

МЕТОД КАТАКЛАСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА РАЗРЫВНЫХ НАРУШЕНИЙ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ СОВРЕМЕННОГО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ В КОРЕ ВБЛИЗИ ГРАНИЦ ПЛИТ И ДЛЯ ВНУТРИПЛИТНЫХ ГОРНО-СКЛАДЧАТЫХ ОРОГЕНОВ

Ю.Л. Ребецкий¹, О.А. Кучай², Н.А. Сычева³

¹ - Институт физики Земли РАН им. О.Ю.Шмидта, Москва

² - Институт нефтяной геологии и геофизики СО РАН, Академгородок, Новосибирск

³ - Научная станция РАН «Бишкек», Бишкек, Кыргызстан

ВВЕДЕНИЕ

В монографии [Ребецкий, 2007] был представлен алгоритм метода катакластического анализа (МКА) разрывных нарушений, позволяющее в результате анализа совокупностей механизмов очагов землетрясений получать данные не только об ориентации осей главных напряжений и о значении коэффициента Лоде – Надаи, но и определять относительные значения максимальных касательных напряжений и эффективного всестороннего давления (тектоническое давление, из которого вычтено давление флюида в трещинно-поровом пространстве пород). Нормировка этих компонент тензора напряжений осуществляется на величину внутреннего сцепления горных массивов, которая рассматривается как эффективный параметр, определяющий среднюю прочность массивов в масштабе выполняемой реконструкции напряжений. Определение параметров тектонических напряжений по данным о разрывных нарушениях является одной из главных задач тектонофизики. Данные об ориентации осей главных напряжений позволяют существенно ограничить число вариантов механизмов внешних условий нагружения исследуемых участков земной коры, ответственных за возникновение этих напряжений. Распределение нормированных величин девиаторных напряжений и эффективного всестороннего давления в сейсмо-

фокальной области дает возможность сделать заключение о закономерности напряженного состояния в зоне подготовки сильного землетрясения [Ребецкий, Маринин, 2006], выполнять районирование зон ВОЗ по сейсмической опасности [Ребецкий, 2007]. Данные о самих величинах напряжений, параметрах эффективной прочности коры, распределении в ней флюидного давления следует признать ключевыми, определяющими достоверность выстраиваемых концепций механизмов генерации современных напряжений и геодинамических моделей эволюции литосферы. Развитие методов оценки величин природных напряжений, действующих в земной коре, определение эффективных параметров, характеризующих механические и прочностные свойства массивов горных пород, в ближайшие годы будет наиболее перспективным направлением тектонофизики. В работе более подробно будут представлены алгоритмы третьего и четвертого этапов реконструкции напряжений, выполняемой в рамках МКА, позволяющие оценивать эффективную прочность горных массивов, рассчитывать абсолютные значения напряжений и выделить из эффективного всестороннего давления слагающие его параметры: тектоническое всестороннее давление и давление флюида в трещинно-поровом пространстве пород.

АЛГОРИТМ МЕТОДА КАТАКЛАСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

Первые этапы реконструкции напряжений в МКА. МКА следует рассматривать как развитие хорошо известных методов [Гущенко, 1975; Никитин, Юнга, 1977; Etchecopar, et al., 1981; Angelier, et al., 1982; Гинтов, Исай, 1984; Gephard, Forsyth, 1984; Michael, 1984; Carey-Gailhardis, Mercier, 1987; Lisle, 1987], выполненное с применением положений, вытекающих из теории пластичности и хрупкого разрушения. На первом этапе МКА при определении ориентации главных осей тензора напряжений и значений коэффициента Лоде – Надаи осуществляется подбор из всех возможных напряженных состояний та-

кого, для которого совокупность анализируемых механизмов очагов землетрясений доставляет максимум диссипации энергии, накопленной в упругих деформациях [Ребецкий, 1997, 1999, 2001]. Исходными данными на этом этапе являются сейсмологические данные о механизмах очагов землетрясений. Важнейшим критерием метода, позволяющим осуществлять отбор в пятимерном пространстве (обычное метрическое пространство, время, энергетический масштаб событий) механизмов очагов землетрясений, является требование уменьшения энергии упругих деформаций в результате землетрясения на ис-

комом тензоре напряжений. Этот критерий вместе с максимальным принципом является следствием приложения к совокупности разрывных деформаций критериев теории пластичности.

Подбираемые совокупности землетрясений, удовлетворяющие условию положительности рассеяния упругой энергии, именуется однородными выборками землетрясений. Они служат для определения параметров эллипсоида тензоров напряжений и приращений сейсмоструктурных деформаций (главные оси и вид эллипсоида), нормированных на величину интенсивности сдвига, и характеризуют квазиоднородно деформируемый участок земной коры (домен), которому приписываются результаты расчета напряжений. Создание таких однородных выборок механизмов очагов землетрясений, по данным о которых определяются параметры тензора напряжений, является важнейшим результатом первого этапа. Эти выборки являются основой расчета на втором этапе реконструкции.

После первого этапа МКА мы можем говорить о том, что определяются параметры тензора напряжений σ_{ij} ($i, j = 1, 2, 3$ – индексы координатных осей ортогональной системы, например, географической) с точностью до двух неизвестных характеристик тензора напряжений, инвариантных к выбору системы координат, которыми являются всестороннее давление p и модуль максимального касательного напряжения τ :

$$\sigma_{ij} = \sigma_o \delta_{ij} + \tau \left[(1 - \mu_\sigma) \ell_{1i} \ell_{1j} - (1 + \mu_\sigma) \ell_{3i} \ell_{3j} + \mu_\sigma \delta_{ij} \right], \quad (1)$$

$$\sigma_o = -(p + \tau \mu_\sigma / 3) \delta_{ii} = 1, \quad \delta_{ij} = 0 \text{ при } i \neq j.$$

Здесь ℓ_{ki} – направляющие косинусы главных осей напряжений ($k = 1, 2, 3$) в выбранной системе координат ($i = x, y, z$) и μ_σ – коэффициент Лодде – Надаи ($|\mu_\sigma| \leq 1$), характеризующий вид эллипсоида напряжений, определены после первого этапа реконструкции, а σ_o представляет собой значение нормальных напряжений, действующих на плоскости максимальных касательных напряжений, содержит два неизвестных после первого этапа параметра: p и τ .

После первого этапа реконструкции можно определить редуцированные напряжения $\tilde{\tau}_n, \tilde{\sigma}_{nn}$:

$$\begin{aligned} \tilde{\sigma}_{nn} &= (1 - \mu_\sigma) \ell_{1n}^2 - (1 + \mu_\sigma) \ell_{3n}^2 + \mu_\sigma, \\ \tilde{\tau}_{ns} &= (1 - \mu_\sigma) \ell_{ni} \ell_{sj} - (1 + \mu_\sigma) \ell_{3n} \ell_{3s}. \end{aligned} \quad (2)$$

Значения редуцированных нормальных и касательных напряжений $\tilde{\sigma}_{nn}$ и $\tilde{\tau}_n$, действующих на плоскости разрыва, порождающего землетрясения, определяют положения точек на редуцированной диаграмме Мора (рис. 1), которая может быть получена путем нормировки девиаторных компонент тензора напряжений на τ и вычитания из нормальных напряжений величины, отвечающей нормальным напряжениям (σ_o) на площадках действия максимальных касательных напряжений:

$$\sigma_{nn} = \sigma_o + \tau \tilde{\sigma}_{nn}; \quad \tau_{ns} = \tau \tilde{\tau}_{ns}. \quad (3)$$

Здесь n – индекс нормали к одной из нодальных плоскостей, которая реализована в виде очага землетрясения, s – индекс вектора, лежащего в плоскости разрыва и определяющего направление действия касательного напряжения.

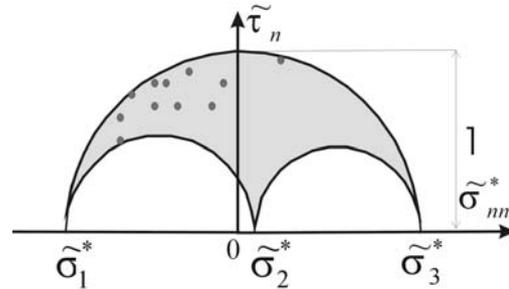


Рис. 1. Редуцированная диаграмма Мора. Точки определяют редуцированные нормальные и касательные напряжения, действующие на плоскости разрыва – в очаге землетрясения из однородной выборки. Одна из точек нижней границы облака точек используется в МКА на втором этапе для определения относительных величин напряжения

На втором этапе реконструкции [Ребецкий, 2003, 2005] для определения всестороннего давления и максимальных касательных напряжений алгоритм МКА в качестве дополнительного положения использует результаты по разрушению образцов горных пород [Byerlee, 1978]. Анализ этих результатов позволяет выделить на диаграмме Мора полосу хрупкого разрушения, которая определяет возможные напряженные состояния (рис. 2) как для вновь возникающих разрывов, так и для ранее возникших и вновь активизировавшихся разрывов [Ребецкий, 2007]. Эти состояния заключены между двумя характерными кривыми на диаграмме Мора, которыми являются внешняя предельная огибающая (предел прочности) и линия минимального сопротивления статического трения:

$$\tau_n + k_f \sigma_{nn}^* = \tau_f; \quad \tau_n + k_s \sigma_{nn}^* = 0,$$

$$\text{при } \sigma_{nn}^* \leq 0 \text{ и } \tau_n \geq 0. \quad (4)$$

Здесь $k_f(\sigma_{nn}^*)$ и $\tau_f(\sigma_{nn}^*)$ – соответственно коэффициент внутреннего трения и прочность внутреннего сцепления, являющиеся функциями эффективного нормального к разрыву напряжения σ_{nn}^* , а k_s – поверхностное статическое трение. В выражении (2) эффективное нормальное напряжение учитывает в соответствии с законом К.Терцаги [1961] влияние на хрупкое разрушение флюидного давления p_{fl} , возникающего в трещинно-поровом пространстве ($\sigma_{nn}^* = \sigma_{nn} - p_{fl}$).

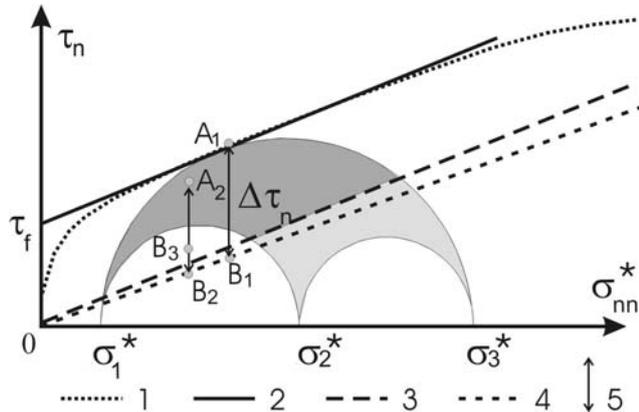


Рис. 2. Геометрический анализ на диаграмме Мора напряжений, сбрасываемых в очаге землетрясения. 1 – вид предельно криволинейной огибающей для массива горных пород масштабного уровня, отвечающего масштабу параметров напряжений, реконструируемых с помощью МКА; 2 – линейная аппроксимация предельной криволинейной 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, область светло-серой заливки – остальные напряженные состояния на произвольно ориентированных плоскостях; 5 – величина сброшенных касательных напряжений

В МКА вводится аппроксимация предельной огибающей (см. рис. 2) прямой линией, параллельной линии поверхностного статического трения ($k_s = k_f = const$). Эта аппроксимация в дальнейшем позволяет на основе анализа разброса точек на редуцированной диаграмме Мора (см. рис. 1), характеризующих редуцированные напряжения в очагах землетрясений из однородных выборок, находить значения относительных величин максимальных касательных напряжений τ/τ_f и эффективного всестороннего давления p^*/τ_f ($p^* = p - p_{fl}$), определяемых с точностью до неизвестного значения эффективного внутреннего сцепления породного массива τ_f

[Ребецкий, 2005]. В дальнейшем определенные на втором этапе относительные значения максимальных касательных напряжений и эффективного давления будут представлены в треугольных скобках ($\langle \tau/\tau_f \rangle$, $\langle p^*/\tau_f \rangle$).

Следует отметить, что получаемые в результате реконструкции данные о параметрах напряженно-деформированного состояния являются осредненными с масштабами осреднения, зависящими от магнитудного уровня данных о механизмах очагов землетрясений и от плотности распределения сейсмических событий.

Третий этап МКА, определение эффективного сцепления горных массивов. Дальнейшее развитие МКА связано с созданием алгоритма оценки эффективного внутреннего сцепления τ_f горных массивов. Из экспериментов по хрупкому разрушению образцов горных пород известно, что наиболее прочные породы коры обладают прочностью внутреннего сцепления не более 100 МПа. Укрупнение образцов приводит к снижению прочности внутреннего сцепления. В законе Байерли [Byerlee, 1978], определяющем прочностные характеристики совокупности трещиноватых образцов, величина внутреннего сцепления на участке относительно высокого уровня бокового обжима принимается равной 50 МПа (500 бар). Можно ожидать, что значения эффективной прочности внутреннего сцепления массивов пород будут еще меньше для масштабов осреднения в сотни метров – десятки километров, т.е. для тех масштабов, которым отвечают напряжения, получаемые по данным о механизмах очагов землетрясений в магнитудном диапазоне от 0 до 7.

Первоначально [Ребецкий, 2003, 2007] в МКА оценка τ_f осуществлялась на основе подбора такого его значения, при котором основные параметры задачи удовлетворяли физическому смыслу. В новой модификации МКА алгоритм оценки величины τ_f строится на привлечении в качестве дополнительной информации сейсмологических данных о величине напряжений, снимаемых в очаге сильного землетрясения (впервые это было сделано в работе [Ребецкий, Маринин, 2006]), произошедшего в регионе, для которого выполнены первые два этапа расчета. При этом необходимо, чтобы данные о напряженном состоянии, полученные после первых этапов МКА, относились к периоду времени, максимально приближенному ко времени сильного события, а магнитуда этого землетрясения должна превышать магнитуды землетрясений, участвовавшие в определении параметров тензора на-

пряжений. Важно, чтобы характерный линейный размер очага был не меньше характерного линейного размера, определяющего масштаб осреднения параметров напряжений, получаемых в результате реконструкции.

Алгоритм расчета связан с возможностью после первых двух этапов МКА рассчитывать с точностью до нормировки на неизвестную величину τ_f касательные напряжения $\Delta\tau_n$, снимаемые вдоль произвольно ориентированной плоскости разрыва (см. рис. 2):

$$\langle \Delta\tau_n / \tau_f \rangle = \tilde{\tau}_n \langle \tau / \tau_f \rangle + k_k \left(\tilde{\sigma}_{nn} \langle \tau / \tau_f \rangle - \langle \sigma_o^* / \tau_f \rangle \right). \quad (5)$$

Здесь $k_k < k_s$ – коэффициент поверхностного кинематического трения. В правой части выражения (5) параметры, заключенные в треугольных скобках, определяются после второго этапа реконструкции.

Алгоритм оценки $\langle \Delta\tau_n / \tau_f \rangle$ с помощью выражения (5) иллюстрирует рис. 2, 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 [Райс, 1982; Осокина, Фридман, 1987] факте неизменности нормальных напряжений на плоскости разрыва 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 ($\tau_n^1 = -k_k \sigma_n^*$).

Используя данные первых двух этапов МКА и рассчитав из выражения (5) относительную величину $\langle \Delta\tau_n / \tau_f \rangle$, можно переходить к оценке τ_f . Для этого в качестве дополнительных данных следует использовать значение напряжений $\Delta\tau_n$, снятых при сильном землетрясении:

$$\tau_f = \Delta\tau_n \langle \Delta\tau_n / \tau_f \rangle^{-1}, \quad (6)$$

в котором величина $\Delta\tau_n$ определяется по сейсмологическим данным [Костров, 1975]:

$$\Delta\tau_n = 2\mu E_s / M_o. \quad (7)$$

Расчет $\Delta\tau_n$ осуществляется по данным об энергии, излученной в упругих волнах E_s , о сейсмическом моменте M_o и модуле сдвига μ (для коры $\mu \approx 3-5 \cdot 10^{10}$ МПа). Этот набор данных, как и данные о реализованной при землетрясении плоскости разрыва, даются сейсмологами для сильных землетрясений ($M > 6.5-8$). Значение E_s и M_o можно получить, используя их зависимости от разных типов магнитуд землетрясения, например:

$$\begin{aligned} M_w &= 2/3 \cdot (\log M_o - 9.1), \\ M_e &= 2/3 \cdot \log E_s - 2.9, \end{aligned} \quad (8)$$

где величины E_s и M_o представлены в Н м (Дж).

