

## ПЛОТНОСТНЫЕ НЕОДНОРОДНОСТИ И НАПРЯЖЕНИЯ В ЗЕМНОЙ КОРЕ ЦЕНТРАЛЬНЫХ КУРИЛ

*Р.Г. Кулинич, Е.Б. Осипова, М.Г. Валитов*

ФГБУН Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, ул. Балтийская 43,  
г. Владивосток, 690041; e-mail: [rkulinich@mail.ru](mailto:rkulinich@mail.ru); [osipov@poi.dvo.ru](mailto:osipov@poi.dvo.ru); [valitov@poi.dvo.ru](mailto:valitov@poi.dvo.ru)

Поступила в редакцию 7 декабря 2018 г.

Выполнен расчет полей гравитационных напряжений в земной коре Центральные Курил, вызванных ее плотностной неоднородностью. Выявлен общий тренд пространственного изменения поля напряжений и его локальные возмущения, обусловленные структурно-плотностной дифференциацией коры. Сделан вывод о существовании в коре участков с гравитационной неустойчивостью. Показано, что гипоцентры Симуширских землетрясений 2006–2007 гг. располагались в зонах локальных возмущений поля напряжений и гравитационной неустойчивости, что могло способствовать возникновению этих событий.

**Ключевые слова:** земная кора, плотностная неоднородность, гравитационная неустойчивость, поле напряжений, Симуширские землетрясения, Центральные Курилы.

### ВВЕДЕНИЕ

В течение ряда лет Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН (ТОИ ДВО РАН) исследовал геофизические характеристики, блоковую структуру и глубинное строение фронтального склона Центральные Курил с целью выяснения их особенностей в связи с длительным сейсмическим затишьем, а затем сильными Симуширскими землетрясениями, произошедшими в 2006–2007 гг.

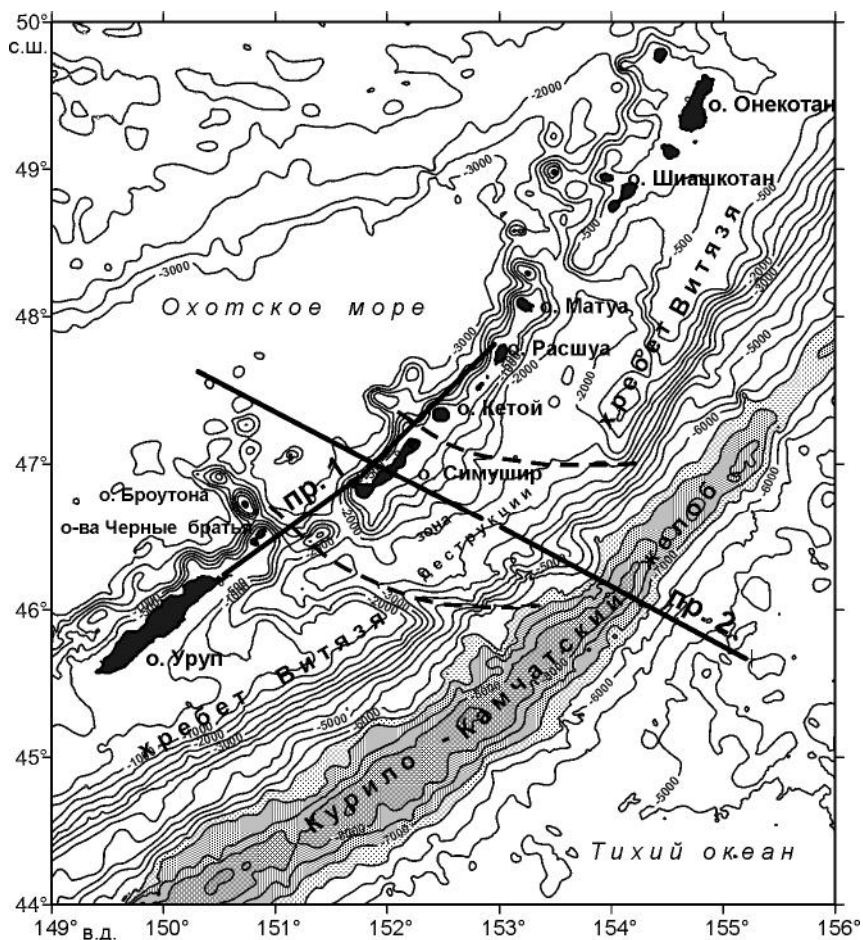
По результатам экспедиций, выполненных в период 2005–2010 гг., здесь была обнаружена поперечная зона рифтогенного типа [10, 13], разрушившая преддуговой подводный хребет Витязя и прогиб, отделяющий его от Курильской островной гряды (рис. 1). По результатам исследований наметилась пространственная корреляция Симуширских землетрясений с блоковой структурой разрушенного хребта, выявленной по геофизическим данным [11].

