

УДК 550.8

## ОЦЕНКА ВЕЛИЧИН НАПРЯЖЕНИЙ В МЕТОДЕ КАТАКЛАСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА РАЗРЫВОВ

© 2009 г. Ю. Л. Ребецкий

Представлено академиком С.А. Федотовым 25.03.2009 г.

Поступило 14.04.2009 г.

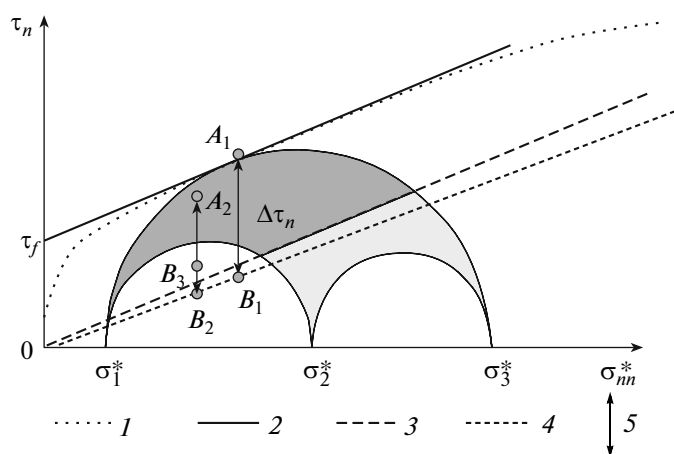
Возможность оценки величины тектонических напряжений в методе катакластического анализа (МКА) разрывных нарушений [1] появилась после того, как в нем был создан алгоритм второго этапа реконструкции, ориентированный на расчет относительных величин шаровой и девиаторных компонент тензора напряжений. В этом методе после первого этапа по данным о совокупности механизмов очагов из однородной выборки землетрясений рассчитываются три угла Эйлера, фиксирующие ориентацию осей трех главных напряжений, и значение коэффициента Лоде–Надаи  $\mu_\sigma$ , характеризующего вид тензора напряжений. Такая однородная выборка землетрясений определяет квазиоднородную стадию деформирования для расчетного домена земной коры. В рамках второго этапа МКА на диаграмме Мора выполняется анализ распределения точек, характеризующих значения вектора напряжений на плоскости разрыва, для землетрясений из такой однородной выборки, которая позволяет оценить относительные значения максимального касательного напряжения  $\left\langle \frac{\tau}{\tau_f} \right\rangle$  и эффективного

давления  $\left\langle \frac{p^*}{\tau_f} \right\rangle$  ( $p^* = p - p_{fl}$  – разность давления в твердых горных породах и флюидного давления в трещинно-поровом пространстве). Нормировка  $p^*$  и  $\tau$  осуществляется на неизвестное значение эффективного внутреннего сцепления  $\tau_f$  массивов горных пород. Алгоритм подобной оценки в МКА основывается на аппроксимации на плоскости Мора (эффективное нормальное напряжение  $\sigma_{nn}^*$ , касательное напряжение  $\tau_n$ ) диаграммы прочности трещиноватых горных пород с помощью двух предельных линий (рис. 1), одна из которых (верхняя) характеризует предел эффективной внутренней прочности массивов, а вторая (нижняя) – минимальное сопротивление статического трения для уже существующих трещин и

разрывов. Для масштабов осреднения мегаскопического уровня (более первых метров осреднения) будем считать, что коэффициенты внутреннего и поверхностного статического трения равны ( $k_f = k_s$ ).

### АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ ВЕЛИЧИН НАПРЯЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ О НАПРЯЖЕНИЯХ, СБРОШЕННЫХ В ОЧАГАХ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Для оценки абсолютных величин напряжений в рамках третьего этапа МКА предлагается использовать данные о величине касательного на-



**Рис. 1.** Геометрический анализ на диаграмме Мора напряжений, сбрасываемых в очаге землетрясения. 1 – возможный вид криволинейной огибающей, характеризующей предел эффективной внутренней прочности для массива горных пород, отвечающего масштабу реконструируемых параметров напряжений; 2 – линейная аппроксимация предельной криволинейной огибающей, используемая в МКА; 3 – линия сухого статического трения горных пород; 4 – линия сухого кинематического трения горных пород; область темно-серого цвета – геометрическое место точек для напряжений на плоскости трещин, которые могут активизироваться для данного тензора напряжений (светло-серая заливка – остальные напряженные состояния на произвольно ориентированных плоскостях); 5 – величина сброшенных касательных напряжений.