Важно также отметить, что параметры напряжений, подставляемые в выражение (2), должны отвечать периоду осреднения, предшествовавшему сильному землетрясению, данные о сбрасываемых напряжениях которого будут использоваться для определения τ_f . Например, использование каталога механизмов очагов землетрясений с диапазоном магнитуд от 4.5 до 7 позволяет говорить о том, что реконструированные параметры тензора напряжений отвечают масштабу осреднения 30-100 км (конкретное значение зависит от плотности распределения эпицентров землетрясений), а диапазон магнитуд от 2.5 до 6 – масштабу осреднения 5-20 км. Для указанных случаев землетрясение, данные о сбрасываемых напряжениях которого используются для оценки внутреннего сцепления, должно иметь магнитуду не менее 7.5 и 6.5 соответственно, т.е. область очага должна быть не меньше окна осреднения напряжений.

Если в регионе, для которого выполнены первые два этапа реконструкция напряжений по МКА, произошло сильное землетрясение и для него из сейсмологических данных известна величина сброшенных напряжений, то рассчитав для этого землетрясения согласно выражению (5) относительную величину $\langle \Delta\tau_n / \tau_f \rangle$, можно оценить значение эффективной прочности породного массива τ_f . После оценки τ_f можно рассчитать абсолютные значения максимальных касательных напряжений τ и эффективного всесто-

ронного давления p^* , используя результаты расчетов второго этапа, т.е. данные $\langle \tau / \tau_f \rangle$ и $\langle p^* / \tau_f \rangle$.

Четвертый этап МКА, определение тектонического давления. Алгоритм третьего этапа МКА позволяет получить данные о величине эффективного всестороннего давления p^* и о компонентах девиатора напряжений s_{ij} ($i, j = x, y, z$):

$$s_{ii} = \sigma_{ii} - p = (\tilde{\sigma}_{ii} - \mu_{\sigma} / 3) \tau,$$

$$s_{ij} = \sigma_{ij} = \tau \tilde{\sigma}_{ij} \quad (i \neq j). \quad (9)$$

Эти данные однако не дают возможности вычислить такие компоненты полного тензора напряжения, как нормальные напряжения σ_{ii} и тектоническое давление p . Для расчета этих характеристик напряженного состояния необходимо ввести дополнительное положение и привлечь дополнительные данные. В предыдущих работах в МКА в качестве такого дополнительного положения использовалось предположение,

часто применяемое в геодинамике [Sibson, 1974], которое определяет величину нормальных напряжений, действующих на горизонтальных площадках (σ_{zz}), равными весу вышележащего столба пород. Это допущение требует учета рельефа поверхности при оценке напряжений, средних для коры в целом (масштаб осреднения в первые десятки километров), и рельефа внутренних слоев коры при осреднении с меньшим линейным масштабом. В работе [Ребецкий, 2007] было предложено в алгоритме МКА использовать более точное выражение, учитывающее при расчете вертикального напряжения влияние касательных напряжений, действующих на вертикальных площадках и, если это необходимо, то и кривизну коры. Это выражение можно получить применяя в уравнении сохранения вертикального импульса сил некоторые положения теории толстой полой оболочкой [Тимошенко, Гудьер, 1975]. В этом случае на уровне срединной поверхности коры получим следующее выражение для расчета тектонического давления:

$$p = \frac{p_{lt} + s_{zz} + 0.5(ds_{xz} + ds_{yz})}{1 - 0.5\bar{H}_{\bar{n}}(\kappa_{xx} + \kappa_{yy})}. \quad (10)$$

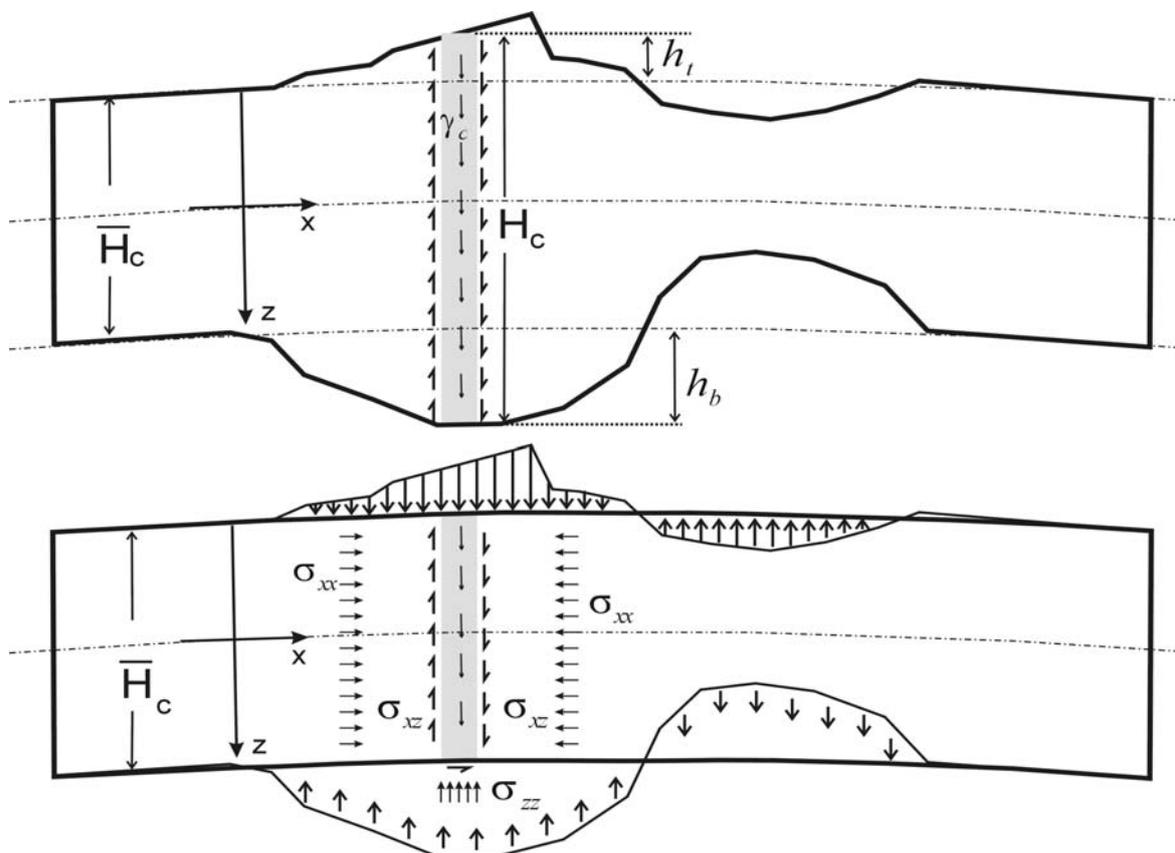


Рис. 3. Схема, иллюстрирующая приближение коры, имеющей рельеф кровли и подошвы (а), полой оболочкой (б), и внутренние и внешние напряжения и нагрузки, учитываемые при расчете величины всестороннего тектонического давления

Здесь s_{zz} – вертикальные девиаторные напряжения, определенные по результатам первых этапов реконструкции? ds_{xz} , ds_{yz} – определяют изменения в латеральном направлении касательных напряжений, действующих на горизонтальных площадках (шаг для расчета приращений отвечает линейному масштабу осреднения напряжений), K_{xx} , K_{yy} – кривизны коры в соответствующих направлениях, а p_{li} определяет литостатическое давление – вес столба горных пород, определенный на глубине срединной поверхности коры мощностью \bar{H}_c , определенной путем осреднения по площади всего исследуемо-

го региона истинных значений мощности коры H_c (см. рис. 3). В выражении (10) учитывается рельеф поверхности коры h_i , осредненный по латерали с тем же окном осреднения, что и данные о параметрах напряжений. В случае расчета всестороннего давления для участков океанической коры необходимо учитывать вес столба воды ($\gamma_w \approx 1 \text{ \AA} / \tilde{n}i^3$ – удельный вес воды) от океанического дна до поверхности.

После расчета тектонического давления из выражения (10), далее осуществляется оценка флюидного давления по данным об эффективном давлении, полученном после третьего этапа реконструкции напряжений.

РАСЧЕТ СОВРЕМЕННЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ЗЕМНОЙ КОРЕ СЕЙСМОАКТИВНЫХ РЕГИОНОВ

Юго-западный фланг Зондской дуги. Реконструкция напряжений для коры этого участка Зондской сейсмофокальной области выполнялась по сейсмологическим данным о механизмах очагов землетрясений, произошедших до катастрофического Суматра-Андаманского землетрясения (САЗ) 2004 г ($M_w=9.3$). Этот крупный фрагмент Зондской дуги определяют как участок косой субдукции. На рассматриваемом участке Зондской дуги выше экватора океаническая плита имеет очень пологий угол пододвигания под субконтинентальную плиту (около $9-11^\circ$). Вдоль оси желоба очаги землетрясений, предшествовавшие САЗ (см. рис. 4) лежат в основном в земной коре океанической плиты. Активными сейсмогенными структурами континентальной коры являются пулл-апартные разрывные структуры задугового бассейна и два крупнейших правосторонних разрыва: Андамено-Никобарский и Центрально-Суматранский.

С целью изучения напряженного состояния, предшествовавшего САЗ, на основе сейсмологических данных Гарвардского университета был составлен каталог из 220 событий для глубин 0 – 60 км (условная земная кора) с $4.7 < M_b < 6.5$, произошедших с 1971 г по октябрь 2004 г. Магнитудный диапазон используемых механизмов очагов и плотность распределения эпицентров землетрясений определял масштаб осреднения тензора тектонических напряжений в 50 – 100 км. Обработка исходных сейсмологических данных производилась в длиннопериодном режиме реконструкции в узлах сетки $0.5^\circ \times 0.5^\circ$. Выполнение всех процедур формирования однородных выборок механизмов очагов землетрясений удалось завершить для 114 квазиоднородных доменов.

Результатом реконструкции первого этапа являются наборы карт напряженного состояния, определяющие ориентацию главных осей тензо-

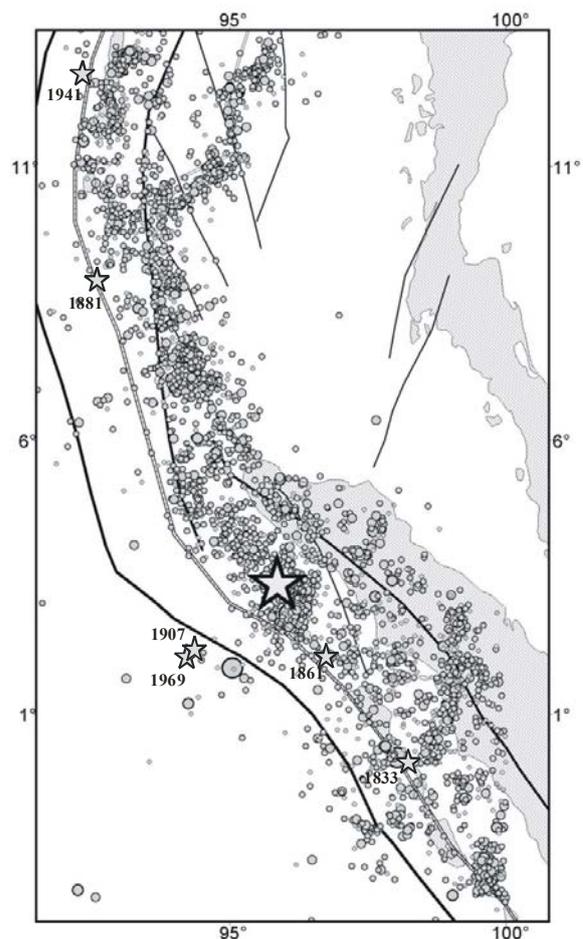


Рис. 4. Распределения эпицентров очагов землетрясений для западного фланга Зондской субдукционной зоны с 1973 по 26.12.2004 (большая звездочка – начало вспарывания САЗ, маленькие звездочки очага других более ранних сильных землетрясений). На схеме указана ось желоба и крупные тектонические разломы

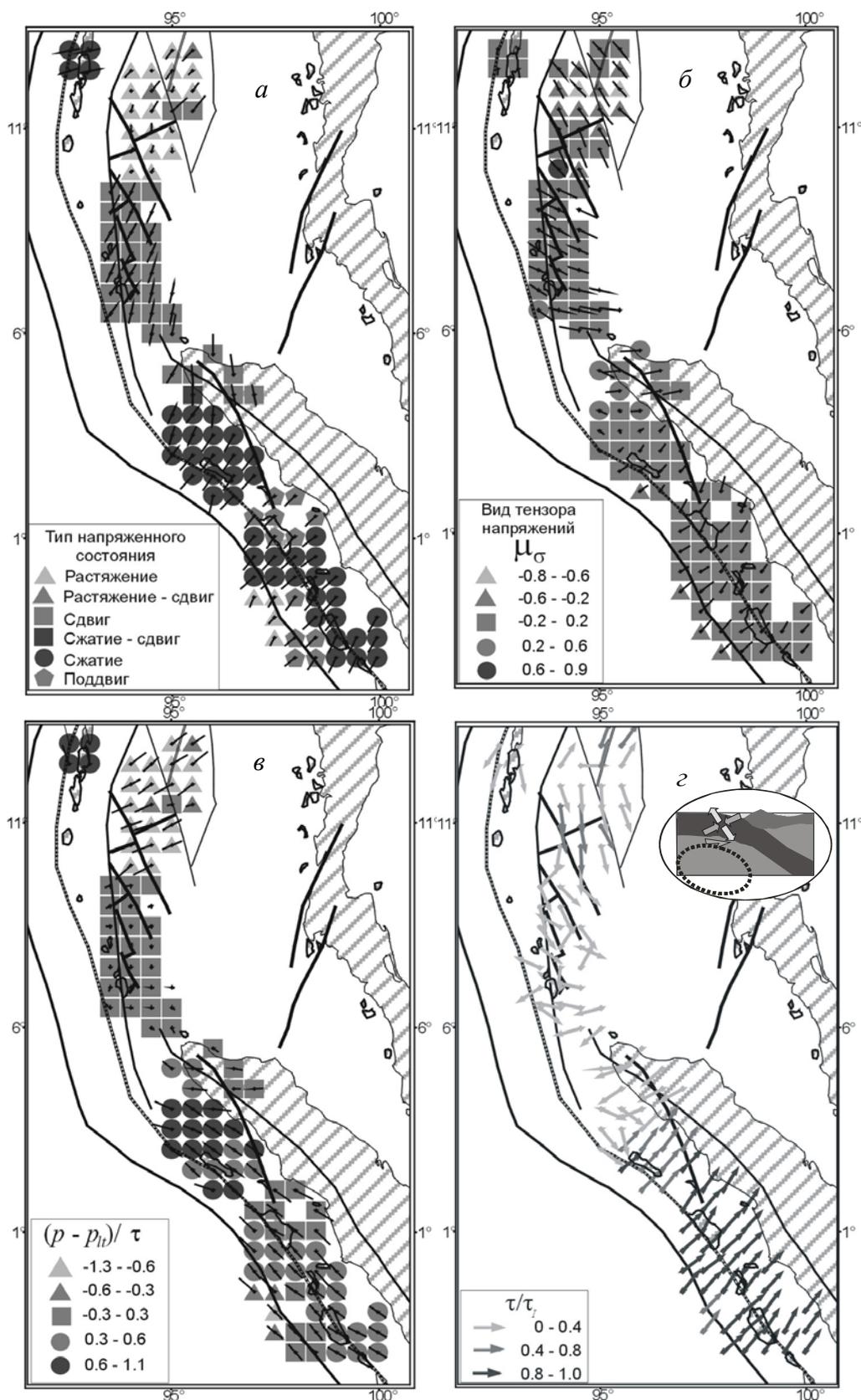


Рис. 5. Ориентация проекций на горизонтальную плоскость осей погружения главных напряжений σ_3 (а), σ_1 (б), σ_2 (в), ориентация и относительные значения поддвиговых касательных напряжений на гор. площадках (г). Тип напряженного состояния (а), коэффициент Лоде – Надаи (б), отношение надлитостатического давления к максимальному касательному напряжению (в). Врезка (г) показывает ориентацию в океанической литосфере главных осей девиаторного сжатия и растяжения при конвекции в верхней мантии

ра напряжений. На рис. 5 показаны проекции на горизонтальную плоскость осей погружения главных напряжений. Здесь, прежде всего, следует отметить, что к юго-востоку от начала “вспарывания” разрыва САЗ проекции осей алгебраически максимальных и минимальных напряжений на горизонтальную плоскость субнормальны, а промежуточного главного напряжения – параллельны к простиранию оси желоба (рис. 5, а, б, в). Здесь оси максимального девиаторного сжатия имеют пологий наклон под океаническую литосферную плиту, а оси максимального девиаторного растяжения круто погружены под континентальную плиту. Это типичная субдукционная обстановка, которой отвечают активные касательные напряжения, действующие на подошву коры со стороны мантии, являющиеся в свою очередь следствием астеносферной конвекции (см. врезку на рис. 5, з). По мере продвижения на северо-запад вдоль западного фланга Бирманской плиты оси напряжений максимального девиаторного сжатия и растяжения становятся субгоризонтальными и ориентируются под углами, близкими к 45° к простиранию желоба. Напряженное состояние этого участка дуги классифицируется как горизонтальный сдвиг. Здесь вертикально ориентированы уже оси промежуточного главного напряжения (рис. 5, в),

а касательные напряжения, действующие на горизонтальных площадках, имеют хаотическую ориентацию и малы по величине (рис. 5, з). Еще севернее, в районе пулл-апартных структур задугового бассейна, оси максимального девиаторного сжатия становятся субвертикальными.

