

УДК 550.311

ГРАВИТАЦИОННЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ В ЗЕМНОЙ КОРЕ ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ

© 2010 г. В.В. Погорелов, А.А. Баранов

Институт физики Земли им. О.Ю.Шмидта РАН, г. Москва, Россия

Методом численного моделирования для региона Центральной и Южной Азии оценены напряжения в литосфере, вызываемые плотностными неоднородностями в земной коре. Исходная модель литосферы региона представляет собой набор слоев, аппроксимирующих три слоя в консолидированной коре и два слоя в мантии (литосферная мантия и астеносфера). Осадочные бассейны учтены в виде распределенной по поверхности фундамента нагрузки. Плотностные и реологические параметры для глубинных частей модели оценены по данным о скоростях сейсмических волн. Показано, что глубина области перехода от преимущественно упругих к преимущественно упруго-пластическим деформациям в коре в значительной степени контролируется региональными плотностными неоднородностями.

Ключевые слова: напряженное состояние, модель коры Центральной Азии, упруго-пластические деформации, девиаторные и касательные напряжения, критерий перехода в пластичность.

Введение

Знание закономерностей распределения напряжений в земной коре континентальных областей важно не только для фундаментальных научных исследований, но и для прикладных областей, например, при сейсмическом районировании и прогнозе, при обеспечении экологической безопасности, для прогноза месторождений и др.

В настоящее время механизм генерации тектонических напряжений связывают с четырьмя основными факторами:

- с гравитационными силами, являющимися результатом плотностных неоднородностей коры, осадков и литосферы;
- с деформациями, вызванными боковым давлением, передающимся от областей столкновения литосферных плит;
- с касательными усилиями со стороны подстилающей мантии;
- с действием остаточных напряжений [Ребецкий, 2008], которые могут сохраняться в верхней и средней коре в течение миллионов лет.

Оценка природных напряжений, выполненная с применением тектонофизических методов, показывает, что областей вблизи границ литосферных плит большую роль играют первые два из названных факторов, а для внутриконтинентальных орогенов – первый и последний [Романюк, Ребецкий, 2001]. Неоднородности силы тяжести в верхних слоях Земли могут рассматриваться в качестве движущей силы, определяющей тектонические движения наравне с конвекцией в мантии и другими механизмами, с помощью которых объясняют горизонтальные движения плит и плитовые взаимодействия, такие как, например, коллизия и субдукция.

В Центральной и Южной Азии располагаются тектонические структуры, чрезвычайно контрастные по строению коры и литосферы. Прежде всего, это Гималайско-Тибетский ороген (ГТО), состоящий из горной цепи Гималаев с высотами 7–8 км и Тибетского плато – наиболее обширного континентального поднятия на Земле с высотами более 5 км. Кора ГТО утолщена до 70 км, что почти вдвое превышает средние для платформенных областей величины. По периферии ГТО располагаются обширные и

глубокие осадочные бассейны – Таримский (мощность осадков местами до 10 км), Бенгальский, Сычуаньский и др., в некоторых из которых консолидированная кора имеет сокращенную мощность. Для горных систем Тянь-Шань и Килиан характерно уменьшение мощности средней коры. Из сказанного следует, что для оценки упругих напряжений в литосфере, вызываемых плотностными неоднородностями литосферы и рельефом, регион Центральной и Южной Азии весьма интересен. Современные концепции тектоники плит трактуют рассматриваемый регион как зону конвергентного схождения Индо-Австралийской и Азиатской плит.

Исходные данные

Полученные в последние годы сейсмические данные стали основой для построения модели коры Центральной и Южной Азии *ASCRUST-08* [Баранов, 2008; Baranov, 2010], которая существенно более детальна по сравнению с известной моделью *CRUST 2.0* [Bassin, Laske, Masters, 2000]. При составлении модели был проанализирован большой массив новых данных по отраженным, преломленным и поверхностным волнам от землетрясений и взрывов. В результате были построены десять цифровых карт, определяющих глубину залегания поверхности Мохоровичича (рис. 1), мощность верхнего, среднего и нижнего слоев консолидированной коры, а также плотности и скорости продольных волн в этих слоях. Разрешение модели по площади составляет $1^\circ \times 1^\circ$.