пряжения, снимаемого в очаге сильного землетрясения. Эти данные являются результатом анализа сейсмических записей на основе комплекса сейсмологических методов и поэтому в рамках МКА могут рассматриваться как дополнительные, составляющие основу третьего этапа реконструкции параметров тензора напряжений. Подобный подход стал возможен в силу того, что после первых двух этапов реконструкции параметров напряжений МКА позволяет оценить относительную величину сбрасываемых напряжений в очагах сильных землетрясений, характерный линейный размер которых не меньше характерного линейного размера окна осреднения реконструированных параметров тензора напряжений. Алгоритм такой оценки иллюстрирует рис. 1, где на диаграмме Мора показан вертикальный отрезок, соединяющий точку касания предельной огибающей с большим кругом Мора напряженного состояния в области, включающей в себя очаг произошедшего землетрясения, с линией кинематического трения. Длина этого отрезка ( $A_1B_1$ ) равна величине разности касательных напряжений до и после землетрясения, т.е. снимаемому напряжению ( $\Delta\tau_n = |\tau_n^0 - \tau_n^1|$ ), в случае, если направление скольжения в очаге совпадает с направлением касательного напряжения, действовавшего здесь до землетрясения. Возможность подобной геометрической интерпретации базируется на следующем из теории разрушения [2] факте о неизменности нормальных напряжений на плоскости разрыва сплошности сдвигового типа до и после его активизации ( $\sigma_n^0 = \sigma_n^1 = \sigma_n \leq 0$ ), а также на равенстве касательных напряжений на разрыве после его активизации величине кинематического трения ( $\tau_n^1 = -k_k \sigma_n^*$ ). Запишем выражение для величины снимаемых напряжений, нормированной на  $\tau_f$ :

$$\left\langle \frac{\Delta\tau_n}{\tau_f} \right\rangle = \bar{\tau}_n \left\langle \frac{\tau}{\tau_f} \right\rangle + k_k \left( \bar{\sigma}_n \left\langle \frac{\tau}{\tau_f} \right\rangle - \left\langle \frac{P^*}{\tau_f} \right\rangle \right) \quad (1)$$

при

$$\begin{aligned} \bar{\tau}_n &= (1 - \mu_\sigma) l_{1n} l_{1s} + (1 + \mu_\sigma) l_{3n} l_{3s} > 0, \\ \bar{\sigma}_n &= (1 - \mu_\sigma) l_{1n}^2 - (1 + \mu_\sigma) l_{3n}^2 + \frac{2\mu_\sigma}{3} < 0. \end{aligned}$$

Здесь  $\bar{\tau}_n$ ,  $\bar{\sigma}_n$  – редуцированные девиаторные напряжения на плоскости разрыва,  $l_m$  – направляющие косинусы нормали к плоскости очага анализируемого сильного землетрясения с осями главных напряжений  $\sigma_i$ ,  $i = 1, 3$ , а  $k_k$  – коэффициент кинематического трения. В алгоритме МКА, реализованном в представленных ниже расчетах, значения статического “сухого” трения  $k_s$  и эффективного внутреннего трения  $k_f$  были приняты 0.6, а значение кинематического трения  $k_k = 0.5$ .