Для выяснения причин указанной корреляции был выполнен анализ роли гравитационных сил и плотностной неоднородности в создании поля напряжений в указанной блоковой структуре и земной коре изучаемого района. При этом имелось в виду, что гравитационная составляющая в общем поле напряжений, вызванных другими геодинамическими процессами, могла стать дополнительным триггером указанных землетрясений.

Надо отметить, что гравитационные силы давно рассматриваются как один из источников формирования полей напряжений в геологической среде, а термогравитационная неустойчивость считается важным источником глубинного теплопереноса и формирования полей напряжений в мантии и коре [21]. Вопрос о количественном изучении напряжений, обусловленных плотностными неоднородностями, был поставлен М.В. Гзовским [3]. В целом, этой проблеме посвящено, кроме упомянутых, достаточно много работ, характеризующихся разными подходами и технологиями решения задач в рамках указанной проблемы [1, 2, 4, 5, 9, 14, 15, 19, 22–25, 27, 28 и др.].

Для расчета поля гравитационных напряжений в коре исследуемого района нами использованы две плотностные модели [12], полученные по результатам глубинных сейсмических исследований (ГСЗ, МОВЗ, МОВ-НСП), выполненных в 80-е годы прошлого столетия Институтом морской геологии и геофизики ДВО РАН (ИМГиГ ДВО РАН) на двух профилях [6–8]. Их положение показано на рисунке 1.

Указанными исследованиями выявлена сложная скоростная и слоисто-блоковая структура земной коры. Плотностные модели, построенные на базе указанных сейсмических профилей [12], демонстрируют такую же сложную и контрастную плотностную структуру земной коры (рис. 2 а, 3 а).



**Рис. 1.** Основные морфоструктуры Центральных Курил и их флангов.

Профили ГСЗ показаны жирными линиями с номерами. Штриховыми линиями обозначена зона тектонической деструкции подводного хребта Витязя и прогиба, отделяющего хребет от Курильской островной гряды. Изолиниями обозначены изобаты морского дна (м).

#### МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для расчета и анализа поля напряжений, возникающих в геологической среде с неоднородной плотностной дифференциацией, Е.Б. Осиповой разработан алгоритм соответствующего математического моделирования. Подробное изложение постановки задач, аналитического решения и технологии моделирования описаны в ее предшествующих работах [16–18].

В рамках указанного алгоритма в качестве исходной модели, использованной для расчета полей напряжений, был принят сжимаемый полый гиперупругий шар (3D-модель), в котором выделен слой, имитирующий литосферу мощностью 35 км. Упругие свойства и внутренняя способность к деформированию этого слоя описываются физическим законом состояния в форме потенциала Мурнагана [30]. В модельной постановке [18] использовались значения упругой постоянной  $\eta$ , коэффициента жесткости  $\mu$ , плотности  $\sigma$  и ускорения силы тяжести  $g$ , характеризующие четыре слоя верхней части литосферы мощностью 35 км известной параметрической модели РЕМ-О А.М. Дзевонского (РЕМ-О, А.М. Dziewonski et al [29]). Для получения устойчивого численного

решения модельной задачи рассчитаны и использованы средневзвешенные по мощности указанных четырех слоев значения: упругой постоянной  $\eta = 54.777$  ГПа, коэффициента жесткости  $\mu = 53.837$  ГПа, плотности  $\sigma = 3097.839$  кг/м<sup>3</sup>, ускорения силы тяжести  $g = 9.839$  м/с<sup>2</sup>.

Модель литосферы с указанными параметрами должна характеризоваться малыми напряжениями и деформациями, обусловленными действием массовых сил в однородном гравитационном поле. Указанное состояние является устойчивым и рассматривается в качестве невозмущенного, сохраняющегося до начала действия внешних сил различного происхождения [14].

Как известно, напряжения в геологической среде возникают под воздействием нескольких факторов, куда входят: гравитационные силы, являющиеся результатом плотностной неоднородности литосферы и мантии; деформации, вызванные боковым давлением со стороны зон конвергенции литосферных плит; касательные усилия со стороны подстилающей мантии; действие остаточных напряжений. В нашем случае рассматривается только первый фактор: плотностная неоднородность геологической среды, гравитацион-

ные силы как следствие этой неоднородности и напряжения, возникающие в этих условиях.

Источником таких сил в верхней части литосферы района Центральных Курил принята плотностная неоднородность земной коры профилей 1 и 2, «встроенная» в исходную параметрическую модель Земли. Введение плотностной дифференциации, отличающейся от параметрической, дает эффект дополнительного «возмущения» поля напряжений и формирование соответствующего напряженно-деформированного состояния среды.

Как следует из сказанного выше, для расчетов поля напряжений выполнено решение трехмерной задачи, поэтому получаемые в данном случае значения напряжений в пределах используемых плотностных моделей должны содержать влияние и окрестных масс, располагающихся вне плоскости двумерных плотностных разрезов. Это дает более адекватную картину величины и структуры поля напряжений, нежели результаты подобных расчетов, использующих двумерное моделирование.

