

УДК 551.596

ГЕОМЕХАНИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И ИОНОСФЕРНЫЕ ВАРИАЦИИ ДЛЯ КРУПНЕЙШИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ПРИ СЛАБОМ ВОЗДЕЙСТВИИ ГРАДИЕНТОВ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ

© 2007 г. Академик В. Г. Бондур, И. А. Гарагаш, М. Б. Гохберг, В. М. Лапшин,
Ю. В. Нечаев, Г. М. Стеблов, С. Л. Шалимов

Поступило 01.02.2007 г.

На основании детальных геомеханических моделей земной коры и данных, полученных с помощью спутниковых навигационных систем, исследовано влияние крупномасштабных градиентов атмосферного давления на процессы подготовки ряда крупнейших землетрясений, в том числе землетрясения, произошедшего на Суматре 26 декабря 2004 г. с магнитудой $M \sim 9.0$.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Влияние атмосферных процессов на сейсмическую активность было продемонстрировано как в теоретических расчетах, так и при непосредственных инструментальных наблюдениях [1–3]. Однако строение земной коры в этих исследованиях либо не конкретизировали, либо учитывали только крупномасштабную неоднородность типа суша–океан.

В настоящей работе для анализа влияния атмосферного давления на напряженное состояние земной коры созданы компьютерные модели для исследуемых районов. В основу моделей положены распределения поврежденности земной коры до глубины 100 км, определенные на четырех уровнях: 1-й слой 0–20 км; 2-й слой 20–40 км; 3-й слой 40–60 км; 4-й слой 60–100 км. Поврежденность получали путем количественного анализа распределения разломов и линеаментов для изучаемых районов на основе технологии обработки космических изображений, предложенной в работе [4]. С использованием этой технологии построены трехмерные модели дефектности земной коры, включающие тектонические разломы разных рангов.

Поврежденность среды характеризуется функцией неоднородности $g(x_s)$, которая изменяется от 0

до 1. Функция $g(x_s)$ аппроксимировалась с помощью сплайнов. Все механические параметры задавались в виде

$$P(x_s) = P^0[1 - \kappa g(x_s)], \quad (1)$$

где P^0 – однородное начальное значение параметра для ненарушенной среды, $\kappa \leq 1$ – параметр малости.

Параметризованные подобным образом механические свойства земной коры учитывали при расчете напряжений, вызванных тектоническими процессами на границах изучаемых объемов. Для оценки этих напряжений использованы модели взаимного движения тектонических плит, полученные по данным современных методов космической геодезии GPS, SLR, VLBI, скомбинированным в реализации ITRF2005 Международной земной системы относимости. Детальное распределение пограничных напряжений получали из сопоставления указанных тектонических моделей с региональными наблюдениями GPS там, где они проводились [5, 6].

На основе приведенных исходных параметров оценивали главное региональное сжатие. Второе главное напряжение определяли условиями стесненного сжатия. Расчеты выполнены с помощью программного кода FLAC^{3D}, реализующего явную конечно-разностную схему решения задач механики сплошных сред.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве примера рассмотрим Суматранское землетрясение с магнитудой $M = 9.0$, произошедшее 26 декабря 2004 г. в пределах Филиппинской и Зондской островных дуг в эпицентре с координатами 3.3°N , 96.0°E , которое породило гигантское цунами. Параметр поврежденности был получен в результате количественной обработки распределения разломов и линеаментов для изучаемого района Индийского океана, заключенного в пределах 20.0°S – 20.0°N и 65.0°E – 125.0°E , что соответствует прямоугольной области с размера-

Научный центр аэрокосмического мониторинга
“Аэрокосмос” Российской Академии наук, Москва
Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта,
Российской Академии наук, Москва

ми $6649.5 \times 4595.5 \text{ км}^2$. Данные космической геодезии позволяли ориентировать главное региональное сжатие под углом 12° к меридиану [5, 6].

Последующие расчеты проводили в два этапа. Сначала рассчитывали начальное напряженное состояние однородного параллелепипеда под действием сил собственного веса. Затем слой нагружали региональными напряжениями и рассчитывали напряженно-деформированное состояние.

Расчеты показали, что материал находился на пределе прочности в ряде зон только в 3-м и 4-м слоях (глубины 40–100 км). Причем они примыкали к очагу исследуемого землетрясения. Именно в этом месте в 4-м слое (глубины 60–100 км), достигало максимума распределение главных касательных напряжений (рис. 1).

Таким образом, с помощью компьютерной модели были выделены энергонасыщенные и высоконапряженные места земной коры, которые совпали с эпицентром рассматриваемого Суматранского землетрясения.