Оценка относительных величин напряжений (второй этап МКА) показала неравномерность распределения в исследуемом регионе величин максимальных касательных напряжений и эффективного всестороннего давления рис. 6, а, б. Здесь существуют обширные участки (в первые сотни километров) с разным уровнем значений этих параметров. Выделим особенно участок пониженного уровня напряжений вблизи северного окончания Суматры, имеющую протяженность 300-350 км. Эта область ограничена с обеих сторон областями более высокого уровня (в 3-4 раза) напряжений. Важно также отметить, что соотношение p^*/τ изменяется в достаточно узком диапазоне от 0.9 до 2.2. Эта взаимосвязь определяется кулоновским соотношением между девиаторными и изотропным напряжениями, используемом в методе катакластического анализа [Ребецкий, 2007] (для данного региона коэффициенты эффективного внутреннего k_f и поверхностного k_s трения принимались равным 0.6).

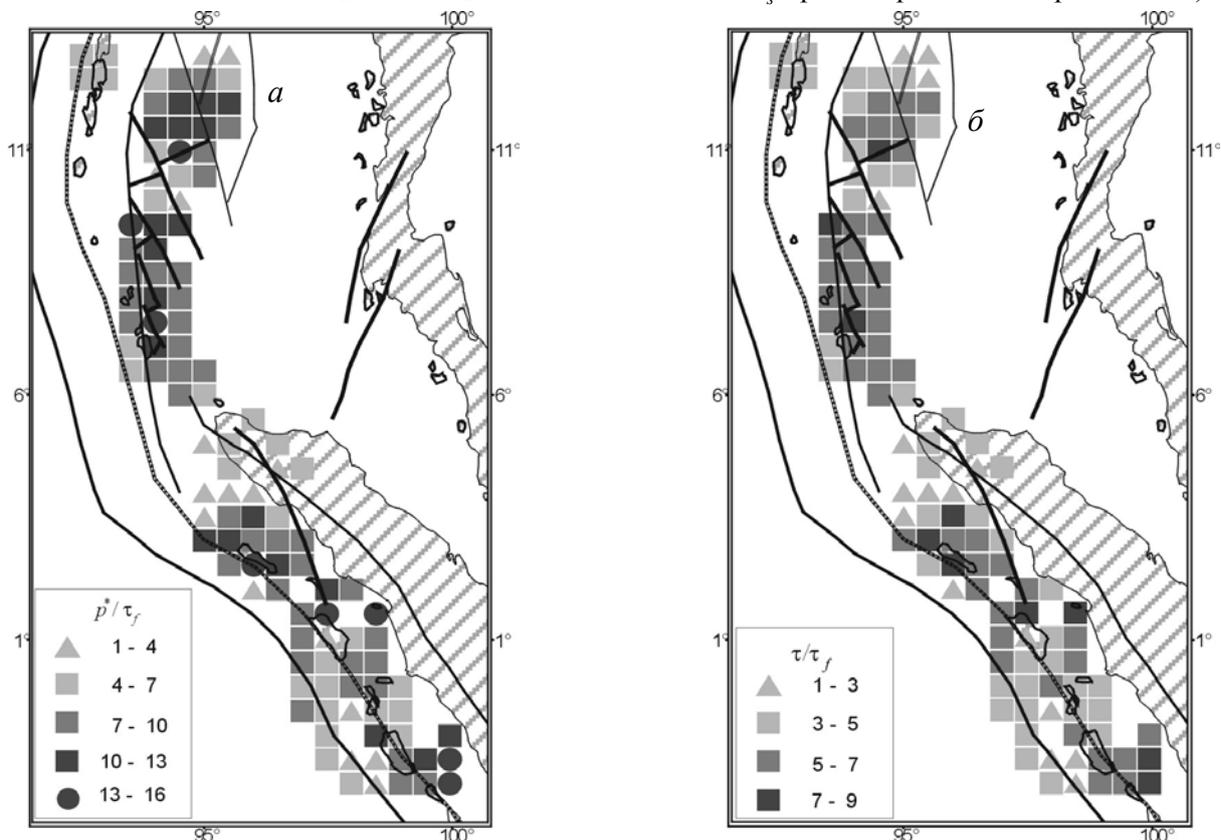


Рис. 6. Результаты второго этапа реконструкции для земной коры. Относительные значения эффективного давления p^*/τ_f (а), максимальных касательных напряжений τ/τ_f (б) и отношение p^*/τ (в)

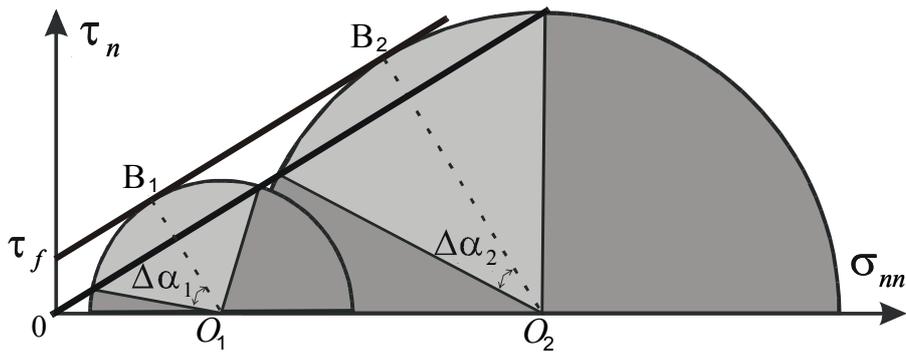


Рис. 7. Диаграмма Мора, иллюстрирующая положение больших кругов Мора для двух напряженных состояний разной интенсивности (направо откладываются отрицательные значения эффективных нормальных напряжений). Две параллельные линии определяют положение максимального предела прочности массивов горных пород (верхняя) и минимального сопротивления сухого трения существующих разломов (нижняя). τ_f – эффективная прочность сцепления горных пород (cohesion). Точки O_i и B_i ($i=1,2$) определяют положение центров кругов Мора и их точки касания линии предела прочности. $\Delta\alpha_i$ – определяет максимальный угол разброса в ориентации площадок активизировавшихся разрывов относительно положения площадки скалывания горных пород (точки B_i)

Таким образом, величины p^* и τ в исследуемом регионе изменяются достаточно коррелированно. Место начала “вспарывания” разрыва САЗ располагалось в области высокого уровня напряжений вблизи ее границы с областью напряжений низкого уровня. Область повышенных значений напряжений имела протяженность 250-300 км. Распространение разрыва было направлено в область пониженного значения эффективного всестороннего давления. Отношение эффективного давления к максимальному касательному напряжению снижается по мере продвижения от начала “вспарывания” разрыва к области пониженных значений напряжений, т.е. в этом направлении всестороннее давление уменьшается быстрее, чем максимальные касательные напряжения.

Заметим, что в соответствии с базовыми положениями метода катакластического анализа в областях повышенной сейсмичности достигается уровень напряженного состояния близкий к предельному. Поэтому области повышенных и пониженных значений напряжений отвечают напряженным состояниям, большие круги Мора которых касаются предельной огибающей на диаграмме Мора в разных ее участках (см. рис. 7).

Результаты реконструкции показывают, что для южного участка дуги также имеются области резкого градиента интенсивности напряжений. Здесь область пониженных значений напряжений менее выражена (200 км) и пространственно связывается с областью сильного землетрясения, произошедшего в 1833 г. Другая область пониженного уровня напряжений имеет протяжен-

ность около 100 км и разделяет область напряжений высокого уровня в задуговом бассейне.

Данные рис. 6 определяют значения относительных величин эффективного всестороннего давления и максимальных касательных напряжений. Для оценки величин тензора напряжений необходимо рассчитать среднее для данного масштабного уровня (эффективное) внутреннее сцепление τ_f . В качестве дополнительного уравнения, обеспечивающего расчет τ_f , использовались данные о напряжениях, снимаемых в очаге САЗ [Ребецкий, Маринин, 2006] $\Delta\tau_n \approx 9$ бар (0.9 МПа). Данные из двенадцати узлов реконструкции напряжений позволили рассчитать из выражений (6) среднюю для этой области величину $\Delta\tau_n / \tau_f$, которая оказалась равной 0.26. Далее используя значение для сброшенных напряжений было получено среднее для области очага значение прочности внутреннего сцепления $\tau_f \approx 35$ бар. Это значение близко к значениям, полученным для афтершоковой области Нордриджского землетрясения [Hardebeck, Hauksson, 2001]. Полученное значение внутреннего сцепления массивов горных пород позволяет оценить величины максимальных касательных напряжений и эффективного давления, которые согласно данным рис. 6 не превосходят соответственно 350 бар и 650 бар.

Северо-западный фланг Тихоокеанской субдукционной области. Другим примером расчета напряжений в коре зон субдукции является участок северо-западного фланга Тихоокеанской

сейсмофокальной области, где в самое последнее время произошло несколько мощных землетрясений: землетрясение Токачи Оки (ТОЗ) с магнитудой $M_w = 8.3$ к юго-востоку от о. Хоккайдо 25.09.2003 на глубине 27 км; Симуширское землетрясение (СЗ) 15.12.2006 с магнитудой $M_w = 8.3$ и глубиной начала распространения очага 28 км. Целью исследований являлось изучение особенности напряженного состояния в областях подготовки сильных землетрясений. В созданный для реконструкции напряжений Курило-Камчатского участка региональный каталог механизмов очагов землетрясений вошли сейсмологические данные, размещенные на Веб-узле Гарвардского университета. В региональный каталог вошли 1220 землетрясений с диапазоном магнитуд более 4.7, произошедшие с 1976 г по июнь 2006 г, на глубинах до 100 км (см. рис. 8).

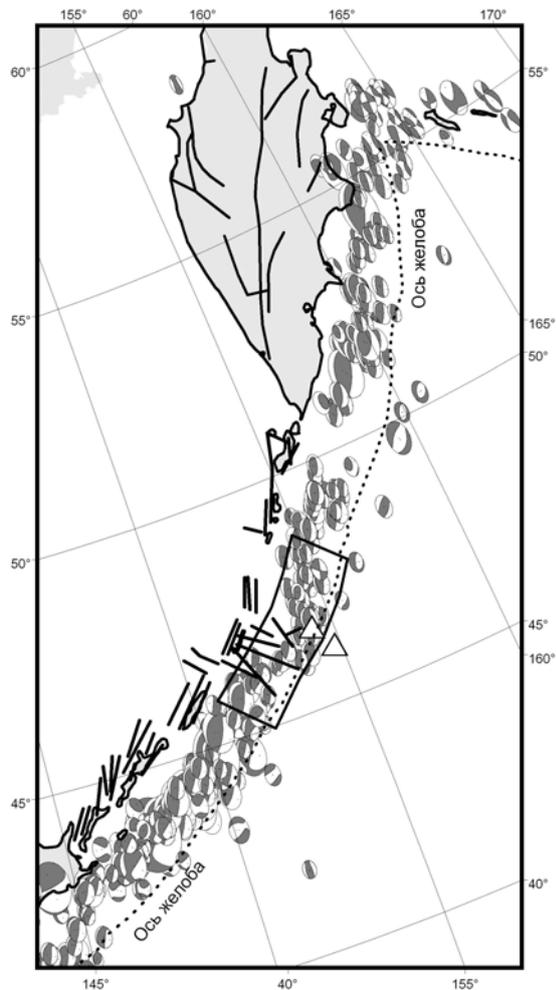


Рис. 8. Главные разрывы и механизмы очагов коровых землетрясений с $M > 5.5$ (треугольники – гипоцентры землетрясений 2006 и 2007)

Следует сказать, что за период наблюдений в регионе было 26 сильных землетрясений с магнитудами более 7, включая Шикотанское землетрясение с $M = 8.26$ (4.10.1994). Магнитудный

диапазон созданного регионального каталога (рис. 8) и плотность распределения эпицентров землетрясений позволяли выполнить реконструкцию параметров напряженного состояния с осреднением 30-50 км. Поскольку более 600 событий произошло на глубине более 30 км, а 250 событий находились на глубинах более 50 км, то реконструкция параметров напряженного состояния выполнялась в узлах сетки $0.2^\circ \times 0.2^\circ$ расположенной на глубинах 20 км, 40 км и 60 км. Выполнение всех процедур формирования однородных выборок механизмов очагов землетрясений (первый этап реконструкции) удалось завершить для соответственно для 778, 835 и 663 квазиоднородных доменов для глубин 20 км, 40 км и 60 км при числе землетрясений в таких выборках не менее шести. Здесь представлены результаты реконструкции для 20 км.

Реконструкция параметров эллипсоида напряжений и приращений сеймотектонических деформаций, выполненная в рамках первого этапа МКА, позволила построить карты ориентации главных осей тензора напряжений, типа тензора напряжений и напряженного состояния. На рис. 9 показаны проекции на горизонтальную плоскость осей алгебраических максимального и минимального из главных напряжений, построенные в направлении их погружения для доменов центры которых располагались на глубине 20 км. Оси алгебраически минимального главного напряжения σ_3 (рис. 9, б) полого погружаются на юго-восток (средний азимут простирания – 135° , средний угол погружения близко к 19°). Погружение этих осей уменьшается с приближением к островной дуге, в отдельных точка здесь имеет место смена погружения. Достаточно резкая смена простирания осей σ_3 имеется в области сопряжения камчатского участка субдукционной области с алеутским сегментом. Оси алгебраически максимального напряжения σ_1 (рис. 9, б) круто погружаются в направлении задугового бассейна. Среднее значение угла погружения 62° . Наблюдаются большие отклонения этих осей от среднего простирания (азимут 290°), чем это имеет место для σ_3 . Особо здесь следует выделить два участка: сопряжение камчатского и алеутского сегментов субдукционных областей и юго-западный вблизи о. Хоккайдо, где оси этих напряжений сменяют свою ориентировку более чем на 45° . Полученная по результатам реконструкции ориентация осей главных напряжений, определяющая: пологое погружение оси максимального сжатия под океаническую плиту, крутое погружение оси минимального сжатия под субконтинентальную и простирание промежу-

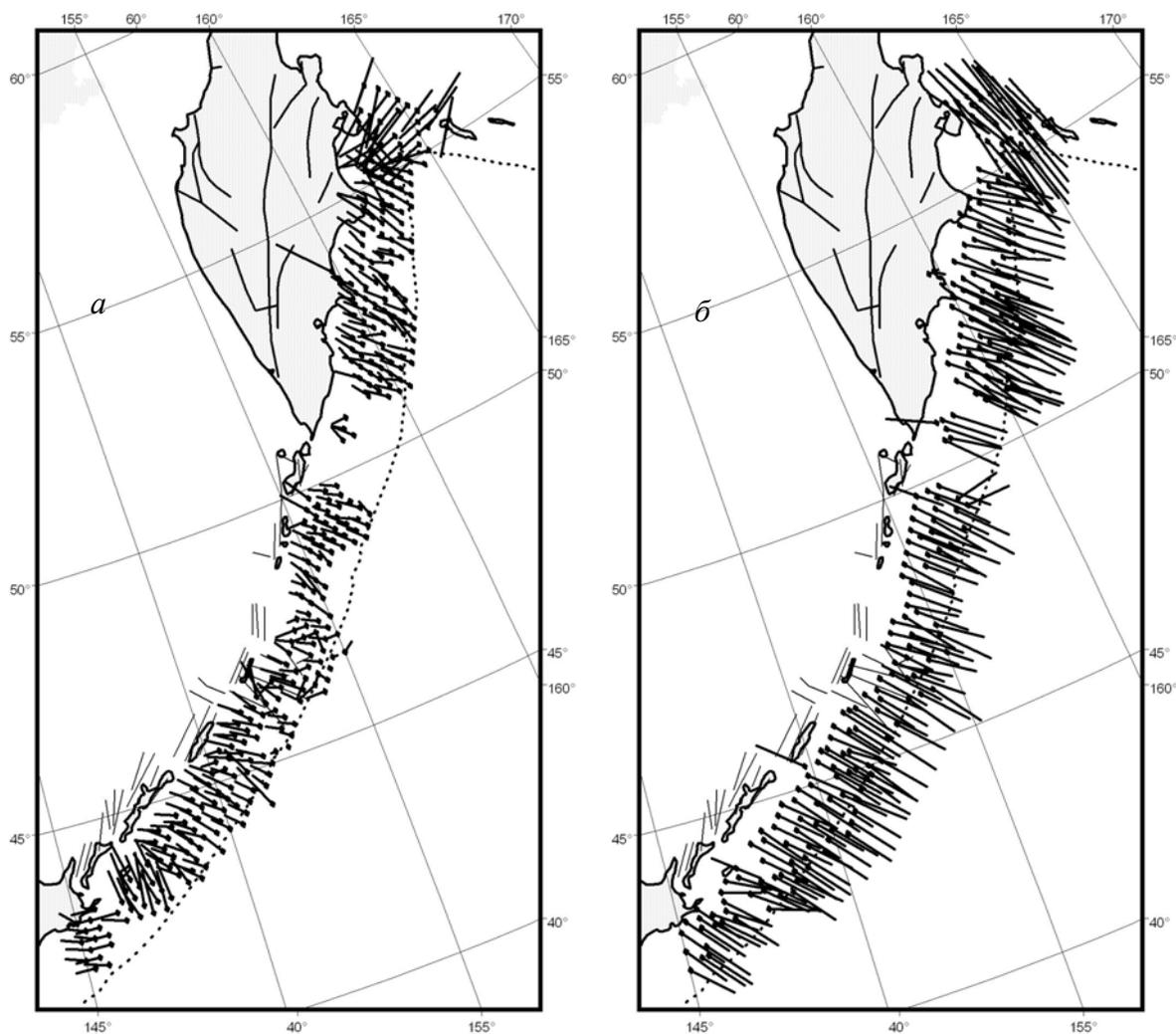


Рис. 9. Проекция на горизонтальную плоскость осей погружения главных напряжений максимального девиаторного растяжения (*а*) и сжатия (*б*)

точного главного напряжения вдоль линеамента океанического желоба является типичной ориентацией главных напряжений в субдукционных областях [Ребецкий, 2007]. Полученная ориентация главных напряжений определяет наличие здесь преимущественного режима горизонтального сжатия (рис. 10, а). Некоторое отклонение от этого режима опять наблюдается в северо-восточном и юго-западном сегментах дуги.