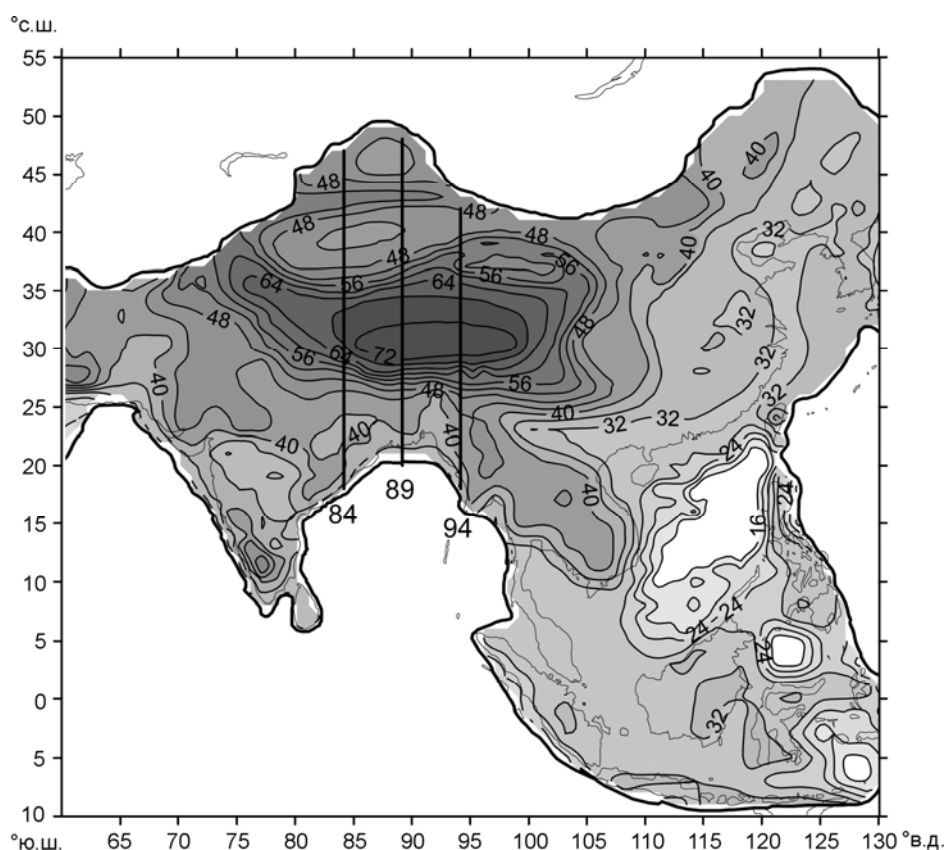


Рис. 1. Карта глубин залегания поверхности Мохоровичича для Центральной и Южной Азии. Цифры на изолиниях – глубина (H , км). Черная утолщенная линия – граница области моделирования, обеспеченной данными. Три прямых отрезка – положение профилей 84, 89, 94, описываемых в работе

Численное 2D-моделирование напряженного состояния литосферы, вызываемого плотностными неоднородностями, выполнялось вдоль трех профилей длиной около 3000 км каждый, пересекающих Гималайско-Тибетский ороген по меридианам 84°, 89° и 94° в.д. (см. рис. 1). Мощность коровых слоев по линиям профилей – 30–70 км, что позволяет считать их достаточно “тонкими”, чтобы пренебречь сферичностью Земли и использовать в качестве базовой прямоугольную систему координат. Модели по каждому из профилей представлены на рис. 2.

Плотности ρ для блоков коры рассчитывались по скоростям продольных сейсмических волн V_p с использованием эмпирической формулы [Barton, 1986]:

$$\rho = 0.0094V_p^3 - 0.1372V_p^2 + 0.8182V_p + 0.7548 \quad (1)$$

и усреднялись внутри структурного блока протяженностью в 1 градус для каждого слоя модели *ASCRUST-08*. Разрезы коры были построены снизу двумя слоями с постоянной плотностью – литосферная мантия ($\rho=3300$ кг/м³ [Manglik et al., 2008]) и астеносфера ($\rho=3410$ кг/м³ [Schubert, Turcotte, Olson, 2001]).

Профили, по которым проводилось моделирование, пересекают как обширные протяженные осадочные бассейны (Таримский и Джунгарский), так и множество небольших по площади осадочных бассейнов, расположенных, например, в многочисленных межгорных впадинах Тибетского плато. Размеры этих небольших бассейнов в разы меньше размера элементарной ячейки (1°×1°) с исходной информацией о консолидированной коре и на порядок меньше размеров структурных блоков, выделяемых при моделировании в слоях коры. В таких условиях учет осадочных бассейнов путем введения их точных геометрических контуров в модель чрезвычайно усложнил бы сетку конечных элементов. При этом неоправданно выросли бы и сложности расчетов, и число параметров модели. С учетом сказанного влияние осадочной нагрузки аппроксимировалось меняющимся вдоль структурной области дополнительно распределенным давлением по поверхности фундамента. Параметры осадочных бассейнов взяты из модели [Laske, Masters, 1997].

Реологические параметры модели – модуль Юнга и коэффициент Пуассона – связаны приведенной ниже формулой, по которой модуль Юнга (E) вычислялся как функция скорости (V_p), плотности (ρ) и принятого коэффициента Пуассона (ν):

$$E = \rho V_p^2 (1 + \nu)(1 - 2\nu)/(3\nu), \quad (2)$$

При значении коэффициента Пуассона $\nu = 0.5$ модуль Юнга $E = 0$, что соответствует несжимаемому материалу [Pauselli, Federico, 2003].

В первом приближении напряжения, возникающие при малых деформациях в самых верхних частях коры, могут быть оценены, исходя из упругой модели среды. Для более точных и адекватных оценок напряжений в литосфере необходимо использование упруго-пластической модели поведения материала [Forsyth, 1980; Bird, 1998] или другие более сложные реологические модели. Так, при моделировании коровых напряжений для задач глобального и мегарегионального масштаба часто считают, что кора обладает упругими свойствами и способна к хрупкому разрушению. При этом катакластические свойства верхних слоев коры обеспечиваются совокупными перемещениями по хрупким разрывам мегаскопического масштаба (порядка 10–100 м и более). Повышение с глубиной температуры и давления в литосфере определяет переход геосреды от упруго-катакластического поведения к упругопластическому. В нижней части коры при приближении уровня девиаторных напряжений к истинному пределу упругости с течением времени будет происходить рост необратимых деформаций за счет ползучести. Принято считать, что в низах коры и верхних слоях литосферы имеет место течение с нелинейной ползучестью [Cloethingh, Burov, 1996]. По оценкам, приводимым в работе [Николаевский, 1996], ниже границы Мохоровичича среда находится в истинно пластическом состоянии.

