

УДК 551.24.02:551.243

СВЯЗЬ МЕЖДУ ВАРИАЦИЯМИ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЗЕМНОЙ КОРЫ И СЕЙСМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТЬЮ НА ПРИМЕРЕ ЮЖНОЙ КАЛИФОРНИИ

© 2010 г. Академик В. Г. Бондур, И. А. Гарагаш, М. Б. Гохберг,
В. М. Лапшин, Ю. В. Нечаев

Поступило 01.07.2009 г.

В настоящей работе создана трехмерная геомеханическая модель Южной Калифорнии, включающая горный рельеф, разломную тектонику и основные структурные границы — кровлю нижней коры и поверхность Мохоровичича. Основное напряженное состояние модели определяется собственным весом и горизонтальными тектоническими движениями, устанавливаемыми на основе GPS-наблюдений. Мониторинг изменений напряженного состояния земной коры и литосферы, порождаемых сейсмическим процессом, показал, что модель дает возможность прогнозировать усиление сейсмической активности в регионе и выделять места, в которых могут произойти землетрясения с магнитудами от 3 до 5 в ближайшие две недели.

Коровые землетрясения есть результат медленных тектонических движений земной коры, формирующих геологические структуры и приводящих к накоплению в них значительной упругой энергии, которая разряжается в окружающее пространство в результате разрушения материала земной коры в тех ее местах, где тектонические напряжения достигают предела прочности. Напряженно-деформированное состояние земной коры складывается под действием многих факторов. Среди основных можно назвать горизонтальные и вертикальные тектонические движения, некомпенсированный вес горного рельефа, вариации плотности, неравномерный нагрев. Перечисленные виды нагрузок взаимодействуют со сложной геофизической средой, главным признаком которой является разломно-блоковое строение, вертикальная реологическая расслоенность, наличие флюидов и горного рельефа. Осо-

бо следует выделить разломно-блоковое строение земной коры как генетически связанное с тектоникой плит и сейсмическим процессом. Зоны разломов возмущают напряженно-деформированное состояние земной коры и накапливают значительное количество потенциальной энергии деформации. Последнее обстоятельство было использовано для выделения зон возможных сильных землетрясений [1]. Модель земной коры для участка, расположенного в западной части района Бассейнов и Хребтов Южной Калифорнии, показала, что сейсмическая активность существенно зависит от тектонических движений по разломам [2].

ТРЕХМЕРНАЯ ГЕОМЕХАНИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Для прогноза землетрясений нужно следить за изменениями напряженно-деформированного состояния земной коры исследуемого района. Сделать это возможно в рамках количественной трехмерной геомеханической модели. Такой подход ранее позволил связать ионосферные вариации со слабым воздействием градиентов атмосферного давления перед Суматранским землетрясением 26 декабря 2004 г. с магнитудой 9.2 в пределах Филиппинской и Зондской островных дуг [3].

Для области, расположенной в пределах от 31.0°–36.0° с.ш. и 121.2°–114.0° з.д., была создана трехмерная модель Южной Калифорнии, включающая горный рельеф и основные структурные границы [4] — кровлю нижней коры и поверхность Мохоровичича (рис. 1а). Характерные размеры изучаемого объема составляют 645 × 560 × 35 км.

В модели учтено распределение разломов. С тектонической точки зрения разлом представляет собой зону со сложным внутренним строением. Его можно рассматривать как некоторое геологическое тело, имеющее длину, ширину и глубину. Ширина зон крупных разломов может