Для определения результирующего напряженно-го состояния, вызванного гравитационными силами, по заданному полю распределения плотностей  $\sigma_0 \pm \Delta\sigma$  и принятым реологическим параметрам (упругая постоянная –  $\eta$ , коэффициент жесткости –  $\mu$ ) нами использована интенсивность напряжений – положительная функция, включающая 9 компонент несимметричного тензора напряжений Пиола-Кирхгофа в текущей точке, заданная формулой:

$$T_u = \frac{1}{\sqrt{2}} \times \sqrt{(t_{rr} - t_{jj})^2 + (t_{jj} - t_{ll})^2 + (t_{ll} - t_{rr})^2 + 3(t_{rj}^2 + t_{jl}^2 + t_{rl}^2 + t_{lr}^2 + t_{lj}^2 + t_{jr}^2)},$$

где  $t_{rr}, t_{\varphi\varphi}, t_{\lambda\lambda}, t_{r\varphi}, t_{r\lambda}, t_{\varphi\lambda}, t_{\lambda r}, t_{\varphi r}, t_{\lambda\varphi}$  – компоненты указанного тензора напряжений в расчетной точке в системе координат:  $r$  – радиус,  $\varphi$  – широта и  $\lambda$  – долгота. Из них 3 диагональные компоненты – нормальные напряжения ( $t_{rr}, t_{\varphi\varphi}, t_{\lambda\lambda}$ ), остальные 6 компонент – касательные ( $t_{r\varphi}, t_{r\lambda}, t_{\varphi r}, t_{\lambda r}, t_{\varphi\lambda}, t_{\lambda\varphi}$ ).

Для определения составляющих напряженного состояния (растяжение, сжатие, сдвиг) тензор напряжений Пиола-Кирхгофа разлагается на шаровую, девиаторную и несимметричную части. Шаровая часть тензора напряжений характеризует равномерное всестороннее растяжение (сжатие), при котором изменяется элементарный объем в данной точке без изменения формы. Девиатор напряжений определяет отклонение напряженного состояния от всестороннего растяжения (сжатия) и характеризует состояние сдвига, при котором изменяется форма без изменения объема.

Расчет напряжений выполнен с участием всех объектов, для которых были заданы численные значения плотности, включая слой воды и донные осадки.

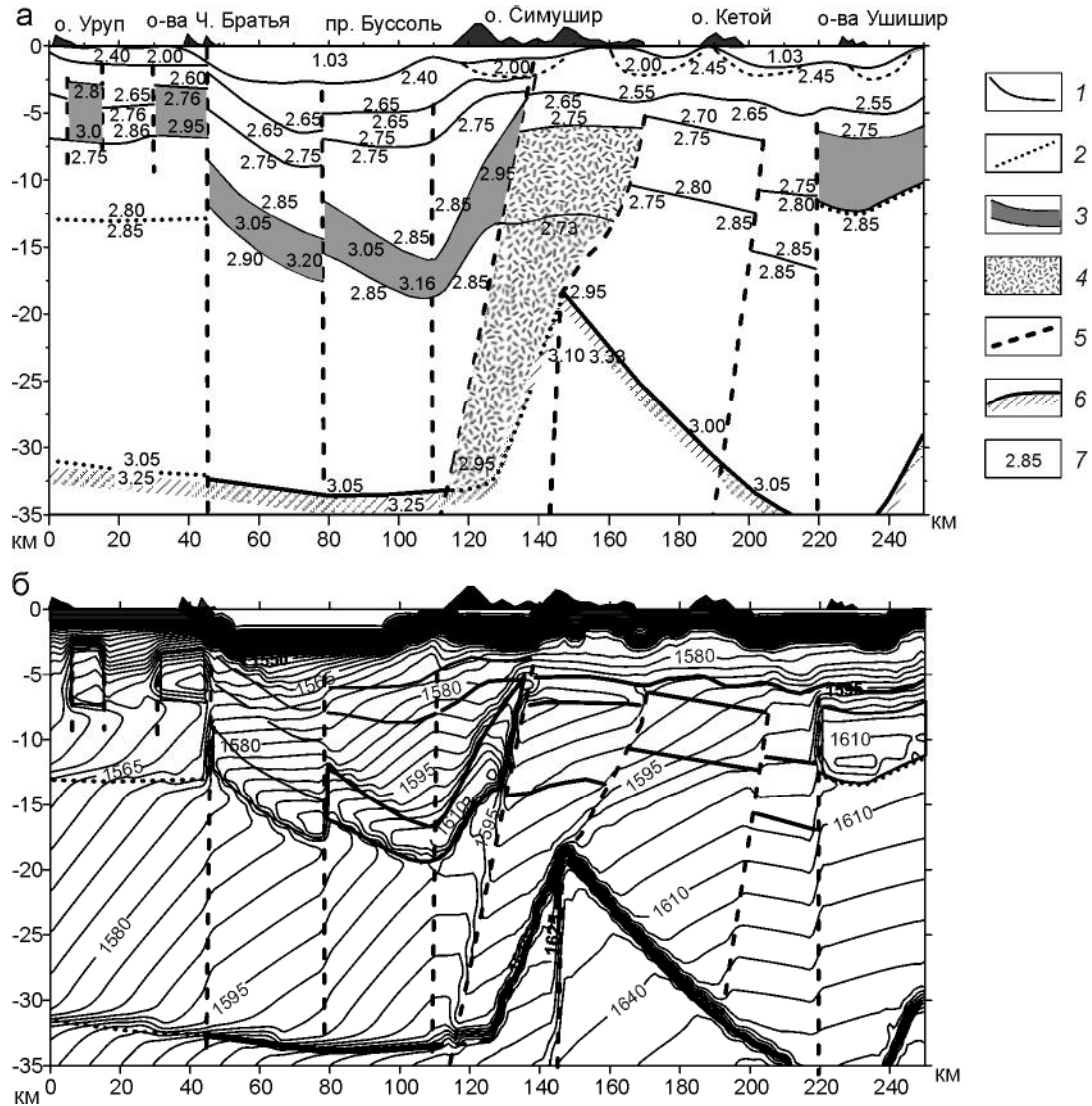
Для расчетов нерегулярное пространственное распределение значений плотности в каждом разрезе было преобразовано путем интерполирования в регулярную сетку со стороной  $0.5 \times 0.5$  км. Недостаточно плотное определение сейсмических скоростей вызвало необходимость предварительного разбиения «пустого» пространства на дополнительные плотностные блоки, характеристики которых определены путем интерполяции значений плотности в узлах регулярной сетки. Прежде всего, это касается профиля 2, в средней и нижней коре которого оказалось большое пространство без определения сейсмических скоростей, а, следовательно, и значений плотности. В окончательной модели границы этих вспомогательных блоков не показаны, оставлены только плотностные границы, рассчитанные по сейсмическим данным.