В первом сегменте появляются обширные области режима горизонтального сдвига в обстановке дополнительного сжатия, а во втором – сдвигового режима. Сдвиговый режим также появляется в коре вдоль северного участка побережья Камчатки в месте сочленения Камчатской и Алеутской субдукционных областей. Очень однородным выглядит и распределение характеристики тензора напряжений, определяемой значениями коэффициента Лоде – Надаи.

Практически везде здесь имеет место тензор чистого сдвига, когда алгебраически максимальное и минимальное главные девиаторные напряжения близки друг к другу по абсолютной вели-

чине и противоположны по знаку (промежуточное главное девиаторное напряжение равно нулю).

Отличия от этого типа тензора (эллипсоида напряжений) имеется в ранее указанных юго-западном и северо-восточном концевых участках рассматриваемой области. Указанная выше особенность в устойчивой ориентации осей главных напряжений для субдукционных областей отражается в устойчивой ориентации касательных напряжений, действующих на субгоризонтальных площадках (рис. 8, а).

Эти напряжений для площадок, нормали которых направлены к центру Земли, показывают в каком направлении к коре приложены воздействия со стороны мантии. В рассматриваемой области эти касательные напряжений практически всюду направлены по нормали к желобу. Подобная их ориентация соответствует представлениям о конвективном механизме воздействия мантии на пододвигающуюся океаническую литосферную плиту (рис. 9). Следует особо отметить, что направление действия данных напряжений

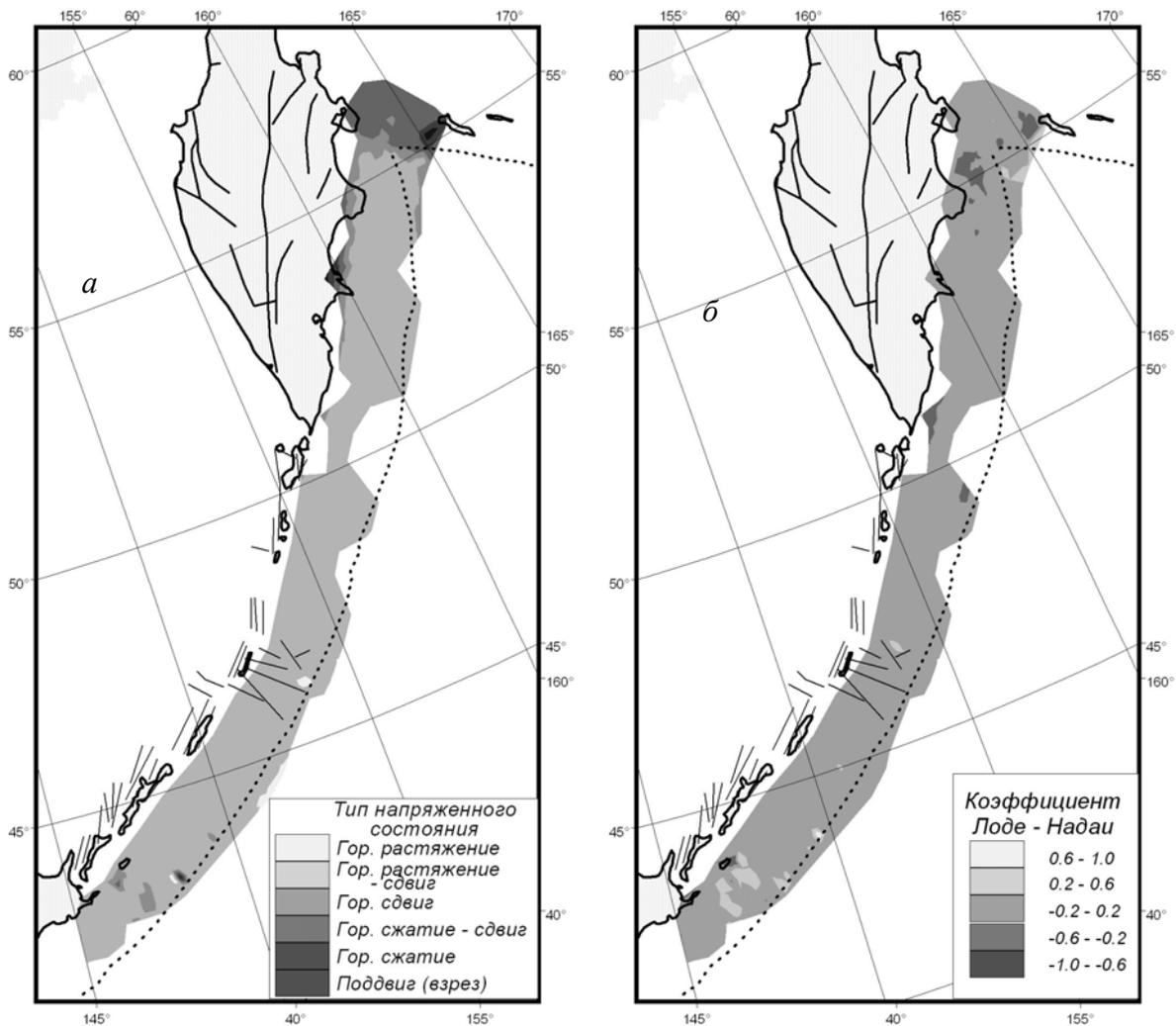


Рис. 10. Районирование по типу напряженного состояния (а) и виду тензора напряжений, определяемого значениями коэффициента Лодэ – Надаи (б)

является наиболее устойчивым даже в сравнении с ориентацией осей напряжений максимального сжатия, что позволяет рассматривать касательные напряжения, действующие на субгоризонтальных площадках в качестве активного воздействия, формирующего весь спектр компонент тензора напряжений в соответствии с особенностями структурного строения исследуемого участка. Созданные для каждого из 778 доменов однородные выборки механизмов очагов землетрясений (глубина 20 км) в соответствии с алгоритмом МКА позволили рассчитать относительные величины эффективного всестороннего давления p^*/τ_f (рис. 11, б) и максимальных касательных напряжений τ^*/τ_f .

Следует отметить, что для исследуемого района наблюдается достаточно мозаичное распределение эффективного всестороннего давления. Наряду с этим имеется несколько крупных участков

(протяженностью 150-250 км), в пределах которых этот параметр относительно постоянен, причем его значения от 4 до 12 отвечают среднему уровню этого параметра. Это области вблизи о. Шикотан, о. Симушир и две области вблизи о. Парамушир, а также северо-восточное окончание исследуемого района вблизи сочленения камчатской и алеутской областей субдукции. Отношение максимальных касательных напряжений и эффективного всестороннего давления τ/p^* в исследуемом районе меняется от 0.5 до 1.7. При этом наибольшие значения соответствуют к наименьшему уровню эффективного всестороннего давления (рис. 11, б).

Для оценки τ_f использовались сейсмологические данные об энергетических параметрах СЗ. По данным, представленным на Веб-узле Гарвардского университета, величина энергии, выделившейся в сейсмических волнах E_s , и сейс-

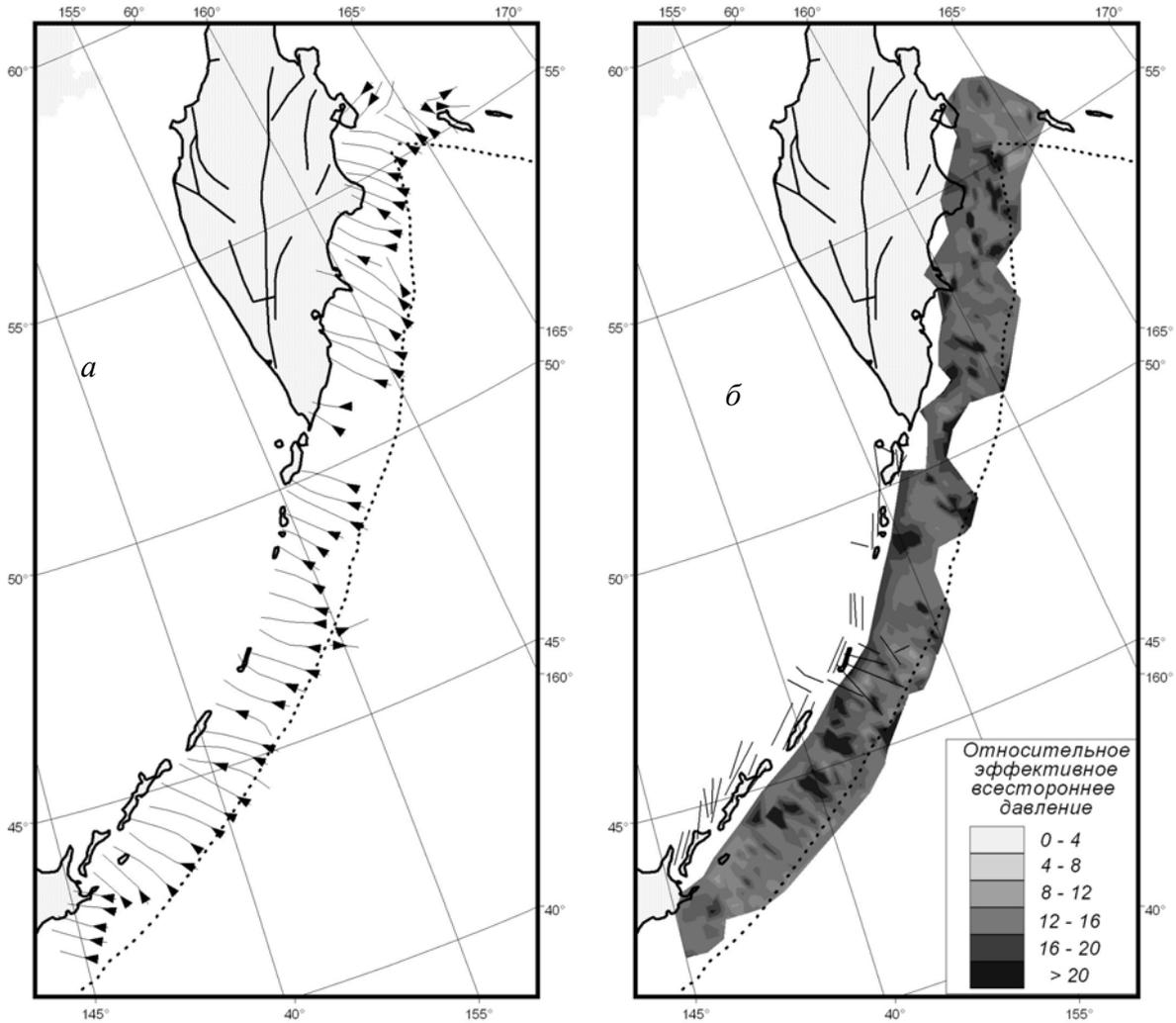


Рис. 11. Направления поддвиговых касательных напряжений (а) и распределение относительного эффективного всестороннего давления p^*/τ_f (б)

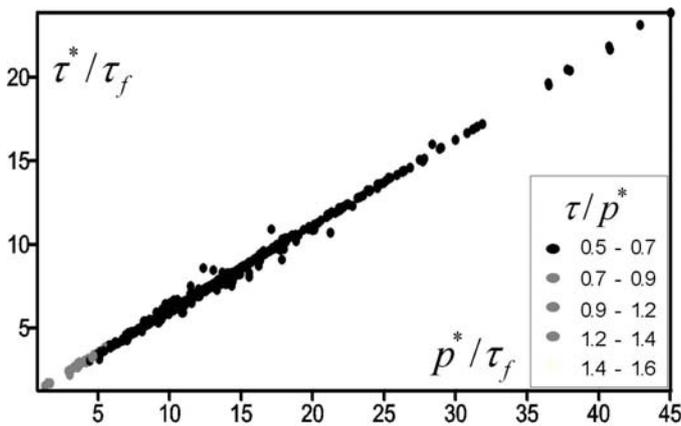


Рис. 12. Соотношение относительной величины эффективного всестороннего давления p^*/τ_f и максимального касательного напряжения τ/ρ^* . Разными оттенками серого цвета показано изменение соотношения τ/ρ^*

мический момент M_o СЗ, были соответственно равны: $7.4 \cdot 10^{16}$ Дж и $3.4 \cdot 10^{21}$ Дж. Используя данные о энергии, выделившейся при СЗ, из выражения (7) находим $\Delta\tau_n \approx 1.7$ МПа (17 бар).

С другой стороны, величину сброшенных напряжений с точностью до нормировки на неизвестное значение эффективного сцепления массивов пород τ_f можно получить, используя ре-

зультаты первых двух этапов реконструкции МКА и выражение (5). Для области очага СЗ существовало 145 доменов, для которых были получены данные о параметрах тензора напряжений (рис. 13). Эти домены покрывают около 85% площади очага и для них была подсчитана относительная величина сбрасываемых напряжений $\Delta\tau_n/\tau_f$.

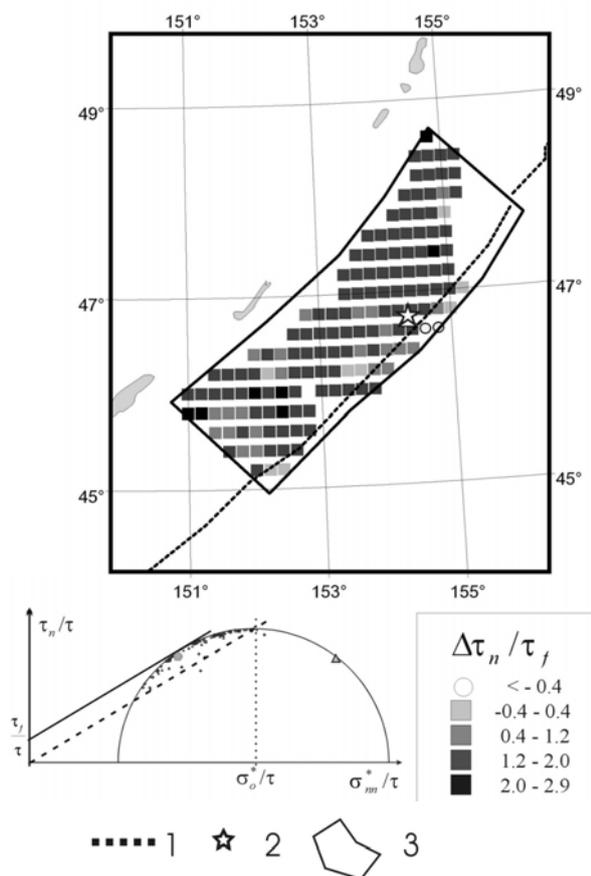


Рис. 13. Распределение $\Delta\tau_n/\tau_f$ для СЗ. На диаграмме Мора показано положение точек со значениями нормальных и касательных напряжений вдоль очагов землетрясения. Сплошная линия – предел эффективной прочности; короткий пунктир – линия минимального «сухого» трения; пятиугольник (очаг) и треугольник (сопряженная нодальная плоскость). 1 – океанический желоб, 2 – начало «вспарывания» очага землетрясения, 3 – площадь очага

Используя данные о напряженном состоянии этих доменов и суммируя вклад в сброшенные напряжения для участка очага в пределах каждого из доменов, на основании выражения (5), находим среднее значение отношения $\langle \Delta\tau_n/\tau_f \rangle = 1.42$. Учет всей площади очага снижает это значение до 1.2. Далее, используя полученное ранее из сейсмологических данных значение сброшенных напряжений, из выражения (6) находим величину эффективного (масштаб осреднения 200-400 км) сцепления $\tau_f = 1.4$ МПа (14 бар).