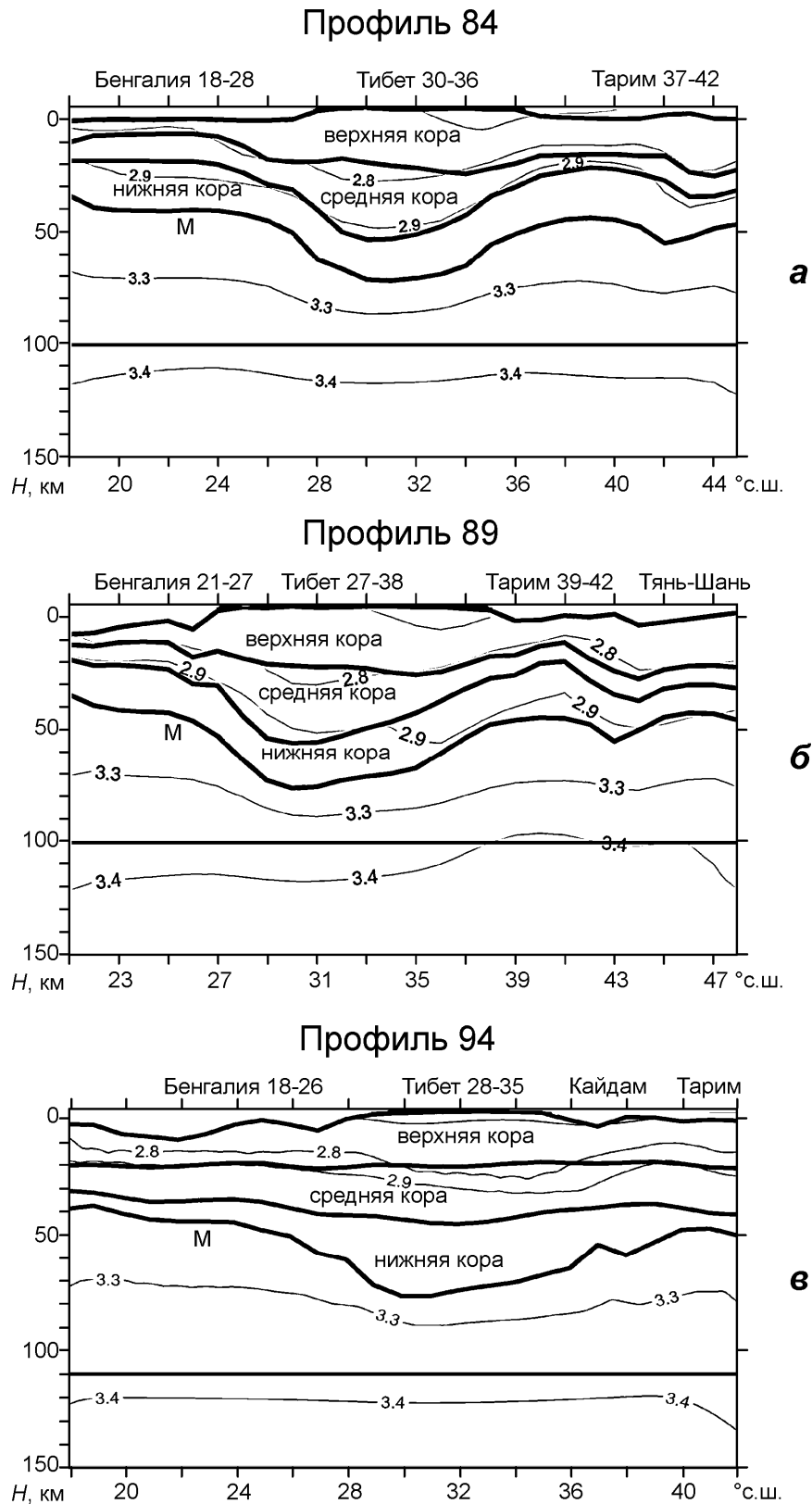


Рис. 2. Плотностные разрезы по профилям 84 (а), 89 (б) и 94 (в). Утолщенные линии – границы слоев коры, граница Моховича (М) и искусственная граница “литосфера–астеносфера” (горизонтальная); тонкие – изолинии плотности с указанием значения ρ (кг/м³). Вслед за географическими названиями над горизонтальной осью указаны их ограничения в °с.ш.

По оценкам [Mercier, 1980], модуль Юнга растет с глубиной, при этом, предел упругости и прочности “на сдвиг” падает. Таким образом, более жесткое с позиции теории упругости вещество “течет” при более низких уровнях девиаторных напряжений.

При задании реологических параметров модели мы исходили из следующей схемы изменения реологии с глубиной: упругая кора – упруго-катакластическая кора – упруго-пластичная литосфера – пластичная и более податливая астеносфера. Используемые плотностные и реологические характеристики моделей приведены в таблице.

Плотностные и реологические характеристики моделей

№ слоя	Название слоя	Мощности слоев H , км	Плотность слоев ρ , г/см ³	Коэффициент Пуассона, ν	Модуль Юнга, E , МПа
2	Верхняя кора	7–15	2.7–2.8	0.25	84000
3	Средняя кора	10–25	2.8–2.9	0.25	100000
4	Нижняя кора	20–30	2.8–3.0	0.25–0.3	125000
5	Литосферная мантия	50–150	3.3	0.5	400000
6	Астеносфера	20–80	3.4	0.5	20000

В рамках линейной теории упругости рассматриваемое поведение литосферы может быть качественно описано следующим образом.

Верхняя и средняя кора обладает сжимаемостью. Ее поведение определяется хрупкими свойствами, и при характерных нагрузках переход в истинное пластическое состояние не происходит; на мегаскопическом уровне наблюдается катакластическое (трещинное) течение;

В средней/нижней коре происходит частичное плавление коровых пород вследствие влияния температуры, давления, химических переходов и флюидизации; поведение коры можно охарактеризовать как “псевдо-пластическое” – катакластическое течение на субмегаскопическом и мегаскопическом уровнях [Ребецкий, 2008].

Литосферная мантия состоит из более жесткого по сравнению с корой вещества, но имеет более низкий предел текучести, что предопределяет ее пластическое поведение уже при действии только гравитационного напряженного состояния.

Астеносфера – область верхней мантии, в которой температура близка (на 10–20% ниже) к температуре плавления мантийного вещества на данной глубине, способна к еще более интенсивной релаксации напряжений, что выражено пониженными значениями модуля Юнга.