Используя указанную технологию, мы рассчитали поля интенсивности напряжений (ГПа) в плоскости обсуждаемых плотностных разрезов.

**Профиль 1.** Разрез этого профиля отличается аномально контрастным распределением плотности геологических масс и сложной структурой плотностных границ, что отмечалось в предшествующих статьях, посвященных плотностному моделированию коры в районе Центральных Курил [12, 20]. Это делает данный профиль показательным примером источника возникновения гравитационных напряжений в геологической среде, вызванных ее структурно-плотностной (структурно-вещественной) неоднородностью. Рисунок 2 отчетливо иллюстрирует указанную связь.

В верхней части рисунка (а) помещена исходная плотностная модель рассматриваемого профиля, ограниченная по глубине до 35 км; в нижней (б) – поле интенсивности напряжений, рассчитанное по этой плотностной модели.

Полученные результаты показывают практически полное совпадение структуры плотностной неоднородности со структурой поля напряжений, что свидетельствует об их взаимосвязи. Основным плотностным границам, нанесенным на поле интенсивности напряжений, соответствуют линейные зоны изменения уровня и ориентировки напряжений (линейные зоны горизонтальных градиентов поля напряжений). Скорость этого изменения (величина градиента) зависит от величины разности плотностей на границах блоков. Изменение ориентировки изолиний поля напряжений является результатом бокового динамического взаимодействия (давления) плотностных блоков.