Далее изучали действие атмосферного давления на поврежденную земную кору. При этом было важно понять, приближалась ли земная кора к пределу прочности или отдалялась от него в результате давления. Для этого исследовали распределение параметра R , который характеризует отклонение напряженного состояния от его положения относительно предела прочности. Если параметр $R < 0$, то земная кора отдаляется от предельного состояния, а при $R > 0$ приближается к нему.

Следует отметить, что о вариациях атмосферного давления над сейсмически активным регионом можно судить либо по результатам непосредственных наблюдений этого параметра, либо по косвенным измерениям вариаций ионосферной плотности. Хорошо известны исследования, в которых установлена достаточно четкая корреляция между синхронными вариациями усредненных величин приземного давления и ионизации слоя F ионосферы [7]. Поэтому при отсутствии непосредственных наблюдений вариаций приземного давления можно воспользоваться результатами измерений полного электронного содержания (total electron content, ТЕС) ионосферы, полученными на основе обработки радиосигналов навигационных систем спутников GPS или ГЛОНАСС.

На рис. 2 представлены результаты вейвлет-анализа вариаций ТЕС (с 350-го по 365-й день) в диапазоне периодов $T \sim 2\text{--}5$ сут (вертикальная ось) на основании данных 10 наземных станций спутниковой системы GPS, расположенных в области исследуемого Суматранского землетрясения (см. рис. 3). Как следует из рис. 2, во время последних 10 дней перед датой землетрясения (362-й день) максимальная интенсивность этих вариаций

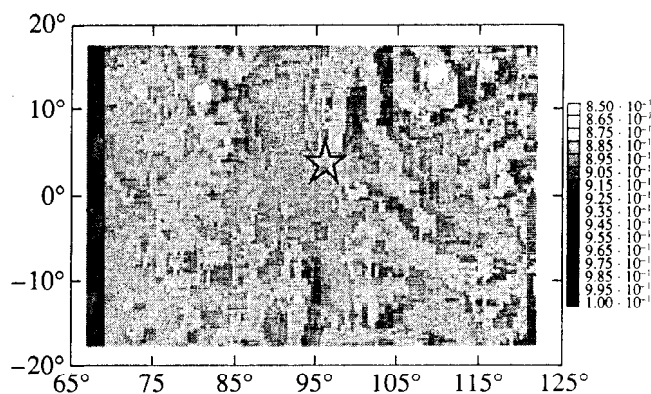


Рис. 1 Распределение главных касательных напряжений в слое 4 (глубины 60–100 км).

отмечена на станциях Samp, Ntus, Vako, Coso, ближайших к эпицентру (рис. 3) и гораздо слабее на станции Dgar. На более удаленных станциях вариации ТЕС практически отсутствовали. При этом магнитная активность за весь исследуемый промежуток времени (с середины ноября по декабрь) была невысокой (при среднем значении индекса геомагнитной активности $K_p \leq 2$ и максимальном $K_p < 4$).

Пространственно-временные распределения областей максимальных вариаций ТЕС, соответствующих областям повышенного атмосферного давления, выявленные за 30, 20 и 10 дней до сейсмического события, произошедшего 26 декабря 2004 г., показаны на рис. 3. Видно, что в пределах области с координатами $20.0^\circ\text{S}\text{--}20.0^\circ\text{N}$ и $65.0^\circ\text{E}\text{--}125.0^\circ\text{E}$ перед рассматриваемым землетрясением в ионосфере регистрировались области интенсивных вариаций ТЕС. Самая большая из них начала формироваться приблизительно за 30 дней до землетрясения и просуществовала 10 дней. Затем в течение 5 дней регистрировалась вторая аномалия, и, наконец, в течение 10 дней непосредственно перед землетрясением сформировалась третья аномальная область.

Аналогичные распределения ТЕС получены нами и для серии последующих Суматранских землетрясений, состоявшихся 5 и 24 июля 2005 г. с магнитудами $M = 7.3$ и $M = 6.7$, а также для Пакистанского землетрясения с $M = 7.7$ 8 октября 2005 г. и других крупнейших землетрясений.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Достаточно локальная интенсификация вариаций ТЕС в диапазоне нескольких суток (диапазон планетарных волн) не может соответствовать непосредственному распространению этих атмосферных волн в ионосферу из-за их сравнительно небольшой вертикальной скорости (меньше или порядка 5 км/день). Поэтому выявленные вариации