Для литосферной мантии и астеносферы коэффициент Пуассона принимался равным 0.5, что соответствует несжимаемости среды в этих слоях. Граница “литосфера–астеносфера” аппроксимировалась условно прямолинейной границей.

Постановка задачи численного моделирования

Плотностные неоднородности в коре и верхней мантии создают гравитационные напряжения в среде. Система уравнений для решения плоской задачи обобщенного напряженного состояния в напряжениях включает в себя уравнения равновесия, уравнения неразрывности деформации и закон Гука [Ландау, Лифшиц, 2007]. Искомыми величинами являются три компоненты тензора напряжений – σ_{xx} , σ_{yy} , σ_{xy} .

Выбранная сетка профилей, их протяженность и точность построения модели позволяют использовать предположение о том, что, по крайней мере, на расстоянии, равном 1° , напряженно-деформированное состояние меняется слабо и монотонно. Таким

образом, можно приближенно считать, что напряженное состояние вдоль профилей подобно напряженному состоянию вертикальной пластины, находящейся в стесненных боковых условиях, т.е. отвечает плоскому деформированному состоянию. Боковыми граничными условиями для северной и южной вертикальных границ являются условие нерастекания и равенства нулю напряжений на боковой границе.

Полагая, что $\varepsilon_{zz}=0$ и все производные по оси z равны нулю, получаем значительное упрощение основных уравнений теории упругости, приобретающих следующий вид: уравнение равновесия

$$\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} = 0; \quad \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} - \rho g y = 0; \quad (3)$$

уравнение неразрывности деформации

$$\frac{\partial^2 \varepsilon_{xx}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_{yy}}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 \varepsilon_{xy}}{\partial x \partial y}; \quad (4)$$

закон Гука

$$\begin{aligned} \varepsilon_{xx} &= \frac{1}{E}(\sigma_{xx} - \nu \sigma_{yy}); \\ \varepsilon_{yy} &= \frac{1}{E}(\sigma_{yy} - \nu \sigma_{xx}); \\ \varepsilon_{xy} &= \frac{2(1+\nu)}{E} \sigma_{xy}; \end{aligned} \quad (5)$$

где ε_{xx} , ε_{yy} , ε_{xy} – компоненты тензора деформации; ν – коэффициент Пуассона, E – модуль Юнга, а объемная сила контролируется распределением плотности ρ . Уравнения (3)–(5) содержат 6 неизвестных функций – σ_{xx} , σ_{yy} , σ_{xy} , ε_{xx} , ε_{yy} , ε_{xy} . Таким образом, решение плоской задачи в напряжениях сводится к решению этих уравнений с учетом заданных граничных условий.

Для расчета напряжений использовался конечно-элементный комплекс *UWay*, разработанный в Институте прикладной математики РАН [*Vlasov, Mnushkin, Yanovsky, 2000; Vlasov et al., 2004*]). Сетка конечных элементов создавалась отдельно на каждом из двумерных профилей. Характерный размер элемента составил 7 км. Соотношение мощности и протяженности профилей позволяют считать, что требуемые закрепления границ разреза не приведут к появлению существенных сингулярностей на краях.

В качестве основных характеристик напряженного состояния среды вычислялись инварианты тензора напряжений, независимые от системы координат: всестороннее давление p (среднее напряжение с обратным знаком)

$$p = -\frac{1}{3}(\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz}) \quad (6)$$

и максимальные касательные напряжения τ

$$\tau = \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + 2\sigma_{xy}^2}, \quad (7)$$

где σ_{ij} ($i, j = x, y, z$) – компоненты тензора напряжений (ось координат OX направлена в широтном направлении, ось OY – вертикально вверх, ось OZ ортогональна плоскости разреза и образует с ними правую тройку).

Хотя на данном этапе моделирования задача решалась в рамках упругого приближения, мы, тем не менее, оценивали положение и размеры областей возможного развития пластических (катакластических) деформаций, исходя из следующих критериев.

При невысоком уровне всестороннего обжатия в образцах горных пород на макроуровне может реализоваться хрупкое разрушение, которое при определенном масштабе осреднения мы рассматриваем как катакластическое течение с параметрами, зависящими от уровня давления. Критерием перехода в это состояние служит условие Друккера – Прагера [Drucker, Prager, 1952]

$$\sqrt{I_2} + kI_1 \leq Y, \quad (8)$$

где I_1 – первый инвариант тензора напряжения, совпадающий с модулем изотропного давления p ; I_2 – второй инвариант девиатора напряжений; k – коэффициент внутреннего трения; Y – предел внутреннего сцепления. При $I_1 = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3 = -p$ второй инвариант $I_2 = (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2/3$. Здесь σ_i ($i = 1, 2, 3$) – величины главных напряжений ($\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$). Данный критерий используется нами для оценки глубины перехода вещества земной коры в катакластическое состояние.

При высоком уровне всестороннего давления возможно возникновение неупругих деформаций, когда девиаторные напряжения достигнут предела упругости в кристалле или зерне (идеальный образец). На микроуровне начнут развиваться пластические деформации, вызываемые дислокационным механизмом релаксации напряжений – переносом и появлением новых дислокаций. Контроль перехода в пластическое состояние обеспечивается критерием Мизеса, который связывает значение предела упругости с энергией формоизменения упругих деформаций, т.е. с уровнем девиаторных напряжений:

$$\sqrt{I_2} \leq Y \quad (9)$$

где Y – предел упругости.

Заметим, что переход в область пластичности по критерию Мизеса не зависит от уровня всестороннего давления и определяется только значением максимальных касательных напряжений. Данный критерий использовался нами для оценки локализации возможных областей пластических деформаций в мантии.

