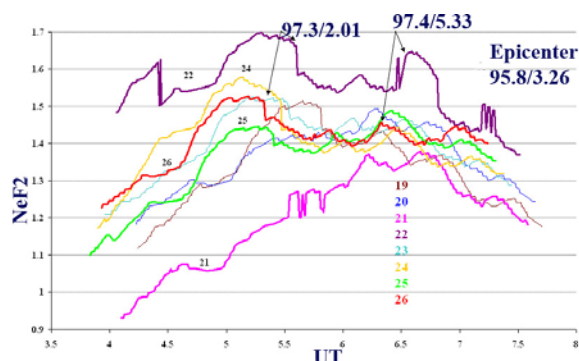


Рис.2. Изменения значений максимумов электронной концентрации F2 слоя ионосферы, полученные по наблюдениям спутника №7 (наземная станция NTUS) в период с 19 по 26 декабря 2004 г.

Результаты мониторинга высотных распределений электронной концентрации ионосферы, полученные методом радиопросвечивания, приведены на рис. 3 и 4. Резкое уменьшение (практически в два раза) электронной концентрации $N_{e,max}$ было зафиксировано 25 декабря 2004 г. (за сутки до землетрясения) по наблюдениям спутника №11 с удаленного от эпицентра наземного пункта HYDE (см. рис. 3). Минимальные значения электронной концентрации выявлены также за пять дней до землетрясения по данным спутника № 7 (см. рис. 3). Затем в течение 3-х дней происходил рост максимума электронной концентрации (см. рис. 3). По данным, полученным с этого спутника с других (более удаленных) пунктов, каких-либо аномалий в распределении электронной концентрации в эти дни выявлено не было. Локальное уменьшение значения максимума электронной концентрации ионосферы, было зарегистрировано также 24 декабря 2004 г. по данным спутника №7 (рис. 4а). Процесс модификации распределения электронной концентрации плазменной оболочки хорошо виден на рис. 4б. Этот процесс начался 23-24 декабря 2004 г. Относительно низкое значение электронной концентрации, зарегистрированное 21 декабря 2004 г., вызвано, по-видимому, изменением геофизической обстановки в целом, так как подобная структура изменения высотного распределения N_e наблюдалась для всех спутников независимо от азимута и области наблюдения.

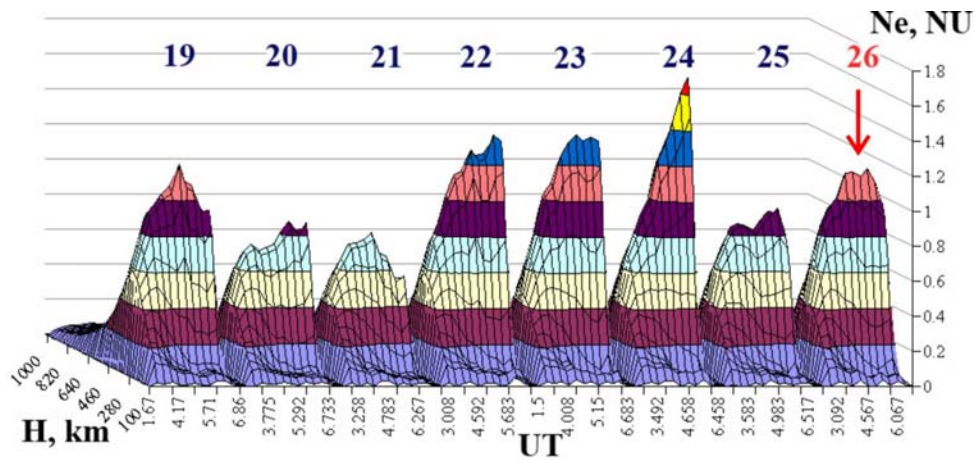


Рис. 3. Высотное распределение электронной концентрации ионосферы в период наблюдения с 19 по 26 декабря 2004 года по данным спутника №11 (станция HYDE)