Расчеты тектонического давления с использованием выражения (10) показали, что для исследуемого региона рельеф меняется от 283 м до – 8161 м, что с учетом веса воды определяло перепады литостатического давления p_{lt} в среднем уровне коры от 7.4 до –139 МПа ($\gamma_c = 2.7 \tilde{A}/\tilde{m}^3$). Вклад в выражение (10) от

приращения касательных напряжений для разных доменов составлял от –10 до 16 МПа, что для расчетной глубины в 20 км отвечало в 2-3% от p_{lt} . С достаточно хорошим приближением можно считать одинаковой кривизну коры в исследуемом регионе, полагая знаменатель в (10) равным 0.98. На рис. 14 представлено распределение значений отношения всестороннего давления к литостатическому давлению p/p_{lt} . Диапазон изменения отношения p/p_{lt} составляет 0.985-1.057 при среднем значении 1.02. Соотношение среднего значения p/p_{lt} к диапазону его изменения составляет около 17%.

На рис. 15 показана взаимосвязь отношения p/p_{lt} со значениями максимального касательного напряжения τ и относительного флюидного давления в трещинно-поровом пространстве

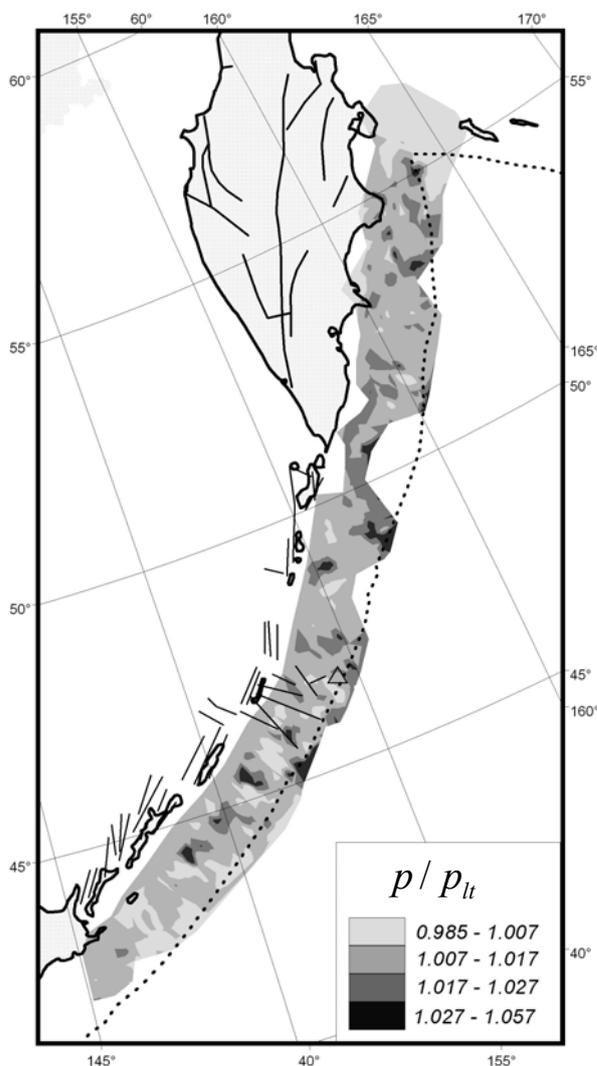


Рис. 14. Распределение относительной величины тектонического p/p_{lt}

p_{fl}/p_{lt} , наблюдаемая в доменах, для которых были рассчитаны параметры напряжений. Для

расчета флюидного давления использовались данные о всестороннем эффективном давлении и давлении в каркасе горных пород ($p_{fl} = p - p^*$). Как видно из рисунка, наблюдаемое соотношение величин позволяет предположить квазилинейное соотношение между τ и p/p_{fl} . Увеличения значений отношения p/p_{fl} сопровождается ростом касательных напряжений на 5-7 МПа. В доменах с близким уровнем отношения p/p_{fl} повышение флюидного давления приводит к снижению уровня касательных напряжений.

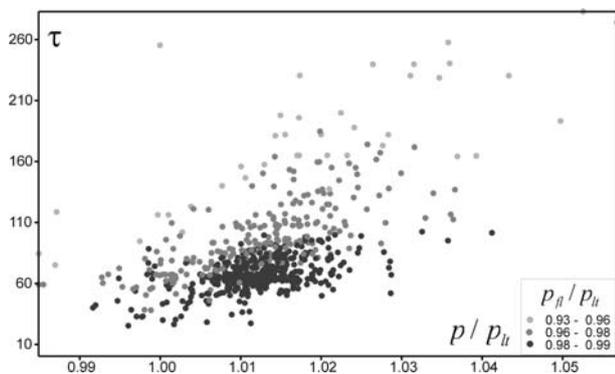


Рис. 15. Взаимосвязь отношения p/p_{fl} со значениями максимального касательного напряжения τ ($\cdot 10^5$ Па) и относительной величиной флюидного давления p_{fl}/p_{li} . Оттенками серого закрашены точки разной величины p_{fl}/p_{li} (наклонный пунктир – тренд значений)

Алтае-Саянская горно-складчатая область. Для реконструкции напряжений использовались решения механизмов очагов сильных землетрясений с 10 по 16 энергетический класс ($M = 3.5-7.3$), произошедших с 1963 по 2003 гг., полученные по записям землетрясений на сейсмических станциях Алтае-Саянской сейсмологической экспедиции, экспедиции при ИЗК СО РАН, Казахской сейсмологической экспедиции, Казахского национального ядерного центра, данные сейсмостанций Монголии, а также материалы о знаках смещений продольных волн, публикуемые в «Сейсмологических бюллетенях» [Жалковский и др., 1995]. В результате проведенных дополнительных сейсмологических исследований ранее полученных сейсмических записей на станциях, расположенных как на территории бывшего СССР, так и Монголии и Китая, был создан региональный каталог механизмов очагов, насчитывающий данные о 308 коровых землетрясениях с магнитудами $M_b = 3.0 - 7.0$, произошедших с 1963 по 2003 гг. Поскольку глубина гипоцентров землетрясений определялась

наименее достоверно, то всем землетрясениям была присвоена единая глубина 15 км.

Обработка исходных сейсмологических данных производилась в длиннопериодном режиме реконструкции МКА в узлах сетки $0.25^\circ \times 0.25^\circ$, расположенной на глубине 15 км. Выполнение всех процедур формирования однородных выборок механизмов очагов землетрясений удалось завершить для 640 квазиоднородных доменов при числе землетрясений в таких выборках не менее шести. Реконструкция параметров эллипсоида напряжений и деформаций, выполненная в рамках первого этапа МКА, позволила построить карты ориентации главных осей тензора напряжений, типа тензора напряжений и напряженного состояния. На рис. 16, а показаны проекции на горизонтальную плоскость осей погружения главных напряжений алгебраически минимального напряжения σ_3 . При этом в северных частях на Катунском Выступе погружение этих осей сменяется на север – северо-западное, а на юге в коре монгольской части Алтая их простирает приобретает восток – юго-восточную ориентацию.

В восточной части Горного Алтая картина ориентации этих осей становится менее устойчивой. Здесь субгоризонтальное положение оси максимального сжатия σ_3 приурочено в основном к горным областям и поднятиям (Катунский и Джебашский антиклинории), а субвертикальное – к котловинам и синклиниям (Тувинская и Убсу-Нурская котловины). Средний угол погружения этих осей составляет 26° . В Центральной зоне Восточного Саян оси максимального сжатия имеют устойчивое субгоризонтальное положение и с севера на юг меняют свое простирает с север – северо-западного на северо-восточное. Южнее в пределах Восточно-Тувинского поднятия и Сангиленского выступа они принимают более крутое погружение в северо-восточном направлении.

На территории Монголии оси максимального сжатия вновь принимают субгоризонтальное положение с простирает с севера на юг. На самом востоке исследуемого региона ориентация этих осей вновь выглядит мозаичной, их ориентация меняется от субширотной до субмеридиональной. К западу от Алтайской горной области, в пределах Зайсанской котловины, ориентация осей максимального сжатия наиболее устойчивая, имеет субгоризонтальное положение с простирает с северо-запада на юго-восток. В Монгольском Алтае с севера на юг наблюдается разворот осей от субмеридионального простирает с небольшим погружением на юг до юго-восточного простирает.

Ориентация осей алгебраически максимального главного напряжения – алгебраически максимального напряжения σ_1 для земной коры центральных областей Горного Алтая в целом суб-

широтная с погружением в диапазоне от западного до запад – юго-западного направления (рис. 16, б). Подобная ориентация этих осей наблюдается и в земной коре Зайсанской котлови-

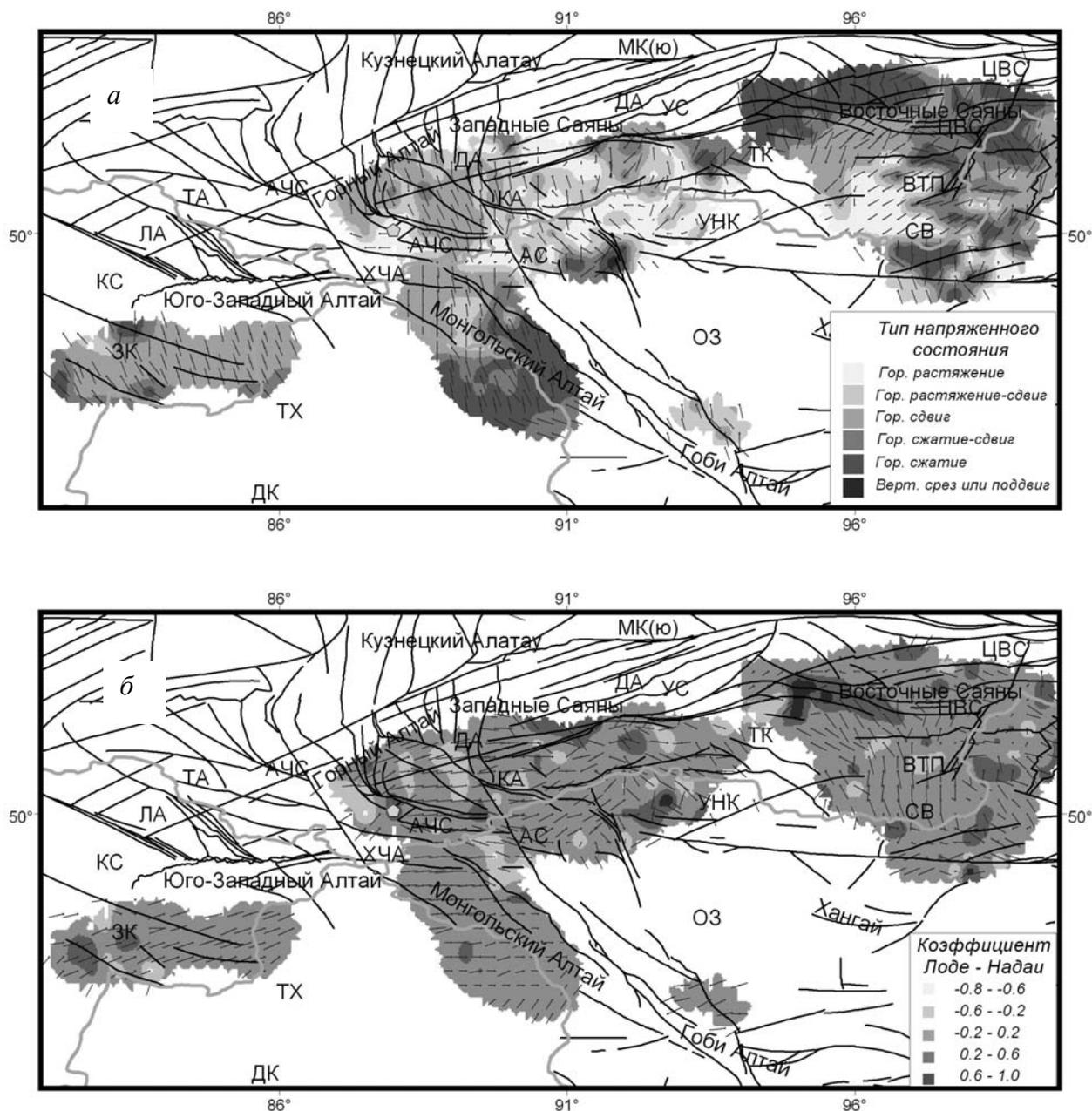


Рис. 16. Параметры режима напряженного состояния и эллипсоида напряжений земной коры Алтая–Саянской сейсмоактивной области: а – ориентация проекций осей погружения максимального девиаторного сжатия и тип напряженного состояния; б – ориентация проекций осей погружения максимального девиаторного растяжения и тип тензора напряжений. Пятиугольник – начало вспарывания очага Чуйского землетрясения 27.9.2003 ($M_w=7.3$). АС – Антиклинорий Салаира; АЧС – Ануйско-Чуйский синклиний; АП – Ачитнурский прогиб; БХ – Барунхурайский прогиб; ДА – Джебашская зона (антиклинорий); ДК – Джунгарская котловина; ЗК – Зайсанская впадина (котловина); КА – антиклинорий Кузнецкого Алатау; КВ – Катунский выступ (антиклинорий); КС – Калбинская зона (синклиний); МА – Монголо-Алтайская складчатая область; ОЗ – Озерная зона; РА – Зона Рудного Алтая; СВ – Сангиленский выступ Тувино-Северомонгольского массива; ТК – Тувинская впадина (котловина); ТСЗ – Таннуольская салаирская зона; КУН – Убсу-Нурская впадина (котловина); ХСП – Хемчик-Систигхемский прогиб; ХЧА – Холзунско-Чуйский антиклинорий; ЧА – Чулымшанский антиклинорий; ЧЗ – Чарская зона; ЧС – Чарышский синклиний; ЦВС – Центральная зона Восточных Саян

ны. В Западных Саян и в пределах котловины Убсу-Нур ориентация этих осей становится более хаотичной, появляются мозаики из групп доменов северо-восточной и северо-западной ориентации. В восточной части Тувинской котловины и в Восточных Саян преимущество получает субмеридиональная и юго-восточная направления действия этих осей. Обширные области с крутым погружением осей максимального девиаторного растяжения наблюдаются в районе Годжинской впадины, в восточной части Сангиленского выступа, а также для центральных участков Монгольского Алтая. На территории Монголии оси максимального сжатия вновь принимают субгоризонтальное положение с простираем с севера на юг. На самом востоке исследуемого региона ориентация этих осей вновь выглядит мозаичной, их ориентация меняется от субширотной до субмеридиональной К западу от Алтайской горной области, в пределах Зайсанской котловины, ориентация осей максимального

сжатия наиболее устойчивая, имеет субгоризонтальное положение с простираем с северо-запада на юго-восток. В Монгольском Алтае с севера на юг наблюдается разворот осей от субмеридионального простираем с небольшим погружением на юг до юго-восточного простираем.