Результаты расчетов

Результаты выполненных расчетов в виде схем распределения всестороннего давления, максимальных касательных напряжений и их отношения, иллюстрирующего переход в катакластическое течение, для трех профилей представлены на рис. 3 (профиль 84), 4 (профиль 89), 5 (профиль 94).

Всестороннее давление (фрагменты *a* на рис. 3, 4, 5) в моделях с чисто упругой корой на глубинах около 40 км составило около 900 МПа; его значения в нижней коре ГТО меньше по сравнению с соседними областями мантии. В верхней мантии на глубинах ~80 км давление достигает ~2.5 ГПа, причем наблюдается плавное нарастание давления с глубиной под корой мощностью ~40 км и практически скачкообразное под коровым утолщением ГТО.

Касательные напряжения в коре (фрагменты *b* на рис. 3, 4, 5) монотонно нарастают с глубиной, достигая ~300 МПа на глубинах ~30 км и ~650 МПа в низах коры под ГТО в области ее максимальной мощности. Мантийное вещество является более тяжелым и жестким по сравнению с корой, но испытывает большие пластические деформации за счет меньших значений предела упругости. Наблюдаемый градиент касательных напряжений в мантийном веществе объясняется стремлением к выравниванию напряжений за счет «растекания», что приводит к возникновению дополнительных сжимающих напряжений в низах коры под ГТО. Можно предположить, что этот механизм, обусловленный гравитационным выдавливанием, приводит к выталкиванию ГТО.

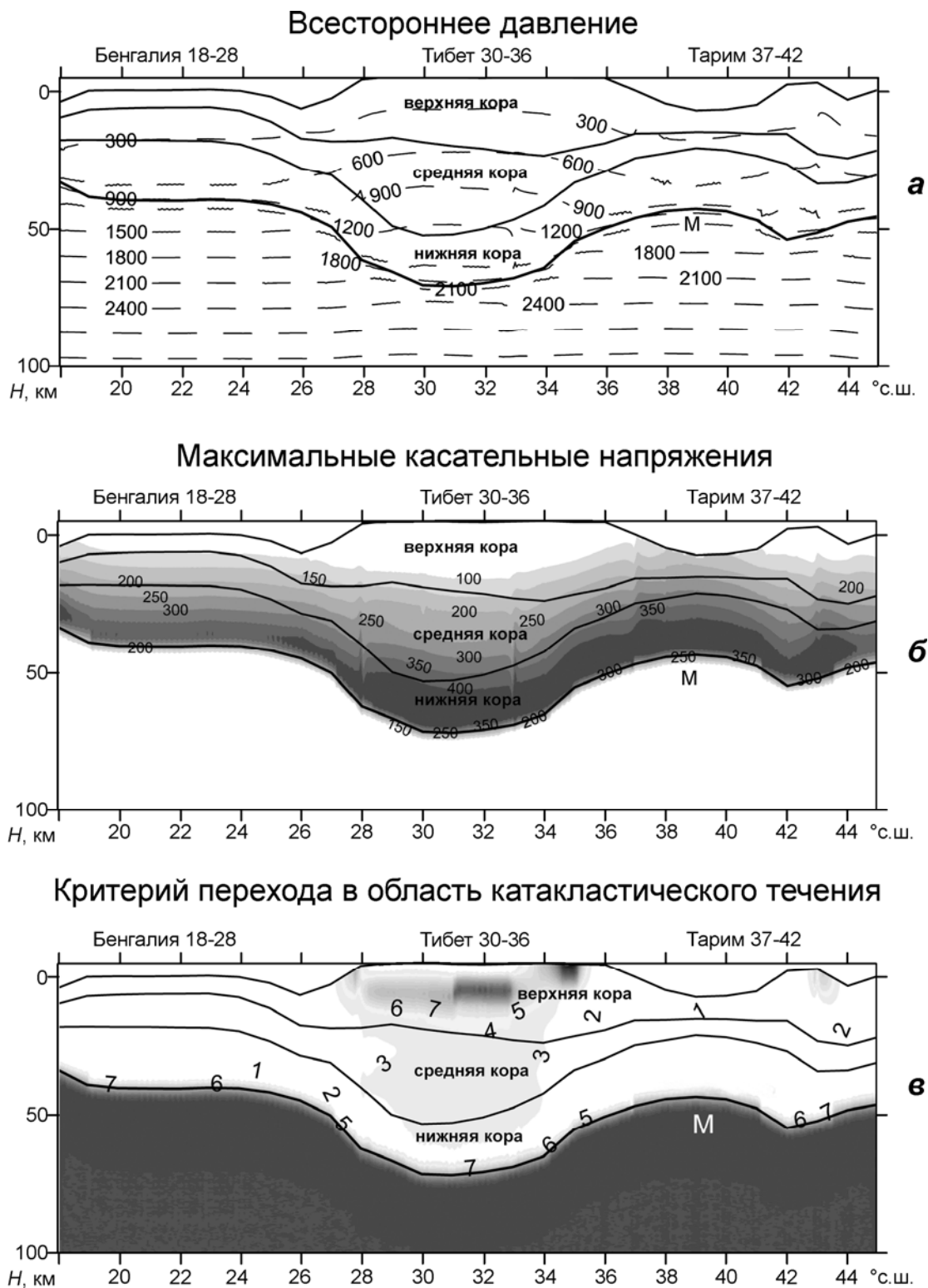


Рис 3. Профиль 84. Распределение всестороннего давления p (а), максимальных касательных напряжений τ (б) и критерия перехода в область катакластического течения p/τ (в). Сплошные линии – границы слоев коры и граница Мохововичича (М). Фрагмент а: штриховые линии – изолинии давления, цифры – значения p , МПа. Фрагмент б: цифры – значения τ , МПа. Фрагмент в: цифры – значения p/τ . Интенсивность заливки увеличивается с ростом значений параметров τ и p/τ