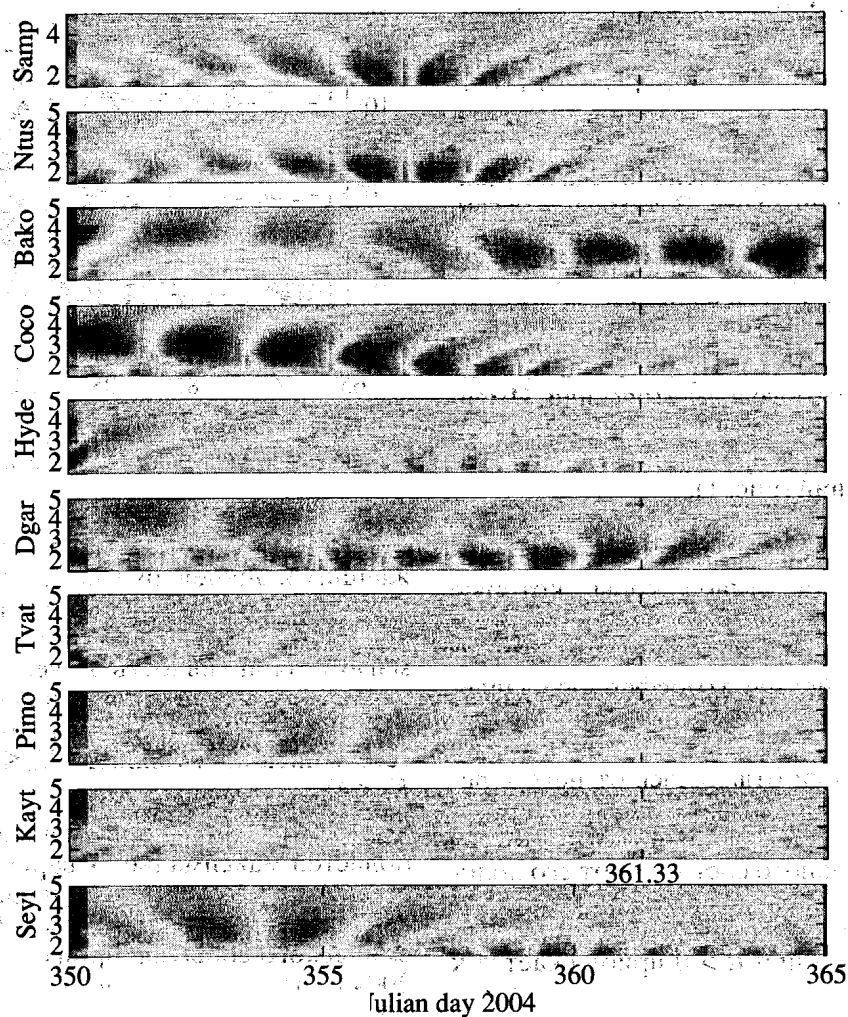


Рис. 2. Результаты вейвлет-анализа вариаций TEC в диапазоне периодов $T \sim 2-5$ сут по данным 10 наземных станций спутниковой системы GPS, расположенных в области Суматранского землетрясения с $M = 9.0$, состоявшегося 26 декабря 2004 г.

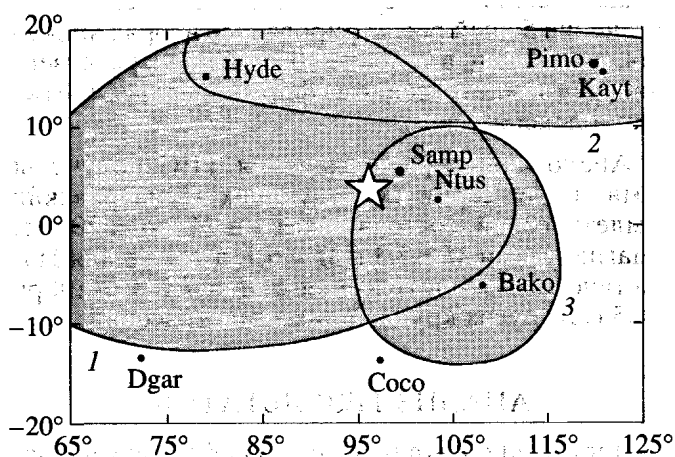


Рис. 3. Области аномальных пространственно-временных вариаций TEC, выявленные по данным спутниковой навигационной системы GPS за 30 дней до землетрясения (1), за 20 дней (2) и в течение 10 дней (3) перед землетрясением на Суматре 26 декабря 2004 г.

ции TEC можно интерпретировать как результат взаимодействия планетарных волн с распространяющимися в ионосферу атмосферными внутренними волнами [8]: ветровая система планетарной волны модулирует проникновение внутренних волн на высоты ионосферы. В свою очередь, источником внутренних волн может быть либо барическое образование в приземной атмосфере (например, градиент атмосферного давления, обусловленный прохождением атмосферного фронта), либо эпицентральная область готовящегося землетрясения, где возможна генерация внутренних волн вследствие интенсификации дегазации перед сейсмическим событием [9].

