

ГЕОФИЗИКА

УДК [550.34.01.4:551.242](571.61/62)

ГЕОМЕХАНИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРИАМУРЬЯ И ЕЕ СЕЙСМОТЕКТОНИЧЕСКИЕ СЛЕДСТВИЯ

Ф.Г. Корчагин*, **Л.А. Маслов****, **О.С. Комова****

**Институт тектоники и геофизики ДВО РАН, г. Хабаровск*

***Вычислительный центр ДВО РАН, г. Хабаровск*

В статье рассмотрена геомеханическая модель Приамурья, построенная на основе плотностной модели, с учетом сейсмичности и механизмов очагов землетрясений. Показано, что границы между Амурским, Алдано-Становым и Охотморским геоблоками, Буреинским массивом и Сихотэ-Алинской складчатой системой прослеживаются непрерывно в земной коре и верхней мантии. С ними связана и основная сейсмичность района. Показано различие в строении верхней мантии и земной коры. Установлено наличие в литосфере горизонтов, различающихся по скорости вязкого течения вещества. Отмечено, что в отличие от Станового линейности Монголо-Охотский и Танлу не отражаются в структуре вязкого течения вещества земной коры, что, вероятно, служит признаком их молодого возраста.

Ключевые слова: Приамурье, плотностное и геомеханическое моделирование, сейсмотектоника.

ВВЕДЕНИЕ

Под геомеханикой, как и в горной геомеханике, мы понимаем деформации и взаимное перемещение геологических тел или их частей, в отличие от геодинамики, под которой понимается широкий круг процессов, ведущих к преобразованию земных оболочек. Поэтому, по нашему мнению, термин геомеханика больше соответствует работе, в которой рассматривается вязкое течение вещества земной коры.

В тектоническом отношении главной особенностью Приамурья, как и юга Дальнего Востока России в целом, является торцевое сочленение двух крупнейших складчатых поясов Земли - Центрально-Азиатского и Тихоокеанского. При этом восточная часть Центрально-Азиатского пояса ограничена с севера и юга древними жесткими глыбами Сибирской и Северо-Китайской платформ [2].

Окраина Сибирской платформы на рассматриваемой территории сложена катархейскими, архейскими и протерозойскими породами Алдано-Станового щита. Структурными элементами Центрально-Азиатского пояса являются Аргуно-Мамынский и Цзямусы-Буреинский массивы, сложенные архейскими и протерозойскими метаморфизованными породами и палеозойские складчатые системы. Между

окраиной Сибирской платформы и структурами Центрально-Азиатского пояса располагаются интенсивно деформированные образования Монголо-Охотской складчатой системы, сложенные мезозойскими турбидитами и кремнисто-глинистыми отложениями палеозойского возраста с ассоциирующимися с ними телами гипербазитов и габброидов. На востоке Монголо-Охотская система (Галамский сегмент) граничит с Сихотэ-Алинской складчатой системой, относящейся к Тихоокеанскому складчатому поясу. Последняя сложена верхнепалеозойскими-мезозойскими терригенно-кремнистыми породами. Границы между всеми вышеназванными структурными зонами носят разломный характер [2, 4].

Приамурье относится к сейсмически активным регионам Дальнего Востока. Здесь известен ряд сейсмоактивных зон, в пределах которых в историческое время и за период инструментальных наблюдений произошли землетрясения с M от 5.0 до 6.5 [9]. Анализ строения и геодинамики региона, распределения эпицентров землетрясений показывает, что большое значение при сейсмотектонических исследованиях имеют геомеханические построения [7, 9]. В связи с этим большой интерес приобретает вопрос о влиянии на сейсмичность деформационных процессов в литосфере, возникающих под воздействием ано-

мальных плотностных тел земной коры и верхней мантии в поле силы тяжести нормальной Земли. Решению этого вопроса и посвящена настоящая работа.

МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Литосфера, как и земная кора, характеризуется неравномерным распределением плотности, т.е. сложена телами с различной плотностью. Движения и дислокации этих тел происходят, кроме всего прочего, и под действием силы тяжести, т.е. вызваны собственными аномальными плотностями на фоне механически равновесного распределения плотности нормальной Земли. В зависимости от конкретной геологической обстановки – формы и размеров аномальных плотностных тел, их взаимного расположения и распределения в них плотности – в материальной среде генерируются напряжения и деформации, распределение которых и определяет ее механическую эволюцию [6].

Безусловно, на напряженно-деформированное состояние влияют как внутренние объемные силы от аномальных плотностей, так и внешние. В данной работе мы остановились только на внутренних силах. Для этого необходима плотностная модель.