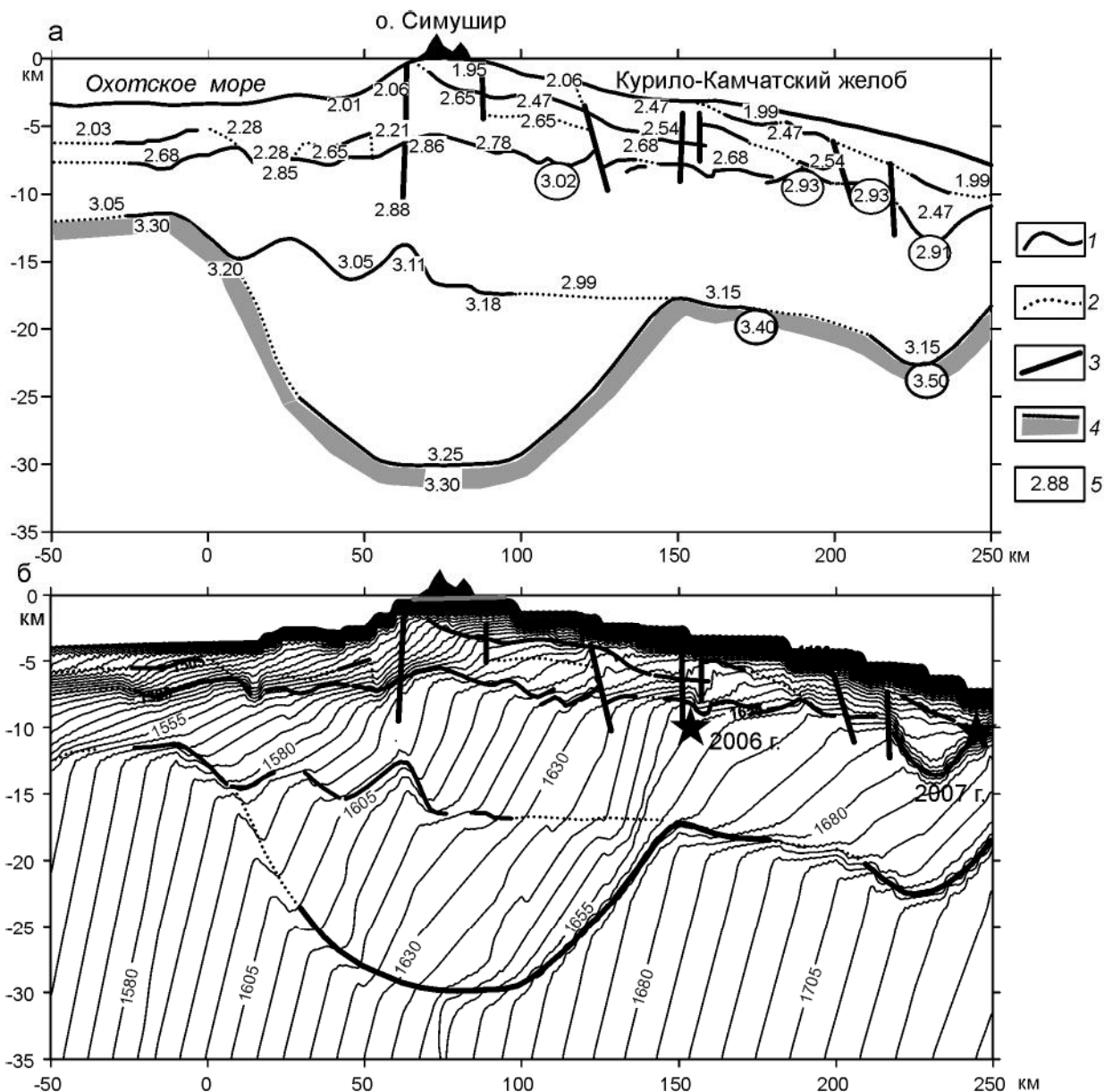
**Рис. 2.** Плотностная модель [12] (а) и поле интенсивности гравитационных напряжений (б, ГПа), вызванных структурно-плотностной неоднородностью земной коры профиля 1 [6].

1 – скоростные границы, трансформированные в границы блоков и слоев с разной плотностью; 2 – дополнительные плотностные границы, внесенные в модель, где отсутствовали сейсмические данные; 3 – блоки и слои в верхней коре с anomalно высокой плотностью; 4 – блок с anomalно низкой плотностью; 5 – границы скоростных блоков, отождествляемые с разломами, по [8]; 6 – граница Мохоровичича; 7 – значения плотности ( $\text{г/см}^3$ ).

Структура поля напряжений включает в себя как общие тренды пространственного распределения вычисленного параметра, так и его локальные вариации. Так, массам с высокой плотностью соответствуют максимальные значения интенсивности напряжений. В соответствии с этим наблюдается общее уменьшение напряжения от мантии к поверхности. К этому добавляется общее уменьшение напряжения и вдоль профиля: с северо-востока на юго-запад. Например, в основании коры (35 км) интенсивность напряжения изменяется от 1600 ГПа на юго-западе профиля до 1678 ГПа на его северо-восточной оконечности.

Причиной этого, видимо, является асимметричное распределение в коре геологических масс с разной плотностью: на северо-востоке профиля (восточнее 130 км) располагается большой объем плотных масс, чем на юго-западе. Этому, возможно, способствует располагающийся в интервале 130–210 км anomalно высокий выступ мантии, выявленный сейсмическими работами [7, 8]. Причины его возникновения пока не ясны.

На указанный фон накладываются локальные возмущения поля напряжений, обусловленные внутренней структурно-плотностной дифференциацией



**Рис. 3.** Плотностная модель (а) и поле интенсивности гравитационных напряжений (б, ГПа), вызванных структурно-плотностной неоднородностью земной коры профиля 2 [6].

1 – скоростные границы, трансформированные в границы блоков и слоев с разной плотностью; 2 – дополнительные плотностные границы, внесенные в модель, где отсутствовали сейсмические данные; 3 – разломы, выделенные по сейсмическим данным [8]; 4 – граница Мохоровичича, 5 – значения плотности ( $\text{г/см}^3$ ). Звездочками обозначены гипоцентры Симуширских землетрясений 2006–2007 гг., кружками – anomalно высокие плотности в коре и на границе Мохо.