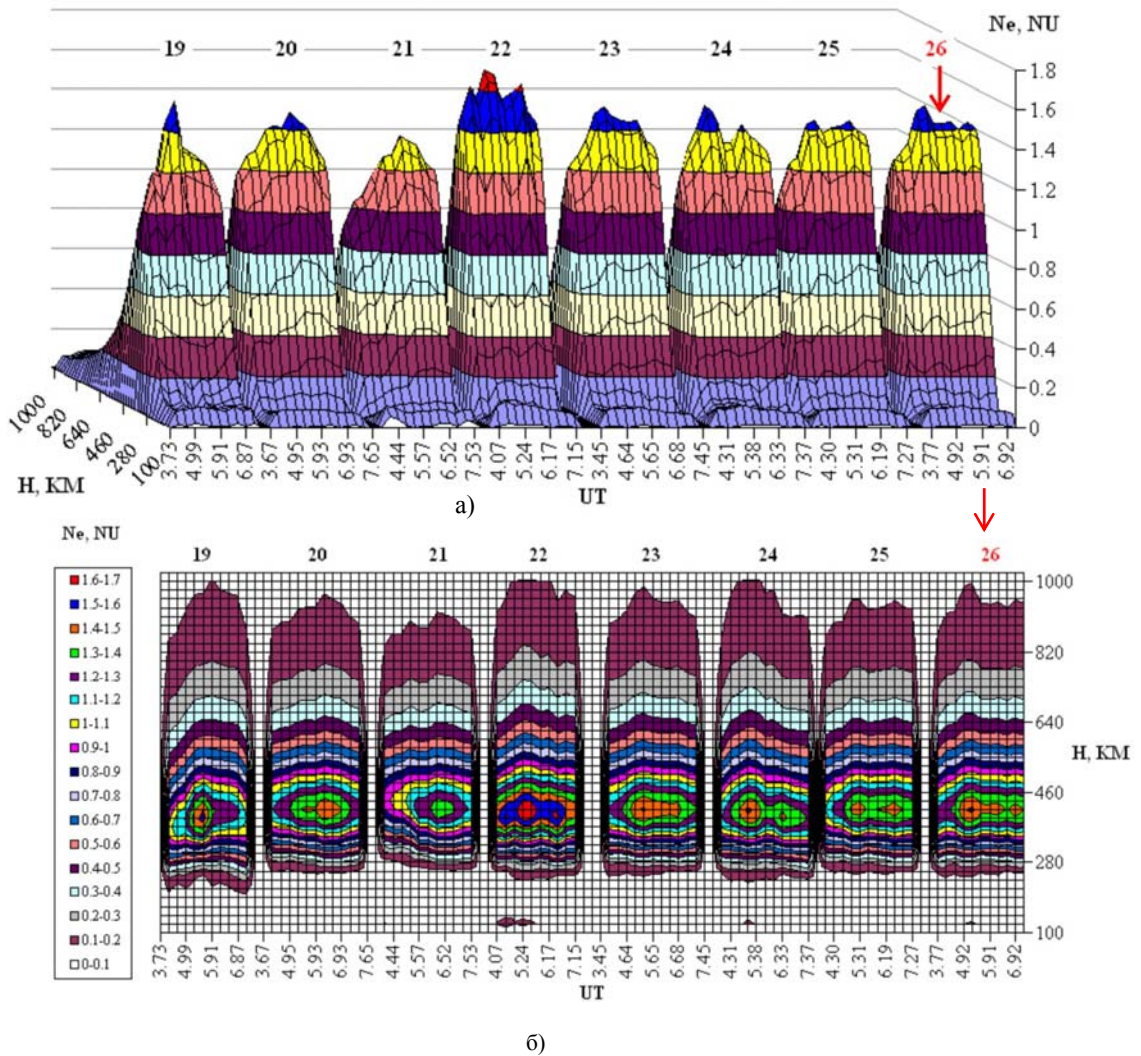


Рис. 4. Высотное распределение электронной концентрации ионосферы а) и его вид сверху б) в период мониторинга с 19 по 26 декабря 2004 года по данным спутника №7 (наземная станция NTUS).

Согласно данным, полученным в результате расчета по методу тензора момента центроида в Национальном центре информации о землетрясениях США (NEIC) и в Гарвардском центре США (HARVARD), движение в очаге исследуемого землетрясения возникло под действием близких по величине сжимающих напряжений, ориентированных в юго-западном направлении, а также растягивающих напряжений, ориентированных в северо-восточном направлении (USGS, 2004). На рис. 5 представлена карта региона, на которой прямоугольником выделена область разлома. Эпицентр землетрясения отмечен звездочкой. Карта получена с сайта геологической службы США [USGS, 2004].

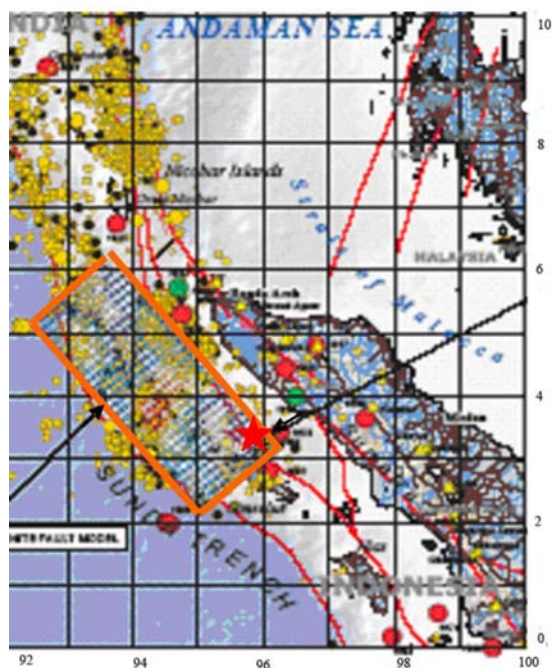


Рис.5. Карта района подводного землетрясения вблизи Суматры [USGS, 2004]