Возможность использования (1) предполагает постоянство флюидного давления в каждом из расчетных доменов в момент активизации разрыва ( $p_{fl}^2 = p_{fl}^1$ ). Первое слагаемое в (1) характеризует величины касательных напряжений  $\tau_n^0$ , действовавшие вдоль плоскости очага до землетрясения (точка  $A_1$  рис. 1), а второе – касательное напряжение  $\tau_n^1$ , которое будет действовать здесь после землетрясения (точка  $B_1$  рис. 1). Все параметры, входящие в выражение (1) для определения относительной величины  $\left\langle \frac{\Delta\tau_n}{\tau_f} \right\rangle$ , можно получить после первых двух этапов МКА. Заметим, что использование выражения (1) требует знать реализованную плоскость очага землетрясения, т.е. необходим выбор одной из двух нодальных плоскостей, который сейсмологи, как правило, осуществляют только для сильных землетрясений.

После расчета относительной величины  $\left\langle \frac{\Delta\tau_n}{\tau_f} \right\rangle$

по данным первых двух этапов МКА можно переходить к оценке  $\tau_f$ . В качестве дополнительных данных используем значение напряжений  $\Delta\tau_n$ , снятых при сильном землетрясении:

$$\tau_f = \frac{\Delta\tau_n}{\langle \Delta\tau_n / \tau_f \rangle}. \quad (2)$$

Величина  $\Delta\tau_n$  в правой части (2) определяется с привлечением данных о скалярной величине сейсмического момента  $M_0$  и геометрии очага [3]:

$$\Delta\tau_n = \frac{\chi M_0}{WL^2}, \quad (3)$$

где  $L$  и  $W$  – соответственно длина (наибольший из субгоризонтальных размеров) и ширина очага, а  $\chi$  – параметр, зависящий от типа смещения в очаге (сброс, взброс, сдвиг) и его геометрической формы ( $0.65 \leq \chi \leq 1.85$ ).

В работе [4] показано, что если пренебречь энергией, связанной с изменением площади поверхности растущего разрыва, и считать, что касательные напряжения после начала смещения вдоль разрыва не изменялись, оставаясь равными сухому кинематическому трению, то сбрасываемые в очаге касательные напряжения можно определить, используя данные о выделившейся сейсмической энергии  $E_s$ :

$$\Delta\tau_n = \frac{2\mu E_s}{M_0}, \quad (4)$$

где  $\mu$  – модуль упругого сдвига (для коры  $\mu \approx (3-5) \cdot 10^{10}$  МПА),  $E_s$  и  $M_0$  представлены в Джоулях.

Здесь следует заметить, что в сейсмологии существует соотношение, позволяющее на основа-

нии данных о сейсмической энергии оценить так называемое кажущееся напряжение  $\bar{\tau}_n = \frac{|\tau_n^0 + \tau_n^1|}{2}$ , представляющее собой среднее напряжение между двумя состояниями на разрыве:

$$\eta \bar{\tau}_n = \frac{\mu E_s}{M_0}, \quad (5)$$

где  $\eta = \frac{\Delta \tau_n}{2 \bar{\tau}_n}$  — так называемый сейсмический кпд.

Выражение (5) часто используют для определения  $\bar{\tau}_n$ . Однако в силу большой неопределенности величины  $\eta$  подобные оценки нельзя считать достоверными.

Значение  $E_s$  в выражении (4) можно получить, используя корреляционные зависимости с магнитудой землетрясения  $M_e$ , характеризующей энергией, излучаемую в сейсмических волнах:

$$\lg E_s = \frac{3M_e}{2} + 4.35. \quad (6)$$

Если разрушение происходит вдоль ранее существовавшего разрыва, полностью не восстановившего прочность сцепления до ненарушенного состояния ( $\tau_s < \tau_f$ ), то на диаграмме Мора вертикальный отрезок, характеризующий сбрасываемое напряжение, начинается от точки, лежащей ниже предельной огибающей, но выше линии, определяющей минимальное сопротивление сухого статического трения (отрезок  $A_2B_2$  рис. 1). В случае, когда направление смещения вдоль разрыва не совпадает с направлением касательных напряжений, действовавших на его плоскости до активизации, вертикальный отрезок не доходит до линии сопротивления кинематического трения (отрезок  $A_2B_3$  рис. 1).