На рис. 17 представлены диаграммы, определяющие число доменов с различными азимутами и углами погружения двух главных напряжений. Видно, что азимут осей погружения главного сжимающего напряжения имеет преимущество для юг – юго-восточного ($150\text{--}180^\circ$) направления (Монгольский Алтай). Азимут осей погружения главного растягивающего напряжения имеет преимущество для восток – юго-восточного направления ($90\text{--}120^\circ$), например Зайсанская котловина и Монгольский Алтай и запад – юго-западного направления ($240\text{--}270^\circ$) участки Восточных Саян. Однако следует заметить, что другие азимутальные направления погружения этих

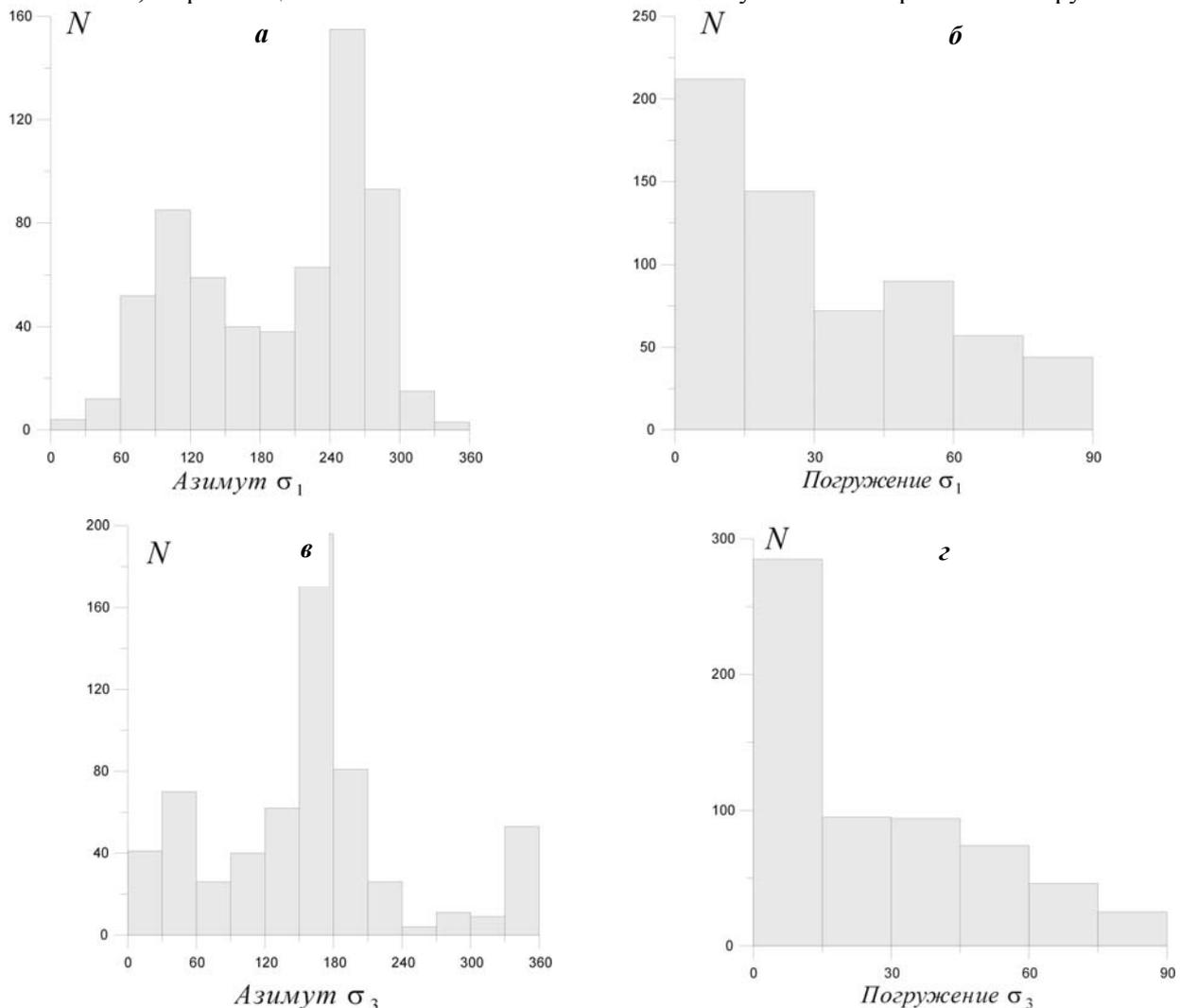


Рис. 17. Диаграммы распределения числа доменов с различными значениями азимутов (а), (в) и углов погружения (б), (г) для осей алгебраически максимального (а), (б) и алгебраически минимального (в), (г) главных напряжений

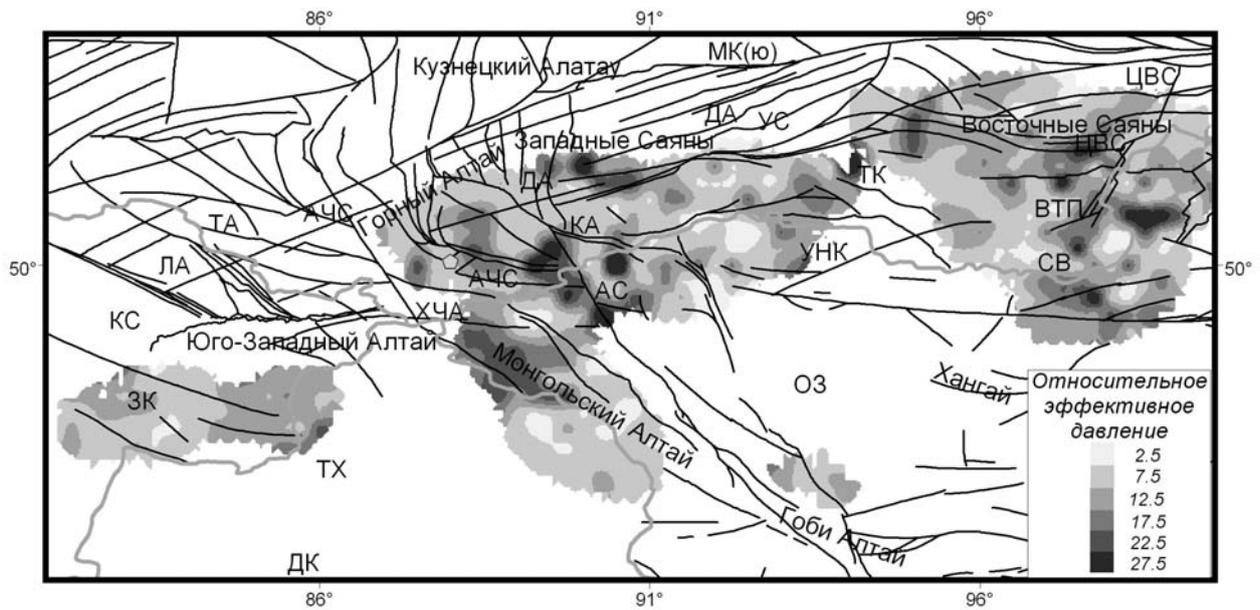


Рис. 19. Распределение относительных значений эффективного давления p^* / τ_f (звездочки – гипоцентры землетрясений с $M_b > 6$)

осей также достаточно представительны.

На рис. 18 представлено распределение в земной коре исследуемого региона отношения p^* / τ в виде стандартных отклонений от среднего значения (0.565), полученного по результатам второго этапа реконструкции. Для исследуемого региона все изменения этого параметра лежат в диапазоне от 0.45 до 1.58. Мощная область, где это отношение имеет повышенные значения более чем два стандартных отклонения, расположена в пределах Убсу-Нурской котловины. Все остальные области с отклонением подобной величины связаны с данными одного домена реконструкции и поэтому не могут приниматься как достаточно достоверные.

Относительные величины максимальных касательных напряжений распределены подобно эффективному давлению. Там, где наблюдаются повышенные значения p^* / τ_f (рис. 19), существуют и повышенные значения τ / τ_f . В областях пониженных значений p^* / τ_f , пониженные значения имеют и τ / τ_f . Подобное распределение связано с имеющимся в рамках МКА предположением о близости напряженного состояния к предельному в областях повышенного сейсмического режима. Поскольку для горных пород предельное состояние определяется соотношением Кулона-Мора, связывающим между собой компоненты шарового тензора напряжений и диватора напряжений [Ребецкий, 2003] (нормальные и касательные напряжения на плоскости хрупко-

го разрыва), то следствием этого является взаимосвязь значений эффективного давления и максимальных касательных напряжений (рис. 20). Отметим, что здесь, так же как и для сейсмоактивных областей вблизи границ океанических плит, сильные землетрясения наблюдаются в доменах, с невысоким уровнем эффективного всестороннего сжатия и максимальных касательных напряжений. Для оценки величин напряжений исследуемого региона на третьем этапе реконструкции мы использовали данные Гарвардского Университета о сейсмическом моменте и излученной энергии

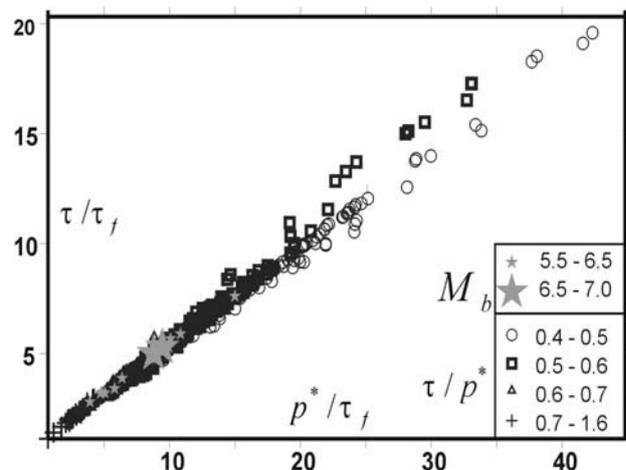


Рис. 20. Соотношение нормированных величин максимальных касательных напряжений и эффективного давления в доменах расчета напряжений. Различным типом символов выделены домены разных диапазонов отношения τ / p^* . Звездочками отмечены домены, где произошли землетрясения с магнитудами больше 5.5

для Чуйского землетрясения (ЧЗ) 27.9.2003 $M_w = 7.3$, представленные в сети Интернет, согласно которым: $M_o = 10^{20}$ Нм ($M_w = 7.3$), $E_s = 4.8 \cdot 10^{15}$ Нм. Используя эти данные, из выражения (7) находим, что снимаемые напряжения $\Delta\tau_n$ для ЧЗ составляли около 4 МПа (40 бар). Отметим, что эти значения в точности совпадают с результатами анализа снятых напряжений в работе [Тимофеев и др., 2005], где также указывалось, что максимальные смещения в эпицентре ЧЗ достигали 2 м. Для оценки относительной величины $\{\Delta\tau_n / \tau_f\}$ были рассчитаны данные о параметрах напряжений 5-ти квазиоднородных доменов, расположенных вблизи очага ЧЗ (см. таблицу 2).

Согласно сейсмологическим данным механизм

очага ЧЗ в виде двойного диполя представлял собой две нодальные плоскости: Strike1 = 131, Dip1 = 71, Rake1 = 158; Strike2 = 228, Dip2 = 70, Rake2 = 20.

Расчеты, выполненные в соответствии с выражением (7), показали, что алгебраически наибольшее значение снимаемых напряжений доставляет первая нодальная плоскость. В двух последних колонках таблицы 2 представлены относительные величины сброшенных напряжений для двух нодальных плоскостей (индекс n – первая плоскость, индекс s – вторая плоскость). Ее простирание совпадает с простиранием Северо-Чуйского разлома, который, как это дал анализ афтершоковой последовательности [Лескова, Еманов, 2005; Арефьев и др., 2005], и активизировался в процессе землетрясения.

Таблица 2. Параметры напряжений для доменов, ближайших к очагу ЧЗ

№	Долг.	Шир.	σ_1		σ_2		σ_3		μ_σ	$\frac{p^*}{\tau_f}$	$\frac{\tau}{\tau_f}$	$\frac{\Delta\tau_n}{\tau_f}$	$\frac{\Delta\tau_s}{\tau_f}$
			Аз.	Погр.	Аз.	Погр.	Аз.	Погр.					
1	87.25°	50.75°	84	6	184	60	353	29	0.0	7.68	4.33	0.98	0.47
2	87.50°	50.50°	264	0	174	86	354	4	-0.27	7.13	3.93	0.96	0.31
3	87.75°	50.00°	221	27	324	23	90	54	-0.04	6.24	3.66	0.67	-0.89
4	88.00°	50.25°	90	18	188	23	325	60	0.39	7.43	4.47	0.40	-0.19
5	88.25°	49.75°	114	0	204	0	270	90	-0.04	9.19	4.97	-0.56	0.21

Для расчета среднего значения $\{\Delta\tau_n / \tau_f\}$ нами использовались 2, 3 и 4 домены из таблицы 2, поскольку отвечающий им участок соответствовал размеру очага ЧЗ. Среднее значение нормированной величины сброшенных касательных напряжений равно 0.68.

Данные о величине снятых напряжений позволяют определить значение эффективного (среднего для масштаба осреднения 50–70 км) внутреннего сцепления, которое для рассматриваемого участка коры составила 6 МПа (60 бар). Отметим, что полученные значения в 2–4 раза превышают величины внутреннего сцепления, рассчитанные аналогичным образом для земной коры вблизи границ океанических литосферных плит (см. результаты, представленные выше). Возможно, это связано с большей раздробленностью зон субдукции в сравнении с зонами разломов для внутриплитового орогена Алтае-Саян. Нельзя также исключить отличный от внутриплитового тип вещественных преобразований пород, происходящих в зонах разломов субдукционных областей из-за большей их флюидонасыщенности, вызванной затягиванием в глубинные горизонты земной коры осадочных пород. Пересчет напряжений, действующих в земной коре исследуемого региона, из относительных

(рис. 19-20) в абсолютные значения дает для максимальных касательных напряжений τ диапазон изменений от 7 до 120 МПа, а для эффективного давления p^* – от 4.5 до 240 МПа. Этот уровень напряжений также в 3–4 раза превышает соответствующие параметры, полученные для сейсмоактивных областей земной коры вблизи границ океанических литосферных плит [Ребецкий, 2007; Ребецкий, Маринин, 2006]. На рис. 21 представлены диаграммы распределения числа доменов с различным уровнем эффективного давления и максимальных касательных напряжений. Видно, что наиболее представительным является уровень значений изотропного эффективного давления в 20–60 МПа (200–600 бар) и значений максимальных касательных напряжений в 18–30 МПа (180–300 бар). После оценки τ_f имеется возможность выполнить оценку флюидного давления, действующего в трещинно-поровом пространстве, используя для этого известное положение [Sibson, 1974] о близости вертикальных напряжений σ_z весу столба горных пород, равному литостатическому давлению. На рис. 22, а представлено отношение флюидного давления p_f к литостатическому давлению p_H горных пород, рассчитываемому в узлах сетки (глубина)

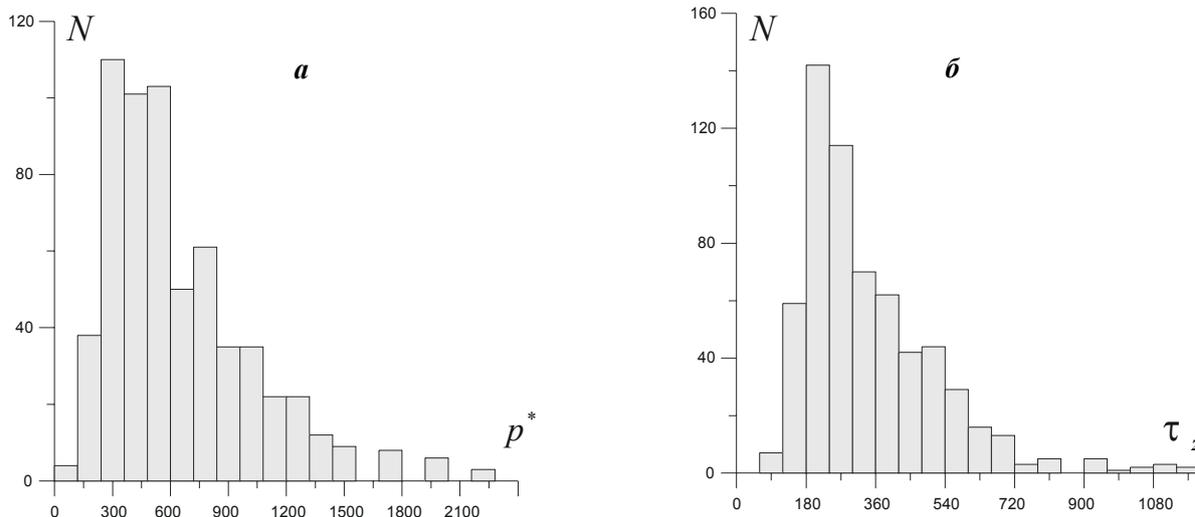


Рис. 21. Диаграммы распределения числа доменов с различными значениями эффективного давления (а) и максимальных касательных напряжений (б) в барах

15 км) с учетом рельефа поверхности. Заметим, что в силу масштаба осреднения флюидное давление является средним для коры в целом. Диапазон изменений отношения p_{fl} / p_{lt} от 0.17 до 1 при среднем значении 0.86. Максимальные его значения (более 0.9) находятся в земной коре Монгольского Алтая, северной части Восточных Саян и в небольших по площади участках Западных Саян и Горного Алтая. В области подготовки ЧЗ, вдоль Курайского и Южно-Чуйского разломов флюидное давление – 0.8-0.9 от литостатики.