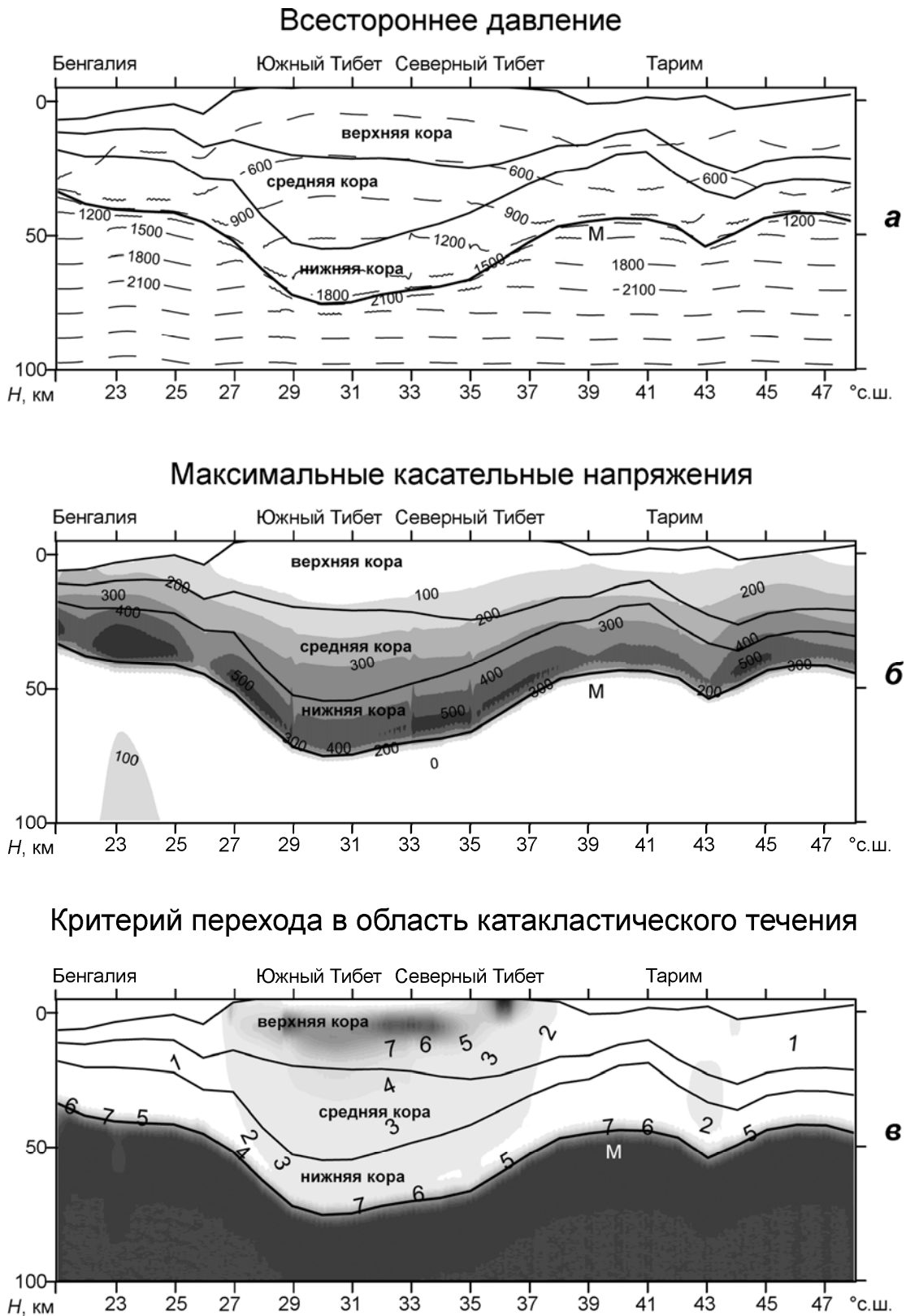


Рис 4. Профиль 89. Условные обозначения те же, что на рис. 3

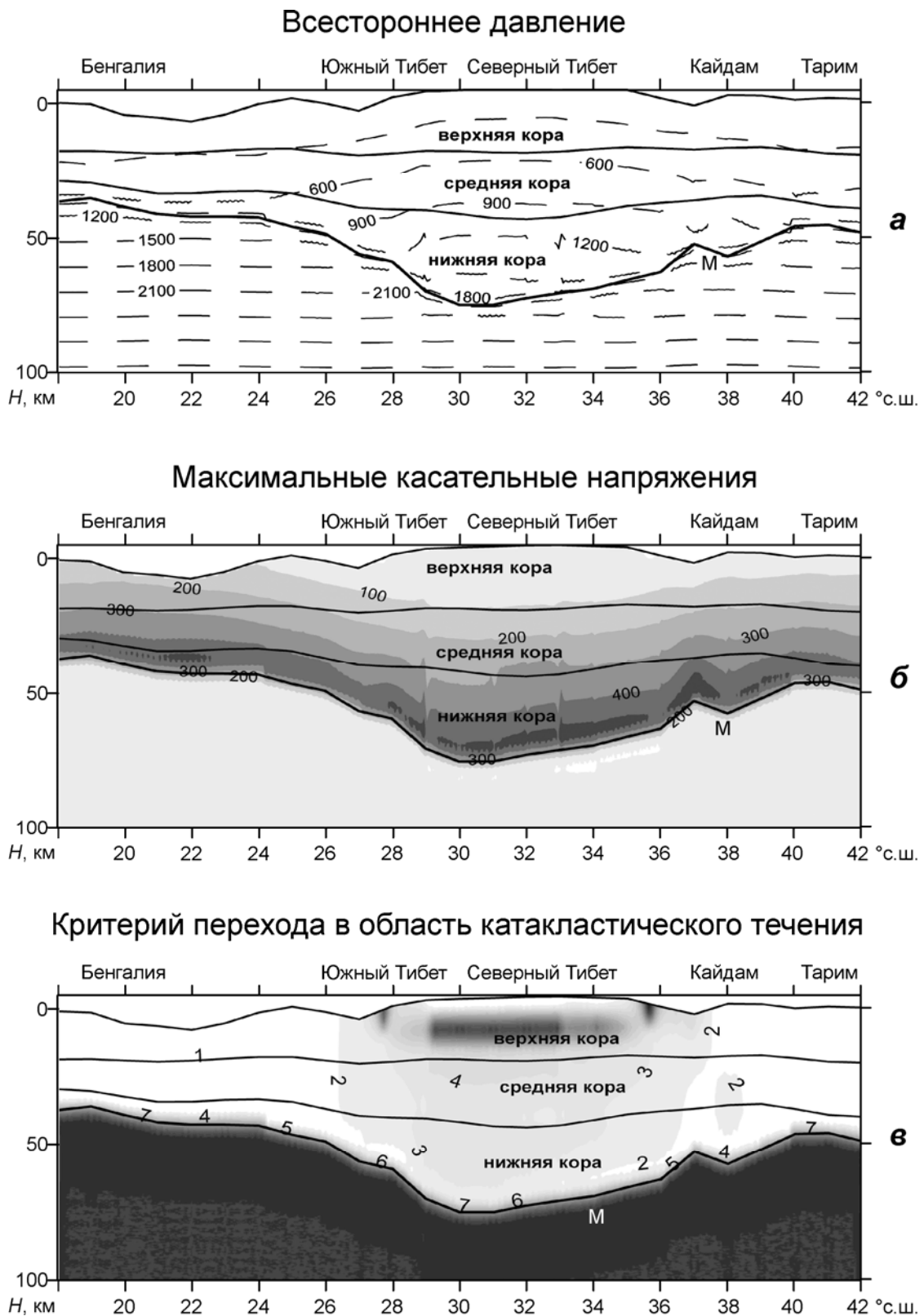


Рис 5. Профиль 94. Условные обозначения те же, что на рис. 3

В соответствии с критерием Друккера–Прагера, материал переходит в область пластических деформаций, если разность максимальных касательных напряжений и величины эффективного давления превысит предел текучести Y :

$$\tau - kp < Y,$$

где τ – максимальное касательное напряжение; p – всестороннее давление; k – коэффициент внутреннего трения породы (принято считать, что $k=0.4–0.8$).

Для пород коры и верхней мантии предел текучести Y составляет $\sim 1–5$ МПа. Учитывая, что давление в коре, полученное в ходе нашего анализа, составило ~ 1000 МПа, приведенное выше соотношение можно переписать как

$$\tau/p < Y/p + k.$$

Учитывая рост давления с глубиной, отношение Y/p в первом приближении можно считать малой величиной. Приняв при этом $k=0.5$, с учетом $p > 0$, получим возможность с достаточной достоверностью переписать данный критерий в виде

$$p/\tau > 2.$$

Результаты расчетов параметра p/τ для трех профилей приведены на фрагментах в рис. 3, 4, 5. Переход белого цвета на рисунках в оттенки серого фиксирует границу между упругим поведением и пластичностью; вариации серого цвета показывают области пластических деформаций. Таким образом, высокие касательные напряжения в мантии и в утолщенных областях коры под ГТО свидетельствуют о вероятном развитии пластического течения в них.

В дальнейшем авторы считают необходимым выполнить сравнение картин распределений давлений и касательных напряжений с напряжениями в коре рассматриваемого региона, полученные другими методами (например, методом реконструкции напряжений по механизмам очагов землетрясений, разработанным Ю.Л. Ребецким [2007]).

Выводы