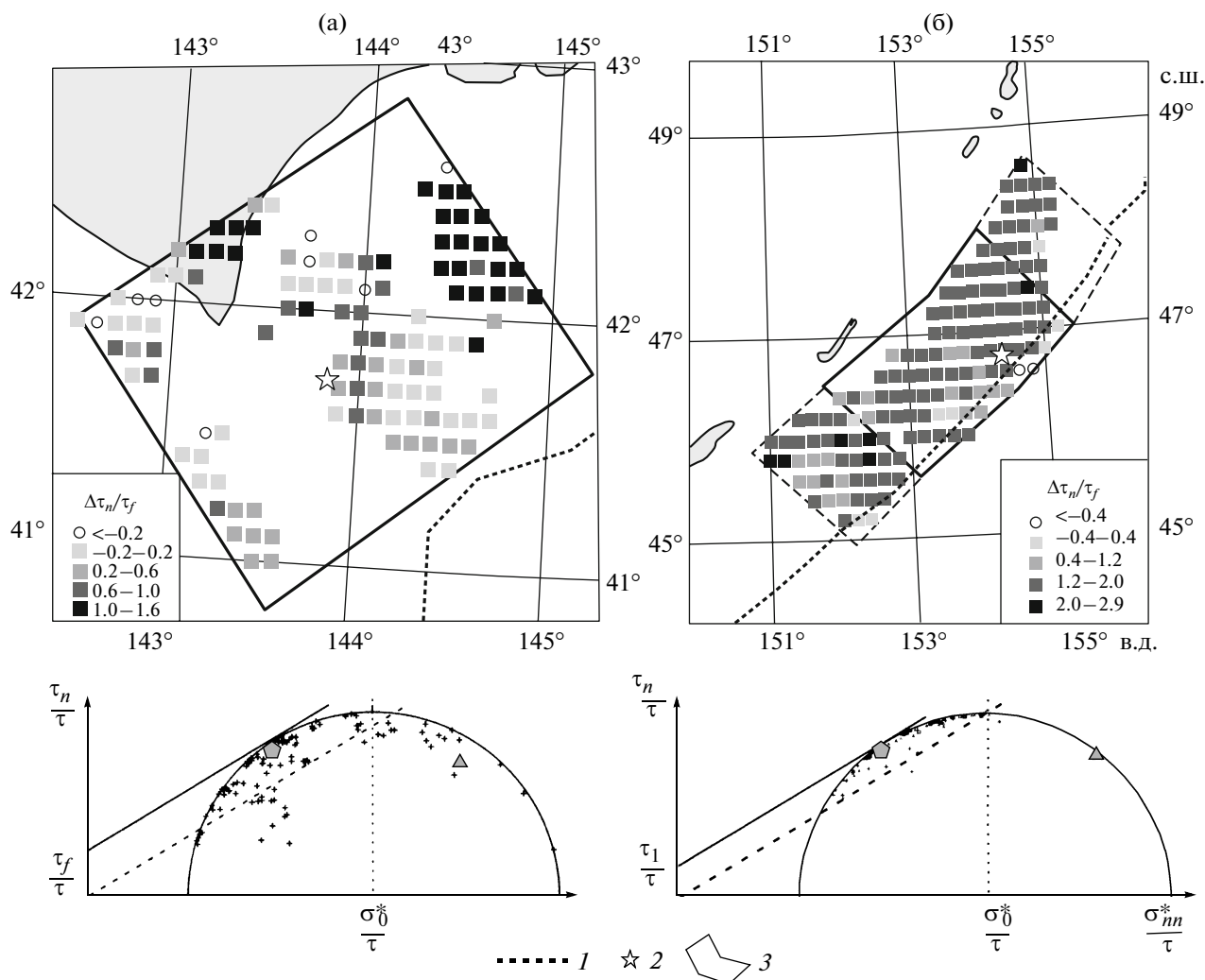
Параметры напряжений, подставляемые в выражение (1), должны отвечать периоду осреднения, предшествовавшему сильному землетрясению, данные о сбрасываемых напряжениях которого будут использоваться для определения  $\tau_f$ . Например, использование каталога механизмов очагов землетрясений с диапазоном магнитуд от 4.5 до 7 позволяет говорить о том, что реконструированные параметры тензора напряжений могут отвечать масштабу осреднения 20–100 км (конкретное значение зависит от плотности распределения эпицентров землетрясений), а диапазон магнитуд от 2.5 до 6 — масштабу осреднения 5–30 км. Для этих масштабов осреднения напряжений сильные землетрясения, данные о сбрасываемых напряжениях которых можно использовать для оценки внутреннего сцепления, должны иметь магнитуды не менее 6.5 и 5.5 соответственно, т.е. область очага должна быть не меньше окна осреднения напряжений.