Нами использована трехмерная плотностная модель (фондовые материалы), построенная в 1987 г. Ю.Я. Ващиловым и Э.Л. Рейнлибом по методике, изложенной в работе [1].

Учитывая масштаб модели (1:2 500 000) и возможности вычислительных мощностей, шаг оцифровки был выбран 25 км (или 1 см на плане). Размер области исходных данных составил 1600×1600 км и 65 км по глубине. Значения плотности с указанным шагом были заданы на пяти горизонтальных срезах, расположенных на глубинах 10, 20, 30, 40 и 60 км. Каждый срез содержал 64×64=4096 точек с расчетными значениями плотности. Отметим некоторые особенности исходной трехмерной модели. Участки с аномально высокой плотностью выделяются только в первом слое, и один расположен в пределах Алданского щита (2,75 г/см³), второй – в районе побережья Охотского моря (3,07 г/см³). В первом случае на дневной поверхности обнажаются нижнеархейские породы Алданского щита, во втором – меловые образования Охотско-Чукотского вулканогенного пояса. С глубиной контрастность распределения плотности падает. Второй и третий слои качественно похожи на первый, но в них отсутствуют указанные выше аномалии плотности. Области пониженной плотности наблюдаются вдоль Сихотэ-Алиня и разлома Танлу. В целом, распределение плотности отвечает существующим представлениям о глубинном строении

рассматриваемого региона и не противоречит другим независимым данным.

На основе модели расчетной плотности среды определялись значения аномальной плотности. Для этого в слое рассчитывалась средняя (как среднее арифметическое) плотность по слою и затем это среднее значение вычиталось из расчетного значения плотности в каждой точке слоя. Используемая нами программа расчета напряжений и скоростей смещений по значениям плотности может работать только с данными на равномерной кубической сетке, поэтому в пределах исследуемой области была проведена интерполяция данных на равномерную кубическую сетку с шагом 10 км по линейному закону.

Для того, чтобы при расчете механических характеристик среды избежать краевых эффектов, производилась экстраполяция аномальной плотностной модели на несколько шагов за пределы исходной области. Поскольку в данном случае речь идет об аномальной плотностной модели, экстраполяция проводилась нулевыми значениями плотности. Таким путем была получена трехмерная модель распределения аномальной плотности, которая применялась для исследования механического состояния среды в исследуемом регионе.

По методике, изложенной в [6], были рассчитаны скорости смещения вещества в объеме по заданному распределению аномальной плотности в нем. Влияние рельефа как дополнительной нагрузки на данную область не учитывалось. Использовалась функция Грина задачи Миндлина. Коэффициент Пуассона был взят равным 0,5, что позволило рассматривать среду как вязкую несжимаемую жидкость. В результате расчетов было получено распределение скоростей мгновенного смещения среды, осредненных по каждому слою. Эти значения скоростей приписывались глубинным горизонтальным срезам 0,5, 15, 25, 35, 45, 55 и 65 км. Скорость смещений определена в см/год. Длина вектора на рисунке 1 пропорциональна значению скорости. Максимальный вектор на всех рисунках обозначен буквой А. Его значения даны внизу каждого рисунка. Кроме горизонтальных для глубин 5 и 25 км были рассчитаны вертикальные компоненты скорости. На соответствующих рисунках их знак и величина показаны изолиниями.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Анализ приведенных на рис. 1 значений скорости и направлений векторов позволяет установить ряд особенностей геомеханической модели Приамурья.

Первое. Скорость горизонтального течения с глубиной меняется весьма контрастно. Так, с поверхности до глубины 5 км она незначительно уменьшается (от 0,15 до 0,12 см/год), затем в интервале 5-15 км резко (в 5,5 раз) возрастает до 0,66 см/год и на следующем десятикилометровом интервале убывает

до 0,028 см/год (уменьшение в 23,5 раза). При этом генеральное направление течения вещества на указанных срезах остается постоянным. В интервале 25-35 км происходит изменение генерального направления течения вещества на противоположное. Новое