На рис. 4 показано рассчитанное распределение параметра R в случае предполагаемого действия третьей аномальной области (рис. 3), ассоциируемой в модели с градиентом атмосферного давления. При расчете учитывали, что передача давления на земную кору осуществляется только

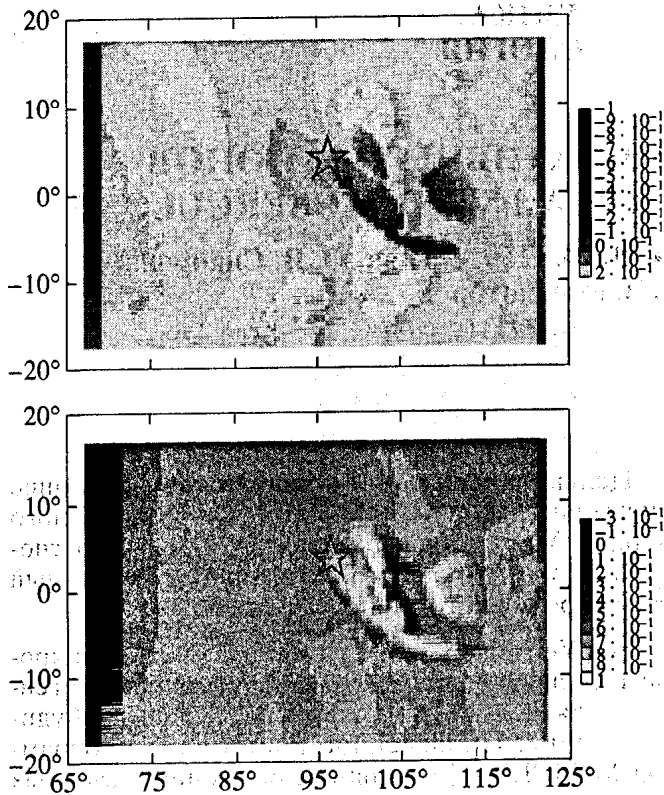


Рис. 4. Распределение параметра R для аномалии 3 в слое 1 (0–20 км) (вверху) и в слое 4 (80–100 км) (внизу).

на участках, не занятых океаном. Максимальное значение избыточного давления составляет не более 1% от среднего атмосферного. Из анализа рис. 4 видно, что в зоне аномалии давления верхний слой 1 (0–20 км) отдален от предела прочности, тогда как глубже, в слоях 2, 3 и особенно в слое 4, приближается к этому пределу. Следовательно, избыточное давление приближает эти зоны к пределу прочности и, таким образом, может вызвать триггерный эффект. Аналогично действуют первая и вторая аномальные области (рис. 3).

Следует отметить, что по мере приближения к моменту землетрясения области земной коры в очаговой зоне могут находиться сколь угодно близко к пределу прочности.

Таким образом, несмотря на то, что тектонические землетрясения и крупномасштабные изменения атмосферного давления развиваются по своим собственным законам, начиная с некоторого момента времени их взаимная обусловленность (в рамках рассматриваемого приближения) весьма вероятна.

Выполненный в данной работе анализ приводит к выводу, что моделирование близкого к реальному напряженно-деформированного состояния земной коры и его вариаций в результате небольших внешних воздействий позволяет детально исследовать сейсмоопасные зоны. При этом регистрация вариаций атмосферного давления и общего электронного содержания ионосферы может играть важную роль для мониторинга готовящихся сейсмических событий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сытинский А.Д. // ДАН. 1979. Т. 245. № 6. С. 1337–1340.
2. Ярошевич М.И. // ДАН. 1991. Т. 316. № 1. С. 88–92.
3. Гарагаи И.А., Ингель Л.Х., Ярошевич М.И. // Физика Земли. 2004. № 8. С. 91–96.
4. Нечаев Ю.В. В сб.: Геофизика на рубеже веков. Избр. тр. ОИФЗ РАН. М.: ОИФЗ РАН, 1999. С. 276–290.
5. Стеблов Г.М. // ДАН. 2004. Т. 398. № 6. С. 815–817.
6. Стеблов Г.М. // ДАН. 2004. Т. 394. № 5. С. 689–692.
7. Данилов А.Д., Казимировский Э.С., Вергасова Г.В., Хачикян Г.Я. Метеорологические эффекты в ионосфере. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 272 с.
8. Meyer C.K. // J. Geophys. Res. 1999. V. 104. P. 28181–28196.
9. Гохберг М.Б., Шалимов С.Л. Воздействие землетрясений и взрывов на ионосферу. М.: Наука, 2006.