Алгоритм третьего этапа МКА позволяет оценить значение эффективного внутреннего сцепления горных пород  $\tau_f$ , а затем, используя данные об относительных величинах максимальных касательных напряжений и эффективного давления (второй этап МКА), перейти к абсолютным их значениям.

### ПРИМЕРЫ ОЦЕНКИ ВЕЛИЧИНЫ ЭФФЕКТИВНОГО ВНУТРЕННЕГО СЦЕПЛЕНИЯ ГОРНЫХ МАССИВОВ

Для расчета  $\tau_f$  будем использовать данные о величинах снимаемых напряжений для землетрясения Токачи Оки (ТОЗ) с  $M_w = 8.3$ , произошедшего к юго-востоку от о. Хоккайдо 25.09.2003 г. на глубине 27 км, и для Симуширского землетрясения (СЗ) 15.11.2006 г. с  $M_w = 8.3$  (глубина очага 28 км по данным И.Н. Тихонова [5] и 30 км по данным Геологической службы США USGS [6]).

Реконструкция напряжений в области подготовки ТОЗ выполнялась на основе сейсмологических данных о механизмах очагов землетрясений из каталога Японского метеорологического агентства [7]. Наиболее представительный диапазон магнитуд землетрясений из этого каталога для исследуемого участка коры  $3.5 > M_w > 5.5$  (85%) и плотность распределения их эпицентров позволяли говорить о масштабе осреднения параметров напряжений 5–20 км. Реконструкция выполнялась в узлах сетки  $0.1^\circ \times 0.1^\circ$  для слоя со средней поверхностью на глубине 20 км. Очагу согласно данным [6] и афтершоковой последовательности [8] отвечала полого наклоненная плоскость ( $7^\circ$ ) с азимутом простирания  $234^\circ$ , протяженность которой вдоль океанического желоба составляет  $L = 180$  км, а поперек  $W = 150$  км с перепадом глубин 10–30 км. На рис. 2а показаны значения нормированных на  $\tau_f$  величин сброшенных касательных напряжений в центрах 118 доменов в окрестности очага ТОЗ, для которых по результатам первых двух этапов реконструкции получены данные о компонентах тензора напряжений. В МКА [1] существует возможность выбора одной из двух нодальных плоскостей в качестве плоскости, реализованной при землетрясении. Подобный анализ выполняется на диаграмме Мора и позволяет определить нодальную плоскость, которая ближе по ориентации к плоскости скалывания горных пород. В частности для исследуемого землетрясения полого наклоненная нодальная плоскость, представленная на диаграмме Мора рис. 2а в виде пятиугольника, близка по ориентации к плоскости скалывания, а круто падающая плоскость (угол погружения  $83^\circ$ , простирание  $41^\circ$ ) попадает в область, запрещенную для разрушения (треугольник). Таким образом, используемый в МКА критерий выделения нодальной плоскости, реализованной в очаге землетрясения, дает тот же ре-