коры. Величина разности в плотностях на границах блоков и слоев создает пропорциональный скачок напряжений. По этому признаку наиболее четко выделяется граница Мохо, а также блоки и слои в верхней части земной коры с anomalно высокой плотностью под проливом Буссоль и юго-западной частью о. Симушир ( $3.05\text{--}3.20 \text{ г/см}^3$  и  $3.05\text{--}3.16 \text{ г/см}^3$ ). Коровые блоки с аналогично высокой плотностью под островами Уруп и Черные Братья ( $2.80\text{--}3.00 \text{ г/см}^3$  и  $2.76\text{--}2.95 \text{ г/см}^3$ ) и

блок под островами Ушишир ( $2.75\text{--}3.00 \text{ г/см}^3$ ) отражены локальными максимумами напряжений. Понижением поля напряжений отмечается субвертикальный блок с низкой плотностью ( $2.60\text{--}2.95 \text{ г/см}^3$ ), располагающийся под о. Симушир и пересекающий геологическую среду с глубины  $\approx 6$  км до основания коры.

**Профиль 2.** Плотностная характеристика этого профиля (рис. 3 а) отличается от предшествующей модели. В отличие от плотностного разреза профиля

1 здесь нет участков с явной инверсией этого параметра. Однако этот фактор, возможно, имеет место, поскольку в юго-восточной части профиля, располагающейся в пределах фронтального склона Курильской гряды, в кровле нижней коры, в интервале глубин  $\approx 8\text{--}14$  км, зафиксированы очень высокие плотности, положение которых было бы уместным на границе коры и мантии. Примечательно, что здесь же и в кровле мантии зафиксированы плотности, отличающиеся от «нормальных». На рисунке 3 а все они выделены кружками (3.02; 2.93; 2.91 г/см<sup>3</sup> – в коре и 3.40; 3.50 г/см<sup>3</sup> – в мантии).

Как и на профиле 1, здесь зафиксировано достаточно активное поле интенсивности напряжений, коррелирующееся с плотностной дифференциацией разреза. Это хорошо видно на рисунке 3 б, где поле напряжений совмещено с плотностными границами, перенесенными сюда с рисунка 3 а. Как видно, все основные плотностные границы отражены деформациями поля напряжений. В соответствии с плотностной структурой поле напряжений разбивается на ряд блоков, каждому из которых соответствует своя характеристика действующего напряжения. В качестве границ таких блоков приняты те же характеристики поля напряжений, что и на профиле 1.

В структуре поля интенсивности напряжений, как и на профиле 1, видны общие закономерности: величина напряжений уменьшается от мантии к поверхности и вдоль профиля – от глубоководного желоба в сторону Курильских островов. Диапазон изменения интенсивности напряжений в основании разреза (35 км) составляет от 1732 ГПа на юго-восточной оконечности профиля до 1568 ГПа – на его северо-западе. В данном случае источником такого тренда вполне определенно можно назвать боковое давление подвигающейся Тихоокеанской плиты, создающее зону сжатия, повышение плотности геологической среды в пределах приостровного склона Курильского желоба и, как следствие, возникновение зоны повышенных напряжений. По мере удаления от указанной зоны в сторону Охотского моря, величина этих напряжений, естественно, должна уменьшаться, что мы и наблюдаем.

На этот общий план накладываются те деформации поля напряжений, которые связаны с плотностной дифференциацией слоисто-блоковой структуры коры. Некоторые деформации поля вне обозначенных плотностных границ связаны с вышеупомянутыми дополнительными плотностными блоками, которые были введены в процессе моделирования и не показаны в обсуждаемых результативных моделях, поскольку не подтверждены сейсмическими данными.

Поскольку профиль 2 располагается в зоне Симуширских землетрясений 2006–2007 гг., уместно оценить их возможную связь с рассчитанным полем напряжений. На рисунке 3 б показано положение гипоцентров этих землетрясений, спроецированных на плоскость профиля 2. Как видно, очаги обоих землетрясений располагались в зонах локальных деформаций поля напряжения, где изменяется как величина, так и ориентировка векторов напряжений. В таких зонах, на наш взгляд, создаются условия гравитационной неустойчивости, что должно способствовать развитию здесь пликативных и дизъюнктивных деформаций при воздействии дополнительных внешних сил. Это, в свою очередь, может способствовать возникновению землетрясений.

Таким образом, сделанные нами расчеты дают основание предполагать, что расположение очагов Симуширских землетрясений могло быть связано с зонами гравитационной неустойчивости. Потенциал такой неустойчивости может варьировать, если к плотностной дифференциации добавляется структурный фактор земной коры. В этом отношении землетрясения 2006 и 2007 гг. возникли в разных условиях.