*Научный центр аэрокосмического мониторинга
“Аэрокосмос”*

Российской Академии наук, Москва

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта

Российской Академии наук, Москва

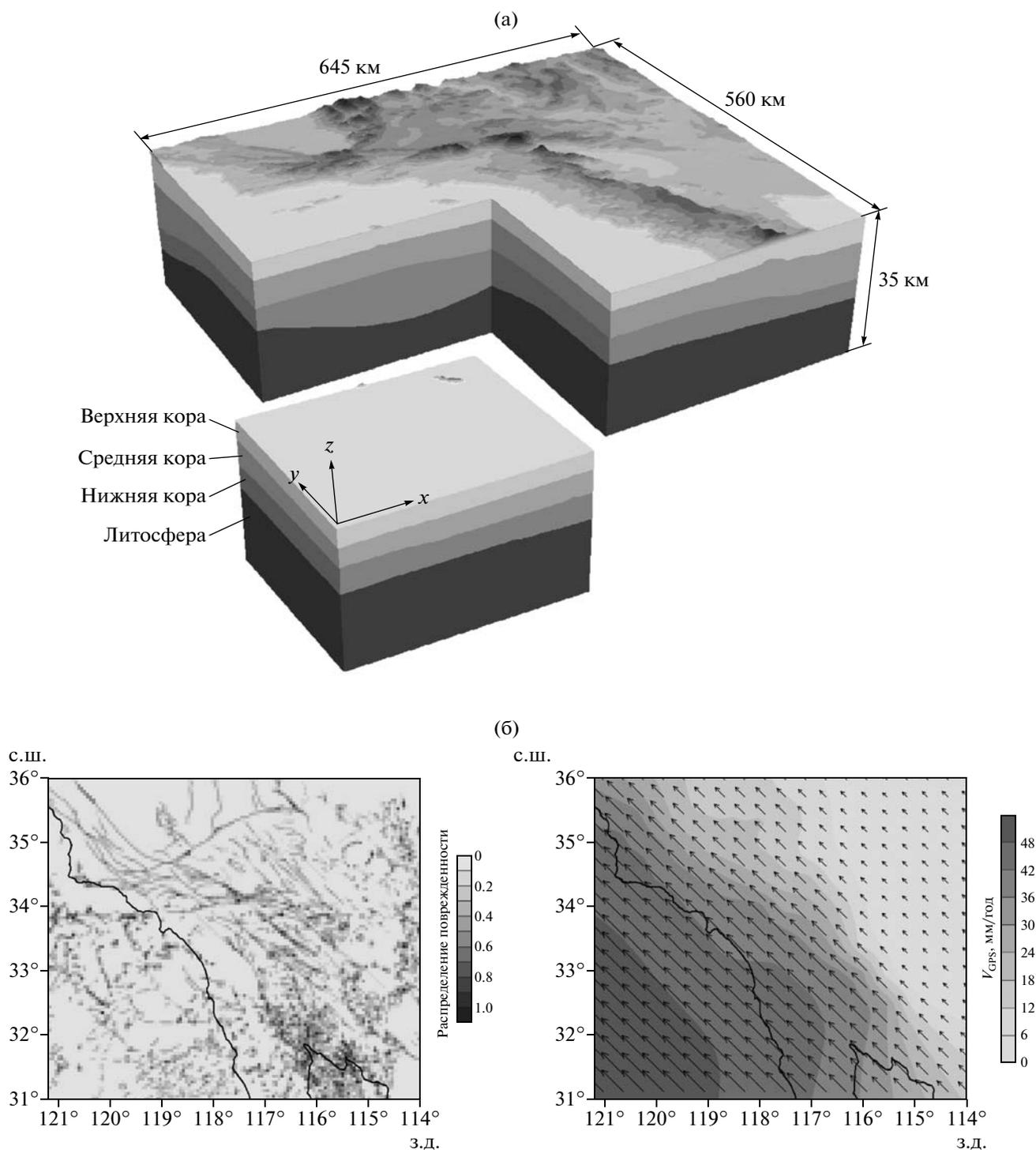


Рис. 1. Модель земной коры Южной Калифорнии: а – общий вид, б – нормированное распределение функции поврежденности $g(x_s)$ в верхней коре и распределение скоростей движения земной коры по данным GPS-измерений.

достигать десятков километров и включает в себя разломы меньшего ранга. В пределах зоны разлома горные породы раздроблены и характеризуются повышенной трещиноватостью. В результате

повышенной поврежденности среды их жесткость и прочность в зоне разлома заметно ниже, чем у блоков земной коры, границей которых она служит. Об этом свидетельствуют как данные о

скоростях распространения сейсмических волн на разломах и вне их, так и повышенная сейсмическая активность.

Для получения количественной характеристики распределения поврежденности в земной коре использованы данные обработки космических изображений. Поврежденность среды характеризуется функцией неоднородности $g(x_s)$, равной единице на оси разлома и нулю вне зоны его влияния (рис. 16). Функция $g(x_s)$ аппроксимируется с помощью сплайн-функций. Все механические параметры задаются в виде

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

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

Нагружение земной коры Южной Калифорнии происходит под действием сил собственного веса и в результате горизонтального движения плит. Соответствующее распределение скоростей по данным GPS-измерений показано на рис. 16 [5].