Следует отметить, что обнаруженное уменьшение электронной концентрации перед землетрясением наблюдалось в определенной локальной области. Минимальное ее значение выявлено около 5 часов UT в точке с координатами 17,51 с.ш., 82,37 в.д. Ориентация этой области практически соответствовала направлению растягивающих напряжений, ориентированных на северо-восток. Локальный и кратковременный характер этого явления подтверждает то, что эффект уменьшения $N_{e_{max}}$ не был зафиксирован по данным наблюдений с наземного пункта BAN2. Траектория подионосферных точек для этого пункта проходила через эту же область примерно за 1,5 часа до момента выявления отмеченного ионосферного эффекта. Можно сделать заключение, что сейсмический эффект воздействия на ионосферу носил в данном случае кратковременный (не более 2-х часов) характер, а область этого воздействия была ориентирована, в основном, в

северо-восточном направлении, соответствующем направлению растягивающих напряжений.

Данные, полученные геологической службой США, позволяют сделать вывод, что направление растягивающих напряжений практически совпадает с направлением «эпицентр – наземная станция HYDE». Этим можно объяснить резкое уменьшение электронной концентрации, которое было зарегистрировано нами 25 декабря 2004 г. по данным спутника №11 со станции HYDE (см. рис. 3). Размеры области разлома не превышали 200 км по ширине и 500 км по длине. При этом эпицентр землетрясения находился в нижнем правом углу области разлома. Отсюда можно предположить, что по направлению перемещения ионосферных возмущений можно определять ориентацию области разлома. Более того, размер области провала электронной концентрации в широтном направлении практически соответствует размеру области разлома в этом направлении (2 - 6 градусов с.ш.).

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выявлены ионосферные предвестники сильнейшего ($M=9$) подводного цунамигенного землетрясения, которые могут быть использованы для мониторинга сейсмо- и цунамиопасных районов в океане.

Обнаружено, что область уменьшения электронной концентрации наблюдается в течение нескольких суток до землетрясения. Для наземных землетрясений, такие длительные изменения электронной концентрации ранее не выявлялись. Возможно, это характерно только для цунамигенных землетрясений. По направлению распространения и величине ионосферных возмущений можно судить об ориентации и размере области разлома.

Эти гипотезы требуют подтверждения при проведении дальнейших исследований.

Литература

- Анрианов 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.
- Бобрович А.В.** Генерация волн и вихрей в океане подводными землетрясениями. //Исследования цунами. 1990, №4, с.33-41.
- Болотина С.В.** Стохастический резонанс в приложении к явлению цунамигенности. //Труды межд. конф. по математическому моделированию и информационным технологиям. 29-31 октября 2002, Новосибирск. <http://www.ict.nsc.ru/ws/YM2002/4409>.
- Бондур В.Г., Смирнов В.М.** (а) Ионосферные вариации в период цунамигенного землетрясения вблизи Суматры по данным спутниковых навигационных систем //Доклады академии наук, 2005 (в печати)
- Бондур В.Г., Смирнов В.М.** (б) Метод мониторинга сейсмоопасных территорий по ионосферным вариациям, регистрируемым спутниковыми навигационными системами //Доклады академии наук, 2005, т. 403, № 1.
- Бондур В.Г., Смирнов В.М.** (в) Мониторинг вариаций ионосферы в период подготовки и прохождения

землетрясений по данным спутниковых навигационных систем (в настоящих материалах), 2005.

Иванов В.В. Эволюция процессов землетрясения. //Успехи физических наук, 1991. Т.161, №3, с.31-68.

Носов М.А., Скачко С.Н. (а) Аномалии температуры поверхности океана и подводные землетрясения. //Сб. научных докладов 2-й Всероссийской конф. «Физическая экология». МГУ, 1999, №4, с.76-84.

Носов М.А., Скачко С.Н. (б) Трансформация стратифицированной структуры океана при подводном

землетрясении. //Вестник МГУ, сер. 3. Физика, астрономия, 1999, №5, с.51-55.

Савин А.И., Бондур В.Г. Научные основы создания и диверсификации глобальных аэрокосмических систем. Оптика атмосферы и океана. № 1, 2000. с. 46-62.

USGS. Poster of the Sumatra-Andaman Islands Earthquake of 26 December 2004 - Magnitude 9.0. 2004.

<http://neic.usgs.gov/neis/poster/2004/20041226.html>.