Очаг землетрясения 2006 г. располагался на глубине  $\approx 10$  км [8] в подошве верхней коры фронтального склона Курильской островной гряды, в зоне разломов. Под очагом, на глубине  $\approx 17$  км, зафиксирован резкий подъем границы Мохо (мантийных масс) с интенсивной деформацией поля напряжений (рис. 3). Все это могло усиливать неустойчивое состояние этого участка и способствовать возникновению здесь первого Симуширского землетрясения.

Очаг землетрясения 2007 г. был приурочен к внешнему склону Курильского желоба и располагался в зоне интенсивного градиента поля напряженности, вызванного изгибом океанской литосферы, погружающейся под островную дугу. В структурном отношении этот участок менее сложен. Возникновение здесь второго Симуширского землетрясения, возможно, объясняется триггерным эффектом первого события [26].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные расчеты позволили воссоздать структуру поля гравитационных напряжений, источником которых является плотностная неоднородность земной коры в пределах сейсмических профилей, отработанных ранее ИМГиГ ДВО РАН в районе Центральных Курил. В заданных плотностных условиях в пределах обоих профилей выделяется как общий тренд пространственного изменения напряжений, так и их локальные возмущения, связанные с плотностными скачками на границах слоев и блоков, выделенных по данным сейсмических работ и гравиметрии.

На плотностных границах возникают деформации поля напряжений, выраженные изменением величины интенсивности напряжения, либо изменением направления вектора напряжений, либо тем и другим вместе в зависимости от величины скачка плотности и структуры блоковой делимости рассматриваемого участка. В таких зонах, на наш взгляд, создаются условия гравитационной неустойчивости, что должно способствовать развитию здесь пликативных и дизъюнктивных деформаций при воздействии дополнительных внешних сил. Это, в свою очередь, может способствовать возникновению землетрясений. Действительно, совмещение гипоцентров Симуширских землетрясений 2006–2007 г.г. с полем напряжений (рис. 3 б) показывает, что эти события возникли в зонах деформаций поля напряжений (в зонах гравитационной неустойчивости) или вблизи них.

Таким образом, сделанные нами расчеты дают основание предполагать, что гравитационные силы в условиях контрастной плотностной дифференциации геологической среды, которая зафиксирована в пределах рассмотренных сейсмоплотностных разрезов, были способны создать дополнительные напряжения, усиливающие общий геодинамический процесс подготовки Симуширских землетрясений.

Работа выполнена в рамках Программы ФНИ государственных академий наук на 2013–2020 г.г., п. 70, тема 3: «Пространственно-временные изменения геофизических полей, их связь со структурой, геодинамикой и сеймотектоническими процессами в литосфере дальневосточных морей России и их обрамлении».