**Рис. 2.** Распределение нормированной величины сброшенных касательных напряжений (нормировка на сцепление  $\tau_f$ ), рассчитанных в рамках третьего этапа алгоритма МКА для ТОЗ (а) и СЗ (б): 1 – океанический желоб, 2 – начало “вспарывания” очага землетрясений (СЗ и ТОЗ), 3 – геометрия очага, использованная при расчетах, штриховым контуром показана геометрия очага СЗ по данным USGS. На обобщающих диаграммах Мора в нижней части рисунка показано положение точек со значениями нормированных нормальных и касательных напряжений вдоль очагов этих землетрясений. Нормировка произведена на значение максимального касательного напряжения, отвечающего домену с параметрами тензора напряжений, ближайшему к началу вспарывания землетрясения. Линия минимального сухого трения показана также для напряженного состояния этого домена. Точки ряда доменов лежат ниже линии минимального сухого трения, что говорит об отличии их напряженных состояний от состояния вблизи начала вспарывания землетрясения. Касательная – предел эффективной прочности; штриховая линия – линия минимального сухого трения; пятиугольник и треугольник отвечают напряжениям вдоль реализованной и сопряженной нодальных плоскостей механизмов очагов ТОЗ и СЗ.

зультат, что и сейсмологические методы, в которых очаг не рассматривается точечным источником сейсмических волн.

Расчет средней величины  $\left\langle \frac{\Delta\tau_n}{\tau_f} \right\rangle$  для 118 доменов (рис. 2а) дал значение 0.78. Площадь этих 118 доменов составляет около 65% от площади очага землетрясения. Отсутствие данных о параметрах напряжений других участков очага связано с существовавшим там низким уровнем сейсмической активности. Это косвенно говорит о том, что

напряженное состояние этих участков не являлось предельным и, следовательно, снимаемые в них напряжения могли быть малыми по величине. Будем далее считать нулевым вклад в выделяющуюся сейсмическую энергию участков, где отсутствуют данные о параметрах напряжений, т.е. полагать здесь  $\left\langle \frac{\Delta\tau_n^i}{\tau_f} \right\rangle = 0$ . Для расчета средней

величины  $\left\langle \frac{\Delta\tau_n}{\tau_f} \right\rangle$  для очага ТОЗ полученную сумму

для 118 доменов необходимо усреднить на всю площадь очага, что дает значение  $\left\langle \frac{\Delta\tau_n}{\tau_f} \right\rangle \approx 0.5$ . Далее, используя представленные в [9] для ТОЗ данные о величине сейсмического момента  $M_0 = 1.6 \cdot 10^{21}$  Дж и энергии  $E_s = 1.7 \cdot 10^{16}$  Дж, излученной в сейсмических волнах, полагая модуль сдвига  $\mu = 4 \cdot 10^{10}$  Па, из выражения (4) находим, что средние для очага ТОЗ снимаемые напряжения  $\Delta\tau_n$  составляли около 0.9 МПа (9 бар). Если для расчета использовать данные о геометрических размерах очага и выражение (3), то снимаемые напряжения  $\Delta\tau_n$  составляют 0.6 МПа (при  $\chi = 1.85$ , так как область очага близка к изометричной). Используя оба значения снимаемых напряжений, согласно выражению (2) определяем, что величина эффективного (масштаб осреднения 100–200 км) внутреннего сцепления  $\tau_f$  составляет 1.2–1.8 МПа.