Выполненные расчеты показали, что изотропное (всестороннее) давление в коровой части модели близко к $0.6–0.8$ от литостатических значений. Это говорит о том, что большая часть энергии упругих деформаций расходуется на формоизменение, а не на изменение объема. В мантии всестороннее давление практически равно литостатическому, что определяется выбранным нами значением коэффициента Пуассона 0.5 . Вариации давления в коре по латерали не превышают $10–12\%$. Изолинии давления поднимаются по глубине в коре под ГТО и опускаются в коре под Таримским и Бенгальским осадочными бассейнами. В нижней части утолщенной коры ГТО всестороннее давление на 15% ниже давления в сопредельных участках мантии.

Расчеты показали также, что для глубины 25 км уровень максимальных касательных напряжений меняется от 250 до 350 МПа. Причем максимальные значения этих напряжений наблюдаются на одной и той же глубине в консолидированной коре осадочных бассейнов, а минимальные – в коре под ГТО. Данный факт нашел свое объяснение при анализе мощности консолидированной коры и глубины подъема кровли мантии. Перепад глубин залегания кровли мантии под ГТО, составляющий $20–25$ км, приводит к формированию в коре под ГТО дополнительного горизонтального сжатия, а в смежных участках коры осадочных бассейнов дополнительного растяжения. Поскольку главное сжимающее напряжение гравитационного напряженного состояния всегда субвертикально, то эти дополнительные напряжения и приводят к уменьшению девиаторных напряжений в утолщенной коре под Тибетом и к их увеличению в утоненной коре осадочных бассейнов.

Малые вариации прочностных параметров модели не приводят к значимым изменениям девиаторных напряжений. Сравнение между собой результатов приведенных расчетов показывает, что разница в значениях составляет 5–7%. Это подтверждает применимость изложенного метода расчета, основанного на модели плоской деформации.

Приведенные расчеты – первый шаг в оценке гравитационных напряжений, их следует рассматривать как предварительные для построения модели упруго-хрупкой реологии коры и пластичной мантии. Однако основные установленные закономерности – места повышенных и пониженных напряжений, характер вертикальных градиентов напряжений, – полученные в простой упругой модели, по мнению авторов, найдут свое отражение при рассмотрении реологии геосреды, более близкой к природной.