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Актуальные вопросы современной геодинамики Центральной Азии / Отв. ред. К.Г. Леви, С.И. Шерман. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2005. 297 с.
2. Артемьев М.Е., Демьянов Г.В., Кабан М.К., Кучериненко В.А. Гравитационное поле плотностных неоднородностей литосферы Северной Евразии. // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1993. № 5. С. 12–22.
3. Гзовский М.В. Основы тектонофизики. М.: Недра, 1975. 536 с.
4. Гольдин С.В., Суворов В.Д., Макаров П.В., Стефанов Ю.П. Структура и напряженно-деформированное состояние литосферы Байкальской рифтовой зоны в модели гравитационной неустойчивости // Геология и геофизика. 2006. Т. 7, № 10. С. 1094–1105.
5. Гуревич, Г.И. Об исходных предпосылках подхода к моделированию в тектонике // Некоторые вопросы механики деформированных сред. М.: Изд-во АН СССР, 1959. С. 75–144.
6. Злобин Т.К., Злобина Л.М. Строение земной коры Курильской островной системы // Тихоокеан. геология. 1991. № 6. С. 24–35.
7. Злобин Т.К., Костюкевич С.А., Злобина Л.М. Структура земной коры средних Курил по данным сейсмического моделирования // Тихоокеан. геология. 1998. Т. 17, № 2. С. 115–121.
8. Злобин Т.К. Первые результаты сопоставления катастрофических Симуширских землетрясений 15 ноября 2006 г. (M=8,3) и 13 января 2007 г. и глубинного строения земной коры Центральных Курил // Докл. АН. 2008. Т. 420, № 1. С. 111–115.
9. Кабан М.К., Юнга С.Л. К вопросу о влиянии плотностных неоднородностей на напряженное состояние и сейсмичность литосферы Байкала // Докл. АН. 2000. Т. 371. С. 527–531.
10. Кулинич Р.Г., Карп Б.Я., Баранов Б.В. и др. О структурно-геологической характеристике «сейсмической брешы» в центральной части Курильской островной гряды // Тихоокеан. геология. 2007. Т. 26, № 1. С. 5–19.
11. Кулинич Р.Г., Валитов М.Г., Прошкина З.Н. Геофизические поля, блоковая структура и сейсмическая активность Центральных Курил // Тихоокеан. геология. 2012. Т. 31, № 6. С. 35–43.
12. Кулинич Р.Г., Валитов М.Г., Прошкина З.Н. Сравнительный анализ сейсмических и плотностных моделей земной коры Центральных Курил // Тихоокеан. геология. 2015. Т. 34, № 6. С. 45–56.
13. Лаверов Н.П., Лаппо С.С., Лобковский и др. Центрально-Курильская «брешь»: строение и сейсмический потенциал // Докл. АН. 2006. Т. 408, № 6. С. 1–4.
14. Лурье А.И. Теория упругости. М.: Наука, 1970. 939 с.
15. Нерсесов И.Л., Артемьев М.Е., Досымов А. Выделение плотностных неоднородностей литосферы высокогорных районов Средней Азии по данным гравиметрии и сейсмологии // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1975. № 5. С. 16–24.
16. Осипова Е.Б. Исследование устойчивости равновесия сжимаемого гиперупругого полого шара // Прикладная механика и техническая физика. 2015. Т. 56, № 4. С. 160–169. DOI: 10.15372/PMTF20150415.
17. Осипова Е.Б. Устойчивость равновесия сжимаемого шара // Вычислительные технологии. 2015. Т. 20, № 6. С. 59–71.
18. Осипова Е.Б. Модельное исследование внутреннего распределения неоднородных полей напряжений в земной коре // Физическая мезомеханика. 2016. Т. 19, № 6. С. 94–100.
19. Погорелов В.В., Баранов А.А. Гравитационные напряжения в земной коре Центральной Азии // Геофизические исследования. 2010. Т. 11, № 3. С. 72–84.
20. Прошкина З.Н., Кулинич Р.Г., Валитов М.Г. Структура, вещественный состав и глубинное строение океанского склона Центральных Курил: новые детали // Тихоокеан. геология. 2017. Т. 36, № 6. С. 44–55.
21. Ребецкий Ю.Л. Влияние упругой сжимаемости мантии на термогравитационную конвекцию. Конвективная неустойчивость гравитационного напряженного состояния // Докл. АН. 2011. Т. 440, № 2. С. 250–255.
22. Ребецкий Ю.Л. Об одном неучтенном источнике энергии тектонических процессов // Вестн. КРАУНЦ. 2013. № 1. Вып. 21. С. 133–137.
23. Ребецкий Ю.Л. О неустойчивости слоистых сред в гравитационном поле напряжений // Докл. АН. 2014. Т. 457, № 2. С. 217–221.
24. Романюк Т.В., Ребецкий Ю.Л. Плотностные неоднородности, тектоника и напряжения Андийской субдукционной

- зоны на 21° ю.ш. I. Геофизическая модель и тектоника // Физика Земли. 2001. № 2. С. 36–57.
25. Сеначин В.Н., Баранов А.А. Гравитационные аномалии коры и верхней мантии Центральной и Южной Азии // Геодинамика и тектонофизика. 2016. Т. 7, № 4. С. 513–528. DOI: 10.5800/GT-2016-7-4-0220.
26. Томилин Н.Г. Парные землетрясения на Курилах // Тихоокеан. геология. 2009. Т. 28, № 5. С. 64–69.
27. Трубицин А.П., Карасев А.А. Упругое напряжение, связанное с неровностями плотностных границ раздела в Земле // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1979. № 12. С. 15–22.
28. Assameur D.M., Mareshal J.-C. Stress induced by topography and crustal density heterogeneities: implication for seismicity of southeastern Canada // Tectonophysics. 1995. 241. P. 179–192.
29. Dziewonski A.M., Hales A.L., Lapwood E.R. Parametrically simple Earth models consistent with geophysical data // Phys. Earth Planet. Inter. 1975. V. 10, N 1. P. 12–48.
30. Murnaghan F.D. Finite deformation of an elastic solid. New York: Wiley, 1951. 140 p.

*Рекомендована к печати В.Б. Каплуном*  
 после доработки 25.07.2019 г.  
 принята к печати 13.11.2019 г.

***R.G. Kulinich, E.B. Osipov, M.G. Valitov***

### **Density inhomogeneities and stresses in the Earth's crust in the Central Kuriles**

The gravitational stresses caused by the density inhomogeneity in the Earth's crust in the Central Kuriles area are calculated. The general trend of the spatial variation of the stress field and its local perturbations due to the structural and density differentiation of the Earth's crust were revealed. A conclusion was made of the existence of areas with gravitational instability in the crust. It is shown that the hypocenters of the Simushir earthquakes of 2006–2007 located in the zones of local perturbations of the stress field and gravitational instability. This could have contributed to the occurrence of these events.

***Key words:* Earth's crust, density inhomogeneity, gravitational instability, stress field, Simushir earthquakes Central Kuriles.**