Другой пример оценки величины эффективного сцепления массивов горных пород можно привести, используя результаты реконструкции напряжений, действовавших в земной коре северо-западного фланга Тихоокеанской сейсмоактивной области до СЗ 15.11.2006 г. ( $M_w = 8.3$ ). Реконструкция выполнялась в узлах ортогональной сетки  $0.2^\circ \times 0.2^\circ$  для глубины 20 км по данным о механизмах очагов мирового каталога Гарвардского университета (<http://neic.usgs.gov/neis/sopar>). Наиболее представительный диапазон магнитуд землетрясений из этого каталога для исследуемого участка коры  $5.5 > M_w > 6.5$  и плотность распределения их эпицентров позволяли говорить о масштабе осреднения параметров напряжений 50–70 км. Для оценки  $\tau_f$  использовались сейсмологические данные об энергетических параметрах СЗ. По данным, представленным на интернет-узле Гарвардского университета, величина энергии, выделившейся в сейсмических волнах,  $E_s$  и сейсмический момент  $M_0$ /СЗ были соответственно равны  $7.4 \cdot 10^{16}$  и  $3.4 \cdot 10^{21}$  Дж. Согласно сейсмологическим данным землетрясение СЗ имело следующий механизм очага: 1-я нодальная плоскость, простирание –  $215^\circ$ , погружение –  $15^\circ$ ; 2-я нодальная плоскость, простирание –  $33^\circ$ , погружение –  $75^\circ$ . Результаты инверсии сейсмических записей [10] показали, что реализованной в виде очага землетрясения являлась первая нодальная плоскость, которая соответствовала пологому погружению ( $15^\circ$ ) субдуцирующей океанической плиты под субконтинентальную плиту и имела протяженность вдоль желоба  $W$  порядка 400 км, а в поперечном направлении  $L$  порядка 130 км (пунктирный контур на рис. 26). Анализ распределения афтершоковой последовательности, выполненный в работах [5, 7], дает соответственно 300 и 60 км (сплошной контур на рис. 26).

Используя данные об энергии, выделившейся при СЗ, из выражения (4) находим  $\Delta\tau_n \approx 1.7$  МПа (17 бар). Если использовать выражение (3) и данные о геометрии очага (при  $\chi = 1$ , так как область очага неизометричная), то получим  $\Delta\tau_n \approx 0.5$  МПа (по данным USGS),  $\Delta\tau_n \approx 1.4$  МПа (по работам [5, 11]). Представленные результаты показывают, что расчет  $\Delta\tau_n$  по данным о размерах очага USGS занижает их величину, в то время как оценка геометрии очага в работах [5, 11] дает лучшее соответствие энергетическим параметрам землетрясения. В дальнейших расчетах будем использовать геометрию очага, данную в работах [5, 11]. Величину сброшенных напряжений в очаге СЗ с точностью до нормировки на неизвестное значение эффективного сцепления массивов пород  $\tau_f$  можно получить, используя результаты первых двух этапов реконструкции МКА и выражение (1). Для области очага СЗ существовало 90 доменов, для которых были получены данные о параметрах тензора напряжений (рис. 26). Используя данные этих доменов и суммируя вклад в сброшенные напряжения для участка очага в пределах каждого из доменов, на основании выражения (1) и данных о размерах очага находим среднее значение отношения  $\left\langle \frac{\Delta\tau_n}{\tau_f} \right\rangle = 1.41$ . Далее по данным о значениях сброшенных напряжений находим величину эффективного сцепления  $\tau_f = 1.0$ – $1.2$  МПа, которая близка к оценке, выполненной выше по данным ТОЗ.

#### СОПОСТАВЛЕНИЕ С ДАННЫМИ О ВЕЛИЧИНАХ НАПРЯЖЕНИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ ДРУГИМИ МЕТОДАМИ

В МКА данные об эффективном сцеплении горных массивов позволяют перейти от относительных значений девиаторных и изотропных напряжений к их абсолютным величинам. Для земной коры Курило-Камчатского и Японского участков Тихоокеанской субдукционной области диапазон изменений максимальных касательных напряжений  $\tau$  составляет от 2 до 40 МПа.

Известны теоретические оценки уровня напряжений  $\tau$  на глубине 30 км, полученные в работе [12], в 0.7–1 ГПа. При оценке напряжений эти исследователи опирались на данные о параметрах прочности, полученных в экспериментах на образцах, использовали сведения об ориентации главных напряжений, отвечающей соответствующей геодинамической обстановке, а также применяли гипотезу о близости значений вертикальных напряжений весу вышележащего столба горных пород и предположение о гидростатическом законе распределения по глубине флюидного давления. Получаемые в результате оценки уровня девиаторных напряжений в первые килобары

(сотни МПа) плохо соотносятся с сейсмологическими данными о величинах напряжений, снимаемых в очагах межплитовых сильных землетрясений, в первые бары—десятки бар. Подобные явно завышенные напряжения связаны с гипотезой о гидростатическом законе распределения по глубине флюидного давления и с величиной сцепления массивов горных пород, которая в этих расчетах принималась  $\tau_f \approx 50$  МПа. Отметим, что это значение эффективного сцепления согласно рис. 1 определяет минимальный уровень сбрасываемых напряжений (если плоскость очага соответствует плоскости внутреннего трения, а направление смещения отвечает направлению касательных напряжений, действовавших на ней до землетрясения).