Благодарности

Авторы благодарят д.ф.-м.н. Ю.Л. Ребецкого за сотрудничество и советы, позволившие переосмыслить проделанную работу и представить ее в настоящем виде, а также рецензента д.ф.-м.н. Т.В. Романюк за внимательное прочтение статьи и советы по ее улучшению.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 10-05-00579-а, 09-05-01022-а, 10-05-00910-а) и Фонда содействия отечественной науке (грант “Лучшие кандидаты РАН”).

Литература

- Баранов А.А.* Интегральная модель коры для центральной и южной Азии – основа для геодинамического моделирования процессов в земной коре // Электронный научно-информационный журнал “Вестник Отделения наук о Земле РАН”. 2008. № 1 (26). (URL: http://www.scgis.ru/russian/cp1251/h_dgggms/1-2008/informbul-3_2008/cw-3.pdf).
- Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Теоретическая физика. В 10-ти т. Т. 7. Теория упругости. М.: Физматлит, 2007. 264 с.
- Николаевский В.Н.* Геомеханика и флюидодинамика. М.: Недра, 1996. 447 с.
- Ребецкий Ю.Л.* Тектонические напряжения и прочность горных массивов. М.: Наука, 2007. 406 с.
- Ребецкий Ю.Л.* Тектонические напряжения и прочность природных массивов // Физическая мезомеханика. 2008. № 11. С.66–73.
- Романюк Т.В., Ребецкий Ю.Л.* Плотностные неоднородности, тектоника и напряжения Андийской субдукционной зоны на 21 град. ю.ш. II. Тектонофизическая модель // Физика Земли. 2001. № 2. С.23–35.
- Baranov A.A.* A New Model of the Earth’s Crust in Central and South Asia // *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*. 2010. V. 46, N 1. P.34–46.
- Barton P.J.* The relationship between seismic velocity and density in the continental crust – a useful constrain? // *Geophys. J. R. Astron. Soc.* 1986. V.87. P.195–208.
- Bassin C., Laske G., Masters G.* The Current Limits of Resolution for Surface Wave Tomography in North America // *EOS Trans AGU*. 2000. Abstract F897. (<http://mahi.ucsd.edu/Gabi/rem.html>)
- Bird P.* Testing hypothesis on plate-driving mechanisms with global lithosphere models including topography, thermal structure and faults // *J. Geophys. Res.* 1998. V. 103, N B5. P.10115–110129.
- Cloethingh S., Burov E.* Thermomechanical structure of European continental lithosphere: constraints from rheological profiles and EET estimates // *Geophys. J. Int.* 1996. N 124. P.695–723.
- Drucker D.C., Prager W.* Soil mechanics and plastic analysis of limit design // *Q. Appl. Math.* 1952. V. 10, N 2. P.157–175.
- Forsyth D.W.* Comparison of mechanical Models of oceanic lithosphere // *J. Geophys. Res.* 1980. V. 85, N B11. P.6364–6368.
- Laske G., Masters G.* A Global Digital Map of Sediment Thickness // *AGU*. 1997. V. 78, abstract F483.

- Manglik A., Thiagarajan S., Mikhailova A.V., Rebetsky Yu.* Finite element modeling of elastic intra-plate stresses due to heterogeneities in crustal density and mechanical properties for the Jabalpur earthquake region, Central India // *J. Earth System Science*. 2008. V. 117, N 2.
- Mercier J.C.* Magnitude of the Continental Litosphere Stresses Inferred from Rheomorphic Petrology // *J. Geophys. Res.* 1980. V. 85, N. B11. P.6293–6303.
- Pauselli C., Federico C.* Elastic modeling of the Alto Tiberina normal fault (Central Italy): geometry and litological stratification influences on the local stress field // *Tectonophysics*. 2003. N 347. P.99–113.
- Schubert G., Turcotte D.L., Olson P.* Mantle Convection in the Earth and Planets. Cambridge Univ. Press, 2001. 940 p.
- Vlasov A.N., Mnushkin M.G., Yanovsky Yu.G.* Objectoriented Approach in Programming of Finite Element Method // *Proceedings of the Third International Conference on Advances of Computer Methods in Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* / Ed. S.A. Yufin. A.A. Balkema Publ. Co, 2000. P.367–372.
- Vlasov A.N., Yanovsky Yu.G., Mnushkin M.G., Popov A.A.* Solving geomechanical problems with UWay FEM package // *Computational Methods in Engineering and Science* / Ed. V.P. Iu. Taylor & Francis, 2004. P.453–461.

Сведения об авторах

ПОГОРЕЛОВ Виталий Викторович – научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123995, ГСП-5, Москва, Д-242, ул. Большая Грузинская, д. 10. Тел.: +7(499)2542318. E-mail: vpogorelov@list.ru

БАРАНОВ Алексей Андреевич – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123995, ГСП-5, Москва, Д-242, ул. Большая Грузинская, д. 10. Тел.: +7(499)2542318. E-mail: baranov@ifz.ru

GRAVITY STRESSES IN THE CENTRAL ASIA CRUST

V.V. Pogorelov, A.A. Baranov

Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Abstract. Stresses induced by gravity inhomogeneities in the crust of Central Asia were calculated. Basic model consists of 5 layers: 3 layers of solid crust, lithospheric mantle and asthenosphaera. Sediment basins are included as an additional pressure on the surface of basement. Rheological parameters were calculated using seismic velocity data. Regional density variations in the crust lead to significant variations for transition depth from elastic to plastic deformations.

Keywords: gravity stresses, crustal model of Central Asia, elasto-plastic deformations, deviatoric and shear stresses, criteria of transition to plasticity.