Используя данные о флюидном давлении и о значении τ_f можно перейти от относительных значений эффективного давления p^* / τ_f к полному тектоническому давлению $p = p^* + p_{fl}$ и к значению среднего давления, действующего в латеральном направлении $p_h = (3p + H\gamma) / 2$. Этот параметр наиболее адекватно отражает характер передачи внешних горизонтальных деформирующих усилий при их приложении к торцевым границам литосферной плиты. При расчете величин p и p_h мы учитывали топографию поверхности. Отметим, что среднее значение тектонического давления для исследуемого района оказалось равно литостатическому давлению, а весь диапазон изменений отношения p / p_{lt} (см. рис. 22, б) составляет 0.85-1.2. Максимальные его значения находятся в земной коре Восточных Саян, а минимальные в Западных Саянах. Среднее значение тектонического давления p_h , так же как и общее тектоническое давление p , равно литостатическому давлению p_{lt} , а весь диапазон изменений отношения p_h / p_{lt}

составляет 0.77-1.28. Распределение этого параметра подобно распределению относительных значений тектонического давления p_h / p_{lt} (см. рис. 22, б). В области подготовки ЧЗ тектоническое давление p и горизонтальное давление p_h ниже его средних значений. Подобная ситуация обеспечила существование пониженного сопротивления сухого трения на разломах при ЧЗ, что позволило высвободить больше внутренней упругой энергии. Чередование областей повышенного значения p_h / p_{lt} в горных областях и пониженного в котловинах показывает, что современное напряженное состояние земной коры исследуемого района определяется глубинным (коровым или мантийным) тектоническим процессом, но не внешними латеральными условиями нагружения. Если бы напряженное состояние исследуемой территории определялось воздействием со стороны, например, Индийской плиты, то должно наблюдаться либо равномерное по всей территории распределение значений горизонтального давления p_h , либо постепенное его снижение по мере удаления к северу. Рельеф поверхности может приводить к отклонению от этого правила, но в относительных характеристиках, т.е. при использовании отношения p_h / p_{lt} (с учетом топографии), оно должно соблюдаться. При таком нагружении среднее для всей территории значение p_h и p должно быть больше среднего литостатического давления пород. Так для Зондской дуги $p / p_{lt} \approx 1.04$, Курило-Камчатской и Японской зон среднее значение $p / p_{lt} \approx 1.02$. В исследуемом регионе среднее значение $p / p_{lt} \approx 0.995$, т.е. меньше литостатического давления.

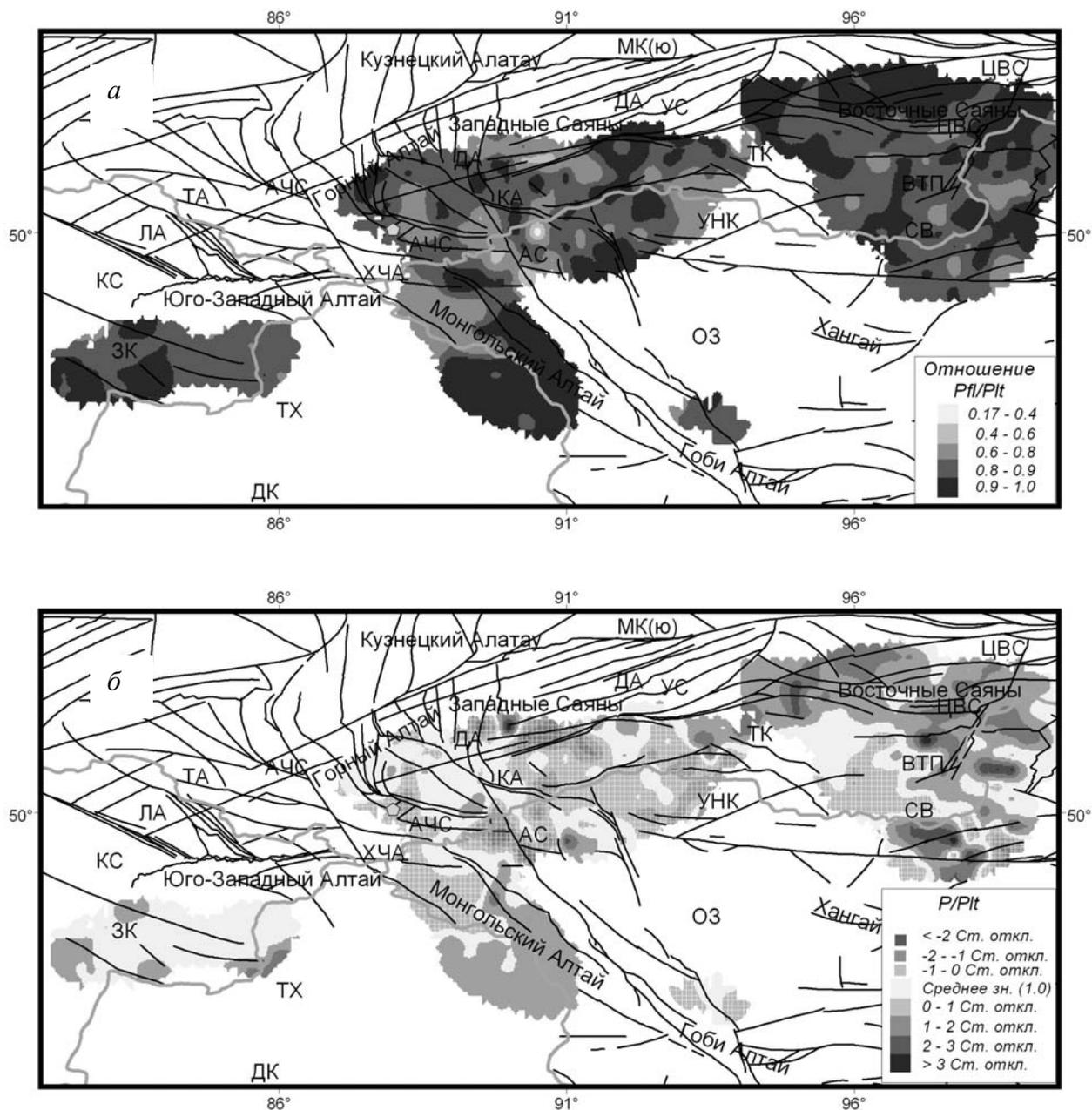


Рис.22. Распределение в земной коре на глубине 15 км отношения флюидного давления (а) и тектонического давления (б) к литостатическому давлению горных пород, рассчитываемому с учетом топографии поверхности

Таким образом, анализ данных рис. 22 фактически позволяет оценить боковое воздействие на кору исследуемого региона. Поскольку среднее значение отношения p/p_{lt} близко к единице, то следствием этого является также и то, что среднее для исследуемого региона значение отношения p_h/p_{lt} также близко к единице. В областях, где p/p_{lt} больше единицы, p_h/p_{lt} также больше единицы.

Если бы напряженное состояние исследуемой территории определялось воздействием со стороны Индийской плиты, то мы должны были бы наблюдать либо более менее равномерное по всей территории распределение значений гори-

зонтального давления p_h/p_{lt} (p/p_{lt}) больших единицы, либо постепенное его снижение по мере удаления к северу при сохранении условия $p_h/p_{lt} > 1$. Быстрое изменение рельефа поверхности может приводить к отклонению от этого правила, но при больших площадях осреднения оно должно соблюдаться.

Как выше уже было сказано наши данные показывают, что среднее значение отношения p/p_{lt} в исследуемом регионе близко к единице. Отклонение среднего значения от литостатики около 1%. Пространственное распределение отношения p/p_{lt} , показанное на рис. 22, б, не дает возможности говорить о каком либо значимом

инденторном влиянии Индостана. К северу это отношение может как резко повышаться (переход от Хангая к Восточным Саян), так и резко падать (переход от Монгольского Алтая к Западным Саян). Области повышенных значений этого параметра могут располагаться практически в полном окружении областей пониженных значений.

На рис. 23 показано соотношение максимальных касательных напряжений τ и относительных величин p/p_{ll} . Как следует из приведенных данных большая часть доменов с повышенным (относительно литостатики) значением всестороннего давления находится в режиме горизонтального сжатия, а домены с пониженным значением всестороннего давления в режиме горизонтального растяжения. При этом уровень значений максимальных касательных напряжений от величины всестороннего давления практически не зависит. Отмечается лишь некоторое различие распределения доменов в области повышенного надлитостатического сжатия в сравнении с областью пониженных значений этого параметра.

Все это говорит о небольшом влиянии на напряженное состояние исследуемого региона давления со стороны Индийской плиты, что проявляется в отсутствии взаимосвязи уровня тектонического давления и уровня максимальных касательных напряжений, так как это имеет место для границ плит (см. рис. 15).

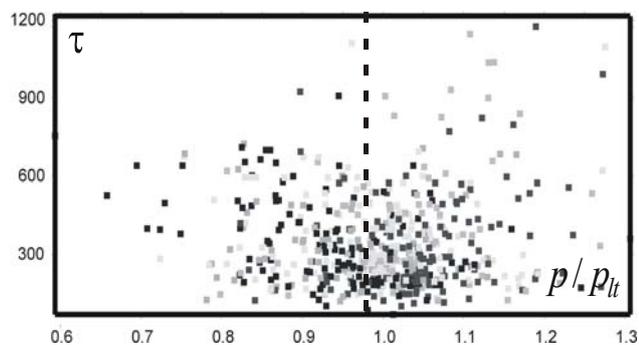


Рис. 23. Соотношение между τ (в барах) и p/p_{ll} (вертикальный пунктир – среднее значение)

Центральный Тянь-Шань. Реконструкция напряженного состояния земной коры Центрального Тянь-Шаня выполнялась на основе сейсмологических данных о механизмах очагов землетрясений, полученных для сети KNET в период времени с 02.02.1999 по 30.12.2007 [Сычева и др., 2003]. Каталог сети KNET содержал 805 событий с магнитудами от 1.1 до 5.4. Реконструкция напряжений выполнялась по сетке $0.05^\circ \times 0.05^\circ$ в латеральном направлении и 5 км по глубине. Получены данные о параметрах напряжений для 283, 384, 328 и 176 доменов для глубин 5, 10, 15

и 20 км соответственно. Исходные сейсмологические данные для Центрального Тянь-Шаня позволяют выполнить более детальную, с меньшим масштабом осреднения реконструкцию напряжений в сравнении с данными для Алтая и Саян. Для Алтая и Саян этот масштаб, определяемые магнитудным диапазоном землетрясений, используемых для реконструкции, составлял 30-40 км, в то время как для центрального Тянь-Шаня около 5-10 км.

Реконструкция показала, что погружение осей максимального сжатия направлено в основном на север – северо-запад (рис. 24, а). При этом существуют области, где эти оси имеют субвертикальное направление, что отвечает режиму горизонтального растяжения (рис. 24, б). Большая часть региона имеет режим горизонтального сдвига при достаточно широком представителестве режима горизонтального сжатия. Касательные напряжения на горизонтальных площадках, характеризующие направление воздействия со стороны мантии на земную кору, имеют достаточно мозаичное распределение в отличие от того, что наблюдается для зон субдукции [Ребецкий, 2007]. Около 90% действующих касательных напряжений взаимно компенсированы. Подобный характер распределения касательных напряжений определяет небольшое влияние мантии на кору исследуемого региона, по крайней мере, за счет латерального смещения мантии. Суммарные касательные напряжения, действующие в направлении на юг, составляют около 8%, а в направлении на запад – около 2% от общей интенсивности поддвиговых напряжений, что можно комментировать как реактивную реакцию со стороны мантии на медленное смещение коры в направлении на север – северо-восток.

Представленные выше данные являются результатом первого этапа реконструкции в рамках МКА. Для определения абсолютных значений напряжений нами использовались данные о динамических параметрах одного из наиболее сильных землетрясений $M_w = 5.1$, произошедшее 06.06.2007 на глубине 12 км. Для этого землетрясения имеются данные о величине средних для разрыва сброшенных напряжений $\Delta\tau_n = 22$ МПа. Этот параметр в рамках алгоритма МКА позволяет оценить величину эффективного внутреннего сцепления массивов горных пород: $\tau_f = 17$ МПа [Ребецкий, 2007].

Полученное значение эффективного внутреннего сцепления позволяет перейти от относительных величин напряжений к абсолютным. На рис. 25 представлено распределение максимальных касательных напряжений τ и эффективного

давления p^* (давление в горных породах минус флюидное давление в трещинно-поровом пространстве). Эти две характеристики напряженно-

го состояния взаимосвязаны (связь вытекает из закона Кулона-Мора). В доменах с повышенным значением τ также повышенные значения p^* .

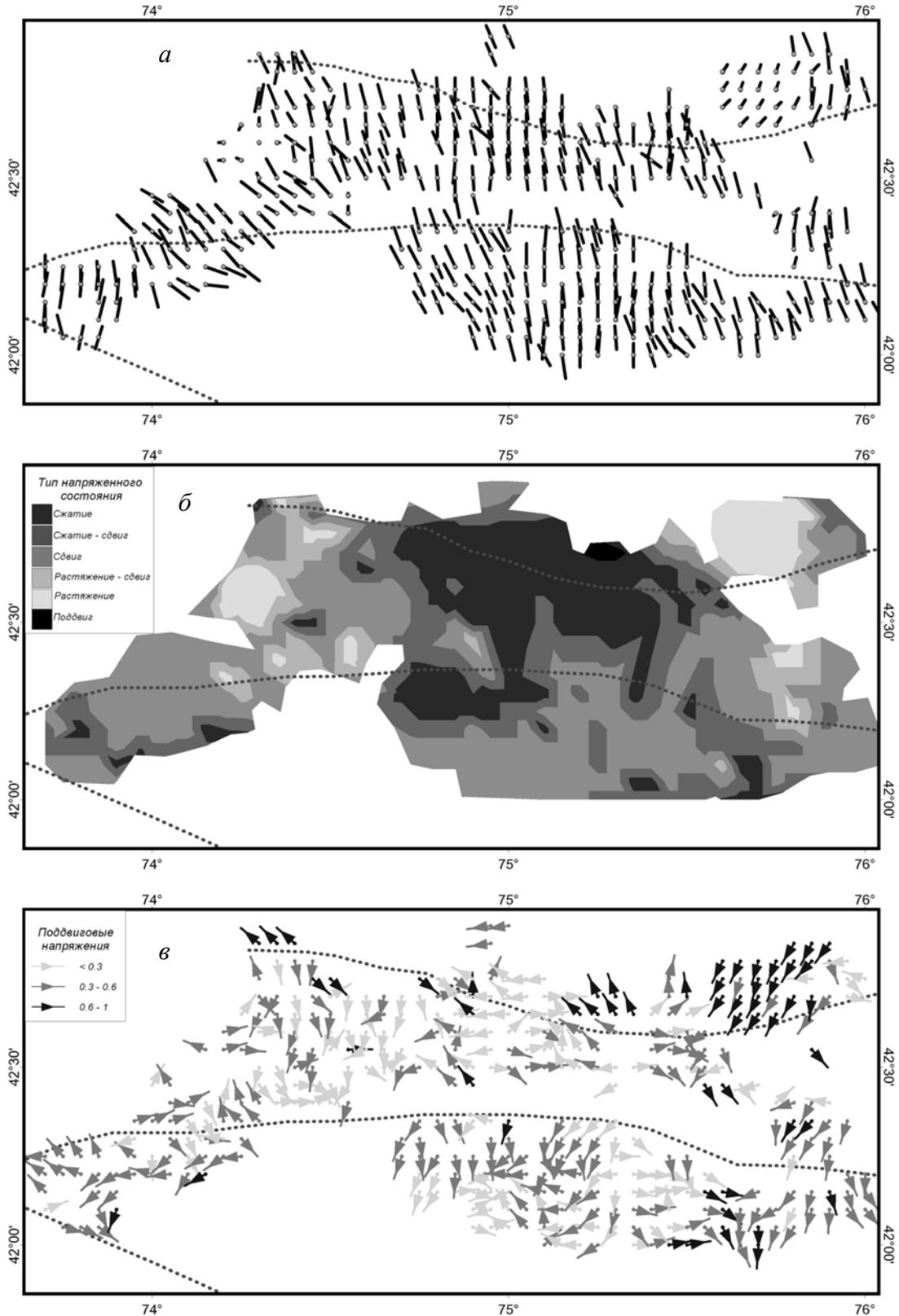


Рис. 25. Проекция осей максимального сжатия (*а*), построенных в направлении их погружения из центра доменов, для которых выполнена реконструкция; тип напряженного состояния (*б*); ориентация и интенсивность подвиговых касательных напряжений на горизонтальных площадках с нормалью, направленной к центру Земли (*в*) для слоя земной коры на глубине 10 км