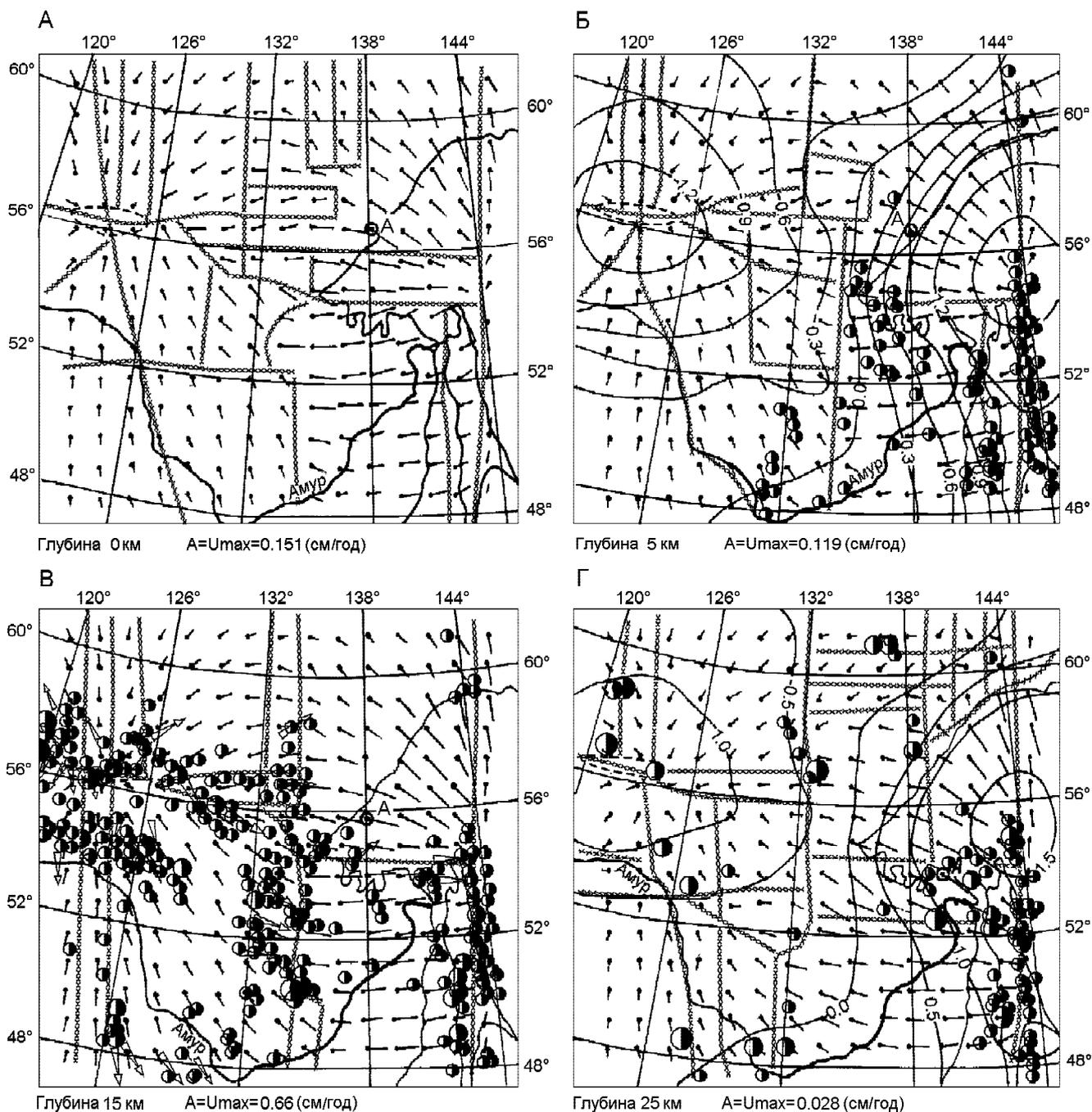
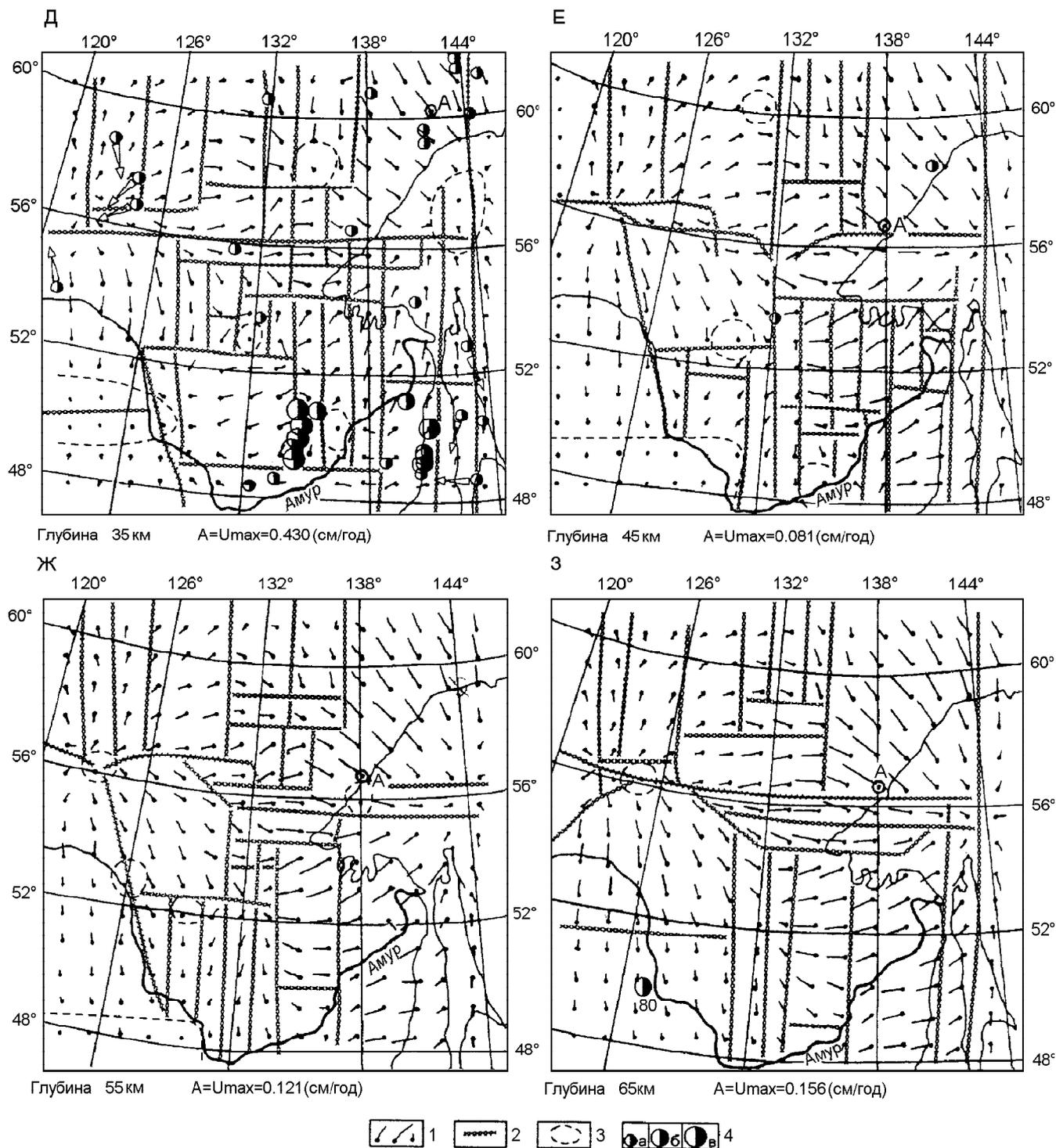