ЭТАПЫ РАСЧЕТОВ И ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Расчет напряженного состояния содержал два этапа. Сначала рассчитывали начальное напряженное состояние модели под действием сил собственного веса. Затем задавали поле скоростей (рис. 16), что соответствовало накоплению напряжений в земной коре.

Далее вычисляли изменения напряженного состояния земной коры, связанные с развитием сейсмического процесса. При моделировании сейсмического процесса следует исходить из того, что перемещения по разломам контролируются силами сухого трения в соответствии с условием прочности Кулона–Мора. Таким образом, система блоков деформируется сначала упруго, а после достижения предельного условия приходит в движение. В результате угол трения уменьшается скачком до некоторого минимального значения и устанавливается новое равновесие на более низком уровне напряжений. При этом эффективные механические свойства среды в окрестности сейсмического события меняются, что приводит к перераспределению напряжений в земной коре и в конечном итоге подготавливает новое сильное землетрясение.

Каждое землетрясение представляет собой элементарное повреждение, которое в случае знания энергии события и его механизма может быть включено в модель земной коры. Совокупность множества сейсмических событий можно интер-

претировать как сейсмическое течение горных масс. Методы механики тел с большим числом трещин позволяют поставить и решить задачу об изменениях напряжений и деформаций в предварительно напряженной растрескивающейся земной коре. Для этого необходимо иметь достаточно подробный машинный каталог механизмов землетрясений и знать распределение начальных напряжений.

Исходными данными для расчетов служат распределения выделившейся сейсмической энергии за промежуток времени, равный трем месяцам начиная с октября 2007 г. Выбранное временное окно каждый раз сдвигается на 15 дней. После того как произведены вычисления напряжений на предыдущем и последующем шагах, находится разница двух состояний и по ней оцениваются происходящие изменения. Строятся вариации распределений максимальных касательных напряжений, накопленной упругой энергии сдвига и близости напряженного состояния к пределу прочности. При этом рассматриваются только те участки земной коры, на которых значения параметров положительны, т.е. превосходят предыдущие.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Вычисленное распределение напряжений позволяет понять, как близко подходит земная кора к пределу прочности. В последнем случае исследуется распределение параметра D , который характеризует удаленность напряженного состояния от поверхности прочности. Чем меньше параметр D , тем дальше напряженное состояние от предела прочности.

Пример распределения вариации максимальных напряжений сдвига по состоянию на 01.10.2008 г. приведен на рис. 2. Анализ этого рисунка показывает, что на исследуемой территории выделяются участки, на которых в результате сейсмического процесса ухудшилась ситуация по сравнению с той, которая существовала на 15.09.2008 г., – повысились касательные напряжения. То же самое можно сказать об энергонасыщенности земной коры.

Предполагается, что в результате на этих участках или в их окрестности в следующие 15 дней могут произойти землетрясения с магнитудой, превышающей уровень 3.5. В рассматриваемом конкретном случае нанесено одно землетрясение с магнитудой $M = 4.1$, произошедшее с 01.10.2008 г. по 15.10.2008 г. (кружок на рис. 2). Видно, что это землетрясение произошло на одном из выделенных расчетом участков. Таким образом, расчет позволяет указывать на места, в ко-