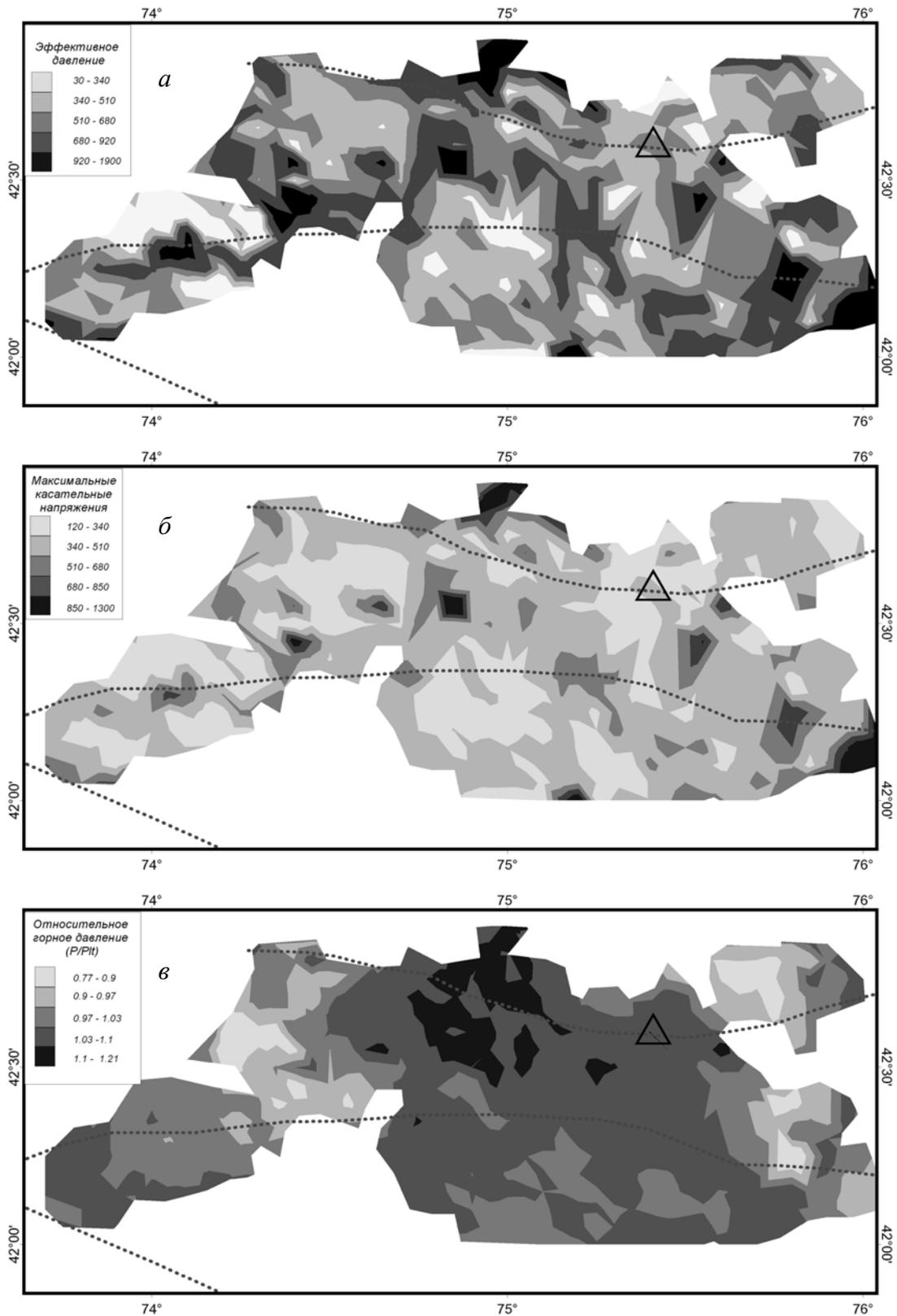


Рис. 25. Касательные напряжения (*а*) и эффективное всестороннее давление (*б*) в барах; относительное всестороннее давления p/p_H (*в*) для слоя земной коры на глубине 10 км. Треугольник – эпицентр землетрясения, произошедшее 06.06.2007

Значения максимальных касательных напряжений находятся в диапазоне от 120 бар (12 МПа) до 1300 бар (130 МПа) при среднем значении 400 бар. Этот уровень напряжений в 4-6 раз выше уровня напряжений, полученного для суб-

дукционных областей и границ литосферных плит [Ребецкий, 2007; Hardebeck, Hauksson, 2001]. Отметим, что землетрясение, на основе которого определено значение эффективного сцепления, приходится на домены с невысоким

уровнем значений τ и p^* , что отвечает концепции, развиваемой в работе [Ребецкий, 2007], определяющей области среднего уровня напряжений как наиболее опасные для хрупкого разрушения крупного масштаба. Анализ всестороннего давления в горных породах, который в соответствии с алгоритмом МКА был выполнен при использовании данных о рельефе дневной поверхности, показал, что отношение p/p_{lt} в исследуемом регионе изменяется в диапазоне 0.778 – 1.206 (рис. 26, в). Области самых высоких значений тектонического давления находятся в северной части Центрального Тянь-Шаня. В западном и восточном сегментах наблюдаются большие области пониженного тектонического давления. Среднее значение этого отношения 1.02 (рис. 27). Важно также отметить, что разброс значений p/p_{lt} относительно среднего достаточно равномерен при низком уровне максимальных касательных напряжений, и имеет тренд в сторону понижения при высоких значениях τ . Такое распределение p/p_{lt} и его малое

отклонение среднего значения от единицы показывает, что основной вклад в напряженное состояние региона оказывают внутрикоровые неоднородности. Влияние бокового давления на напряженное состояние можно оценить в 5%. Вместе с воздействием касательных напряжений на подошву коры общее влияние внешних факторов оценивается в 10-15%.

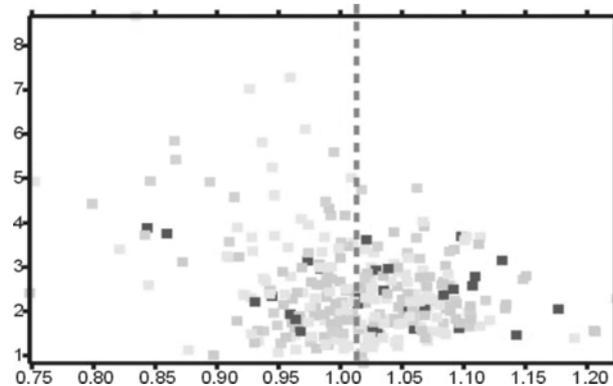


Рис. 27. Соотношение между τ (в барах) и p/p_{lt} (вертикальный пунктир – среднее значение)

ВЫВОДЫ

Установлено, что распределение относительного значения тектонического давления в коре внутриплитовых орогенов носит более мозаичный характер чем вблизи границ океанической и континентальной плит. С учетом диапазона разброса значений среднее значение тектонического давления для коры внутриплитовых орогенов близко к литостатическому давлению, что отличает обстановку в орогенов от обстановки вблизи границ океанической и континентальной плит. Флюидное давление в сейсмоактивных областях для глубин более 5-7 км существенно отличается от гидростатических значений. В областях подготовки сильных землетрясений оно приближается к литостатическим значениям.

Выполненные нами исследования показывают, что временное напряженное состояние горноскладчатых орогенов Алтае-Саян и Центрального Тянь-Шаня формируется под воздействием ряда факторов, одним из которых является и механизм латерального субмеридионального давления, вызванного движением Индийской плиты. Однако наши расчеты показывают, что влияние этого воздействия составляют не более 10–15% от напряжений, вызываемых другими факторами. В силу большой длительности этого воздействия (первые млн. лет – десятки млн. лет) оно формирует структуру горноскладчатой области (простирая: хребтов, осей геосинклиналей и синклиналей, шарниров складок, крупнейших

разрывов), но в поле напряжений проявляется в виде фона, на уровне которого имеются более значимые вариации напряжений, определяемые внутренними для данного региона источниками воздействиями.

Полученное в наших расчетах чередование областей повышенного отношения p/p_{lt} в горных областях и пониженного в котловинах отвечает линейному масштабу в 500–700 км и 50–100 км, что отражает зависимость современного напряженного состояния земной коры исследуемого района от глубинных коровых и мантийных неоднородностей. Эти неоднородности создают возмущения в поле напряжений, превосходящие фоновые значения напряжений, определяемые внешними условия-ми латерального нагружения со стороны сопредельных областей, которое в том числе отражает процесс давления на Евразийскую плиту Индостана.

Следует заметить, что в качестве внутренних для исследуемого региона воздействий помимо внутрикоровых и внутримантийных неоднородностей, прямо влияющих на распределение напряжений, необходимо принимать во внимание и остаточные напряжения горизонтального сжатия, которые существуют в горных породах. Возникновение подобных напряжений следует прежде всего связывать с гравитационным уплотнением, происходящим в породах земной коры в условиях бокового (латерального) стеснения и в при-

сутствии флюида в трещинно-поровом пространстве уже начиная с глубин в первые километры [Ребецкий, 2008]. Во внутри-плитовых орогенах, где существует высокая дифференцированность вертикальных движений (подъем в хребтах и опускание в межгорных впадинах) и развиты процессы эрозии поверхности, породы, накопившие на относительно больших глубинах дополнительные напряжения бокового сжатия и выведенные в последствии ближе к поверхности, в процессе разгрузки могут создавать напряженное состояние горизонтального сжатия. Существующие остаточные напряжения в горных породах земной коры подтверждается многими

фактами [Айтматов, 1981; Пономарев, 2008; Марков, 1980], но оно еще мало изучено. В настоящее время после работы [Ребецкий, 2008], в которой возможность появления остаточных напряжений связывалась с гравитационным раздвиганием пород на глубине в условиях бокового стеснения, появилась возможность осуществлять оценку уровня остаточных напряжений по данным об современной и палеоглубине, на которой в процессе эволюции коры побывала порода.

Исследования поддержаны грантами РФФИ 06-05-64410, 07-05-64998 и программой ОНЗ РАН №6.

ЛИТЕРАТУРА

- Айтматов И.Т.* Роль остаточных напряжений в горных породах в формировании очагов горных ударов и техногенных землетрясений // Геодинамик и геоэкологические проблемы высокогорных регионов. Материалы второго международного симпозиума, Бишкек, 29 октября – 3 ноября 2002 г. Бишкек-Москва: Изд. Prnthouse. 2003. С. 209-221.
- Арефьев С.С., Антекман Ж.Я., Быкова В.В., Погребченко В.В.* О геометрии очаговой зоны Алтайского землетрясения 27 сентября 2003 г // Геофизические исследования. 2005. Вып. 2. С. 16-26.
- Гинтов О.Б., Исай В.М.* Некоторые закономерности разломообразования и методика морфокинематического анализа сколовых разломов // Геофиз. журнал. 1984. Т. 6, № 3. С. 3–10, № 4. С. 3-14.
- Гущенко О.И.* Кинематический принцип реконструкции направлений главных напряжений (по геологическим и сейсмологическим данным) // ДАН СССР. Сер. геофиз. 1975. Т. 225, № 3. С. 557–560.
- Жалковский Н.Д., Кучай О.А., Мучная В.И.* Сейсмичность и некоторые характеристики напряженного состояния земной коры Алтае-Саянской области // Геология и геофизика. 1995. Т. 36, N10. С. 20-30.
- Лескова Е.В., Еманов А.А.* Массовый анализ фокальных механизмов афтершоков Чуйского землетрясения // Активный геофизический мониторинг литосферы Земли. Материалы международной конференции 12-16 сентября 2005 г. Академгородок. Новосибирск: Изд. СО РАН. 2005. С. 313-319.
- Марков Г.А.* О распространении горизонтальных тектонических напряжений в зонах поднятий земной коры // Инженерная геология. 1980. № 1. С. 20-30.
- Никитин Л.В., Юнга С.Л.* Методы теоретического определения тектонических деформаций и напряжений в сейсмоактивных областях // Изв. АН СССР Физика Земли. 1977. № 11. С. 54–67.
- Осокина Д.Н., Фридман В.Н.* Исследование закономерностей строения поля напряжений в окрестностях сдвигового разрыва с трением между берегами // Поля напряжений и деформаций в земной коре. М.: Наука. 1987. С. 74–119.
- Пономарев В.С.* Энергонасыщенность геологической среды. М.: Наука. 2008. 378 с.
- Райс Дж.* Механика очага землетрясения. Сер. Механика. Новое в зарубежной науке. М.: Мир. 1982. 217 с.
- Ребецкий Ю.Л.* Реконструкция тектонических напряжений и сеймотектонических деформаций: методические основы, поле современных напряжений Юго-Восточной Азии Океании // Доклады РАН. 1997. Т. 354, № 1. С. 101-104.
- Ребецкий Ю.Л.* Методы реконструкции тектонических напряжений и сеймотектонических деформаций на основе современной теории пластичности // Доклады РАН. 1999. Т. 365, № 3. С. 392-395.
- Ребецкий Ю.Л.* Принципы мониторинга напряжений и метод катакластического анализа совокупностей сколов // БМОИП. сер. геол. 2001. Т 76, вып. 4. С.28-35.
- Ребецкий Ю.Л.* Развитие метода катакластического анализа сколов для оценки величин тектонических напряжений // Докл. РАН. 2003. Т 388, № 2. С. 237–241.
- Ребецкий Ю.Л.* Оценка относительных величин напряжений – второй этап реконструкции по данным о разрывных смещениях // Геофизический журнал. 2005. Т. 27. № 1. Киев. С. 39-54.
- Ребецкий Ю.Л.* Тектонические напряжения и прочность горных массивов. М.: Изд. Наука. 2007. 406 с.

- Ребецкий Ю.Л.* Механизм генерации тектонических напряжений в областях больших вертикальных движений землетрясений // Физическая мезомеханика. 2008. Т 1. № 11. С. 66-73.
- Ребецкий Ю.Л., Маринин А.В.* Поле тектонических напряжений до Суматра-Андаманского землетрясения 26.12.2004. Модель метастабильного состояния горных пород // Геология геофизика. 2006а. Т 47. № 11. Новосибирск. Гео. С. 1192-1206.
- Сычева Н.А., Аладьев А.В., Мухамадиева В.А., Юнга С.Л.* Изучение фокальных механизмов очагов по данным сети KNET // Геодинамика и геоэкологические проблемы высокогорных регионов. М.: 2003. С. 241-253.
- Тимошенко С.П., Гудьер Дж.* Теория упругости. М.: Наука, 1975. 352 с.
- Юнга С.Л.* Методы и результаты изучения сейсмотектонических деформаций. М.: Наука, 1990. 190 с.
- Angelier J., Tarantola A., Valette B., Manoussis S.* Inversion field data in fault tectonics to obtain the regional stress - I. Single phase fault populations: a new method of computing the stress tensor // Geophys. J. Res. astr. Soc. 1982. V. 69. P. 607-621.
- Lisle R.* Principal stress orientation from faults: an additional constrain // Ann. Tectonicae. 1987. N 1. P. 155-158.
- Michael A.J.* Determination of stress from slip data: faults and folds // J. Geophys. Res. 1984. Vol. 89, NO B11. P. 11517-11526.
- Byerlee J. D.* Friction of Rocks // Pure and applied geophys. 1978. V. 116. P. 615-626.
- Carey-Gailhardis E., Mercier J.L.* A numerical method for determining the state of stress using focal mechanisms of earthquake populations: application to Tibetan teleseismic and microseismicity of Southern Peru // Earth and Plan. Sci. Let. 1987. V. 82. P. 165-179.
- Etchecopar A., Vasseur G., Daignieres M.* An inverse problem in microtectonics for the determination of stress tensors from fault striation analysis // J. Struct. Geol. 1981. N 3. P. 51-65.
- Gephart J.W., Forsyth D.W.* An improved method for determining the regional stress tensor using earthquake focal mechanism data: application to the San Fernando earthquake sequence. // J. Geophys. Res. 1984. Vol. 89, NO B11. P. 9305-9320.
- Hardebeck J. L., Hauksson E.* Crustal stress field in southern California and its implications for fault mechanics // J. Geophys. Res. 2001. V. 106, N B10. P. 21859-21882.
- Sibson R.H.* Frictional constraints on thrust, wrench and normal faults // Nature. 1974. Vol. 249, N 5457. P. 542-544.