Другие результаты оценки уровня природных напряжений получены в работе [13]. Здесь Ж. Хардебек для расчета использовала данные об ориентации главных осей напряжений до и после сильного землетрясения Ландерс  $M_b = 6.9$ , произошедшего на разломе Сан-Андрес в 1992 г., а также значения напряжений, снятых вдоль трех разных участков очага (протяженностью порядка 10 км) этого землетрясения ( $5 \leq \tau_n \leq 10$  МПа). Метод Ж. Хардебек ориентирован на типичный для исследуемого района геодинамический режим сдвигового напряженного состояния и позволяет рассчитать величину максимального касательного напряжения  $\tau$ , действовавшего до изучаемого землетрясения, в предположении, что коэффициент Лоде—Надаи тензора напряжений  $\mu_\sigma = 0$ . В случае землетрясения Ландерс было установлено, что  $\tau$  изменялось вдоль будущего очага с юга—юго-востока на север—северо-запад от 8 до 16 МПа. Эффективное внутреннее сцепление, которое можно оценить, используя исходные данные работы [13], для разных участков землетрясения Ландерс изменяется от 1.7 до 3.7 МПа. Полученные оценки близки к результатам, представляемым в настоящей работе и в предыдущих исследованиях [1].

Таким образом, представленный в работе алгоритм третьего этапа МКА позволяет оценивать эффективную прочность массивов горных пород с масштабом осреднения в первые километры и более и определять величины тектонических напряжений. Уровень девиаторных напряжений в земной коре северо-западного фланга Тихоокеанской субдукционной области составляет от 2 до 40 МПа, а эффективная прочность сцепления около 1 МПа.

Исследования поддержаны грантами РФФИ 06–05–64410, 07–05–00106.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ребецкий Ю.Л. М.: Наука, 2007. 406 с.
2. Райс Дж. Механика очага землетрясения. Сер. Механика. Новое в зарубежной науке. М.: Мир, 1982. 217 с.
3. Касахара К. Механика землетрясений. М.: Мир, 1985. 260 с.
4. Костров Б.В. Механика очага тектонического землетрясения. М.: Наука, 1975. 176 с.
5. Тихонов И.Н., Василенко Н.Ф., Прытков А.С. и др. В сб.: Междунар. науч. симп. “Проблемы сейсмобезопасности Дальнего Востока и Восточной Сибири”. Ю.-Сахалинск: ИМГГ ДВО РАН, 2007. С. 27–28.
6. <http://earthquake.usgs.gov/eqcenter/eqinthenews/2006/usvcam>
7. <http://158.203.31.121/freesia/event/search/search.html>
8. Федотов С.А., Соломатин А.В., Чернышев С.Д. // Вулканология и сейсмология. 2004. № 5. С. 3–22.
9. <http://earthquake.usgs.gov/eqcenter/eqinthenews/2003/uszsdap>
10. [http://earthquake.usgs.gov/eqcenter/eqarchives/poster/2006/20061115\\_image.php](http://earthquake.usgs.gov/eqcenter/eqarchives/poster/2006/20061115_image.php)
11. Федотов С.А., Соломатин А.В., Чернышев С.Д. // Вулканология и сейсмология. 2008. № 6. С. 3–23.
12. Sibson R.H. // Nature. 1974. V. 249. № 5457. P. 542–544.
13. Hardebeck J.L., Hauksson E. // J. Geophys. Res. 2001. V. 106. № B10. P. 21859–21882.