Рис. 1. Схема вязкого течения вещества литосферы и гипоцентров землетрясений по срезам 0, 5, 15, 25 35, 45, 55, 65 км.

1 - направление векторов; 2 - границы между зонами, отличающимися ориентировкой и размерами векторов; 3 - зоны с минимальными скоростями или с нисходящим и восходящим направлением движения; 4 - гипоцентры землетрясений: а - $M < 4.0$, б - $4.0 \leq M < 5.0$, в - $M \geq 5.0$. Изогипсами показано поле вертикального вязкого движения вещества в см/год.



Продолжение рис. 1.

генеральное направление сохраняется вплоть до глубины 65 км. Скорость в интервале глубин от 35 до 45 км падает от 0,43 до 0,08 см/год (в 5,3 раза), затем увеличивается до 0,156 см/год на глубине 65 км. Таким образом, применяя интерполяцию, мы можем сказать, что на глубинах 10-20 и 30-40 км скорость

течения вещества максимальна по обоим генеральным направлениям и превышает скорость в выше- и нижележащих горизонтах в 5-20 раз. Первый горизонт соответствует внутрикоровому волноводу в регионе, второй локализован в подошве земной коры. Обращает на себя внимание, что эти горизонты ли-

тосферы характеризуются более высокой сейсмичностью по сравнению с соседними. При этом, если в интервале 10-20 км сосредоточено основное количество очагов землетрясений с M от 3 до 6, то все гипоцентры с $M > 6$ сосредоточены в интервале 30-40 км.

Второе. Как уже отмечалось, в регионе устанавливаются два генеральных направления вязкого течения вещества в литосфере. Первое направление зафиксировано на глубинах от 0 до 25-30 км, второе – начиная с 35 км и глубже. В первом случае, в зоне сочленения Олекмо-Чарского плоскогорья, хребтов Станового и Каларского и Олекмо-Станового нагорья величина вектора, или скорость вязкого течения минимальна, при удалении от зоны сочленения длина векторов возрастает и векторы приобретают северо-восточное и юго-восточное направление. Далее к востоку они имеют восточное, а начиная примерно с меридиана 137° – юго-западное и юго-восточное направление, и в районе точки с координатами 55° с.ш. и 144° в.д. резко их длины уменьшаются. Первая зона минимальных скоростей соответствует району затухания Байкальского рифтового процесса [10,13] и в этой же зоне пересекаются Становой и Амуро-Олекминский разломы, выделенные в работе [3]. Восточная зона низких скоростей соответствует зоне стыка Охотоморской и Амурской плит.

В плане векторы скоростей вязкого течения вещества образуют эллипс, большая ось которого проходит примерно по 56-й параллели и в целом соответствует положению Станового разлома.

Для проверки достоверности ориентировки векторов скорости течения вещества были проанализированы механизмы очагов землетрясений [5, 11, 12] и, в первую очередь, ориентировки напряжений растяжения, т.к. они должны совпадать с векторами скорости. С учетом глубины очагов на рис.1 показаны направления растягивающих напряжений. Как видно из рисунка, получена хорошая сходимость между полученной моделью и механизмами очагов землетрясений, что подтверждает достоверность полученной модели.

Как уже отмечалось, если на глубине до 30 км векторы скоростей движений направлены с запада на восток, то, начиная с глубины 35 км, они приобретают обратное направление.

На рис. 2 приведен условный разрез земной коры и верхней мантии до глубины 65 км. Стрелками на разрезе показаны направления векторов вязкого течения, их размеры соответствуют скорости. Как видно из разреза, направления векторов образуют две конвективные ячейки, первая из которых расположена в земной коре, вторая – в верхней мантии. В работе [8] нами было показано, что в верхней мантии Азиатско-Тихоокеанской зоны перехода существует конвективное течение вещества. Как видно из

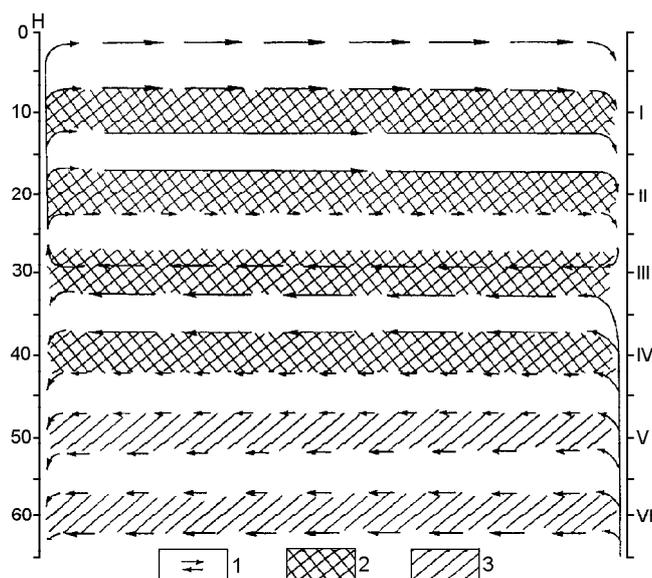


Рис. 2. Схематический геомеханический разрез литосферы.

1 - направление вектора скорости; 2 - предполагаемые зоны высоких напряжений; 3 - предполагаемые зоны повышенных напряжений.

рис. 3, направление векторов смещения в западной части конвективной ячейки совпадает с направлением соответствующих векторов в нижней части литосферы в исследуемом регионе.

Из рис. 2 хорошо видно, что на различных горизонтах земной коры и верхней мантии скорость вязкого течения различна, что приводит к формированию на границах разноскоростных горизонтов больших касательных напряжений. Вероятно этим и объясняется приуроченность подавляющего большинства гипоцентров землетрясений к горизонтам с наибольшей скоростью течения вещества и их границам (рис. 1). Необходимо отметить, что положение этих зон в целом отвечает аномальным зонам литосферы, выделяемым сейсмическими и геоэлектрическими методами [14].

При более детальном рассмотрении направления векторов скоростей горизонтальной деформации видно, что во многих случаях они отклоняются от генеральной ориентировки. Это говорит о сложном строении литосферы, т.е. она сложена разноплотными телами, деформация которых в гравитационном поле Земли и создает наблюдаемую картину. На рис. 1 на всех срезах проведены границы между предполагаемыми телами. Границы проводились по зонам резкого изменения векторов скоростей в их ориентировке или величине. Как видно, по этому признаку горизонты литосферы весьма различаются между собой. Наиболее однородно строение первых четырех (0,5, 15 и 25 км) горизонтов, особен-