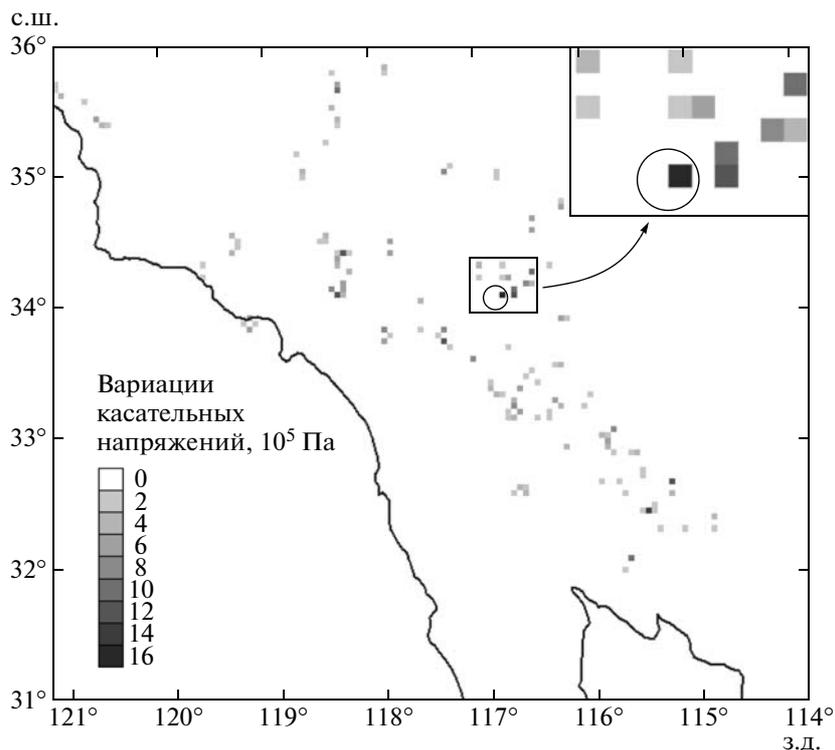


Рис. 2. Распределение разности вариаций максимальных напряжений сдвига в верхней коре по состоянию на 01.10.2008 г.

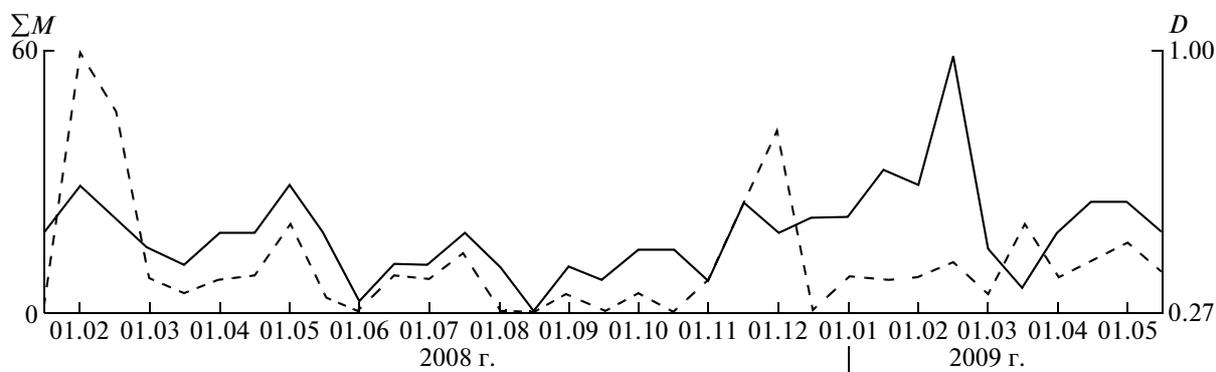


Рис. 3. Изменения во времени суммарной магнитуды землетрясений ΣM (штриховая линия) и параметра близости напряженного состояния к пределу прочности в верхней коре D (сплошная кривая).

торых могут произойти землетрясения средней силы в ближайшие две недели.

Интересно проследить связь изменения сейсмической активности с приближением или удалением всего района от предела прочности (параметр D). На рис. 3 построены временные графики изменения параметра D и суммарных магнитуд ΣM . Значения последних отнесены к началу двухнедельного промежутка, на котором они произошли.

Согласно рис. 3 изменения параметра D хорошо предсказывают землетрясения средней силы в регионе на отрезке в две недели. Незначительные расхождения двух графиков могут быть связаны с выбором прогнозного промежутка.

Таким образом, созданная геомеханическая модель Южной Калифорнии позволяет выполнять мониторинг изменений напряженного состояния земной коры и литосферы, порождаемых сейсми-

ческим процессом в регионе, и давать краткосрочный прогноз сейсмической активности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гарагаш И.А.* // ДАН. 1991. Т. 318. № 4. С. 862–867.
2. *Гохберг М.Б., Гарагаш И.А., Нечаев Ю.В. и др.* Исследования в области геофизики. К 75-летию Обьединенного института физики Земли. М.: Изд-во ОИФЗ РАН, 2004.
3. *Бондур В.Г., Гарагаш И.А., Гохберг М.Б. и др.* // ДАН. 2007. Т. 414. № 4. С. 540–543.
4. *Parsons T.J.* // Geophys. Res. 2006. V. 111. B03407. P. 1–16.
5. *Becker W.B., Hardebeck J.L., Andersen G.* // Geophys. J. Intern. 2005. V. 160. P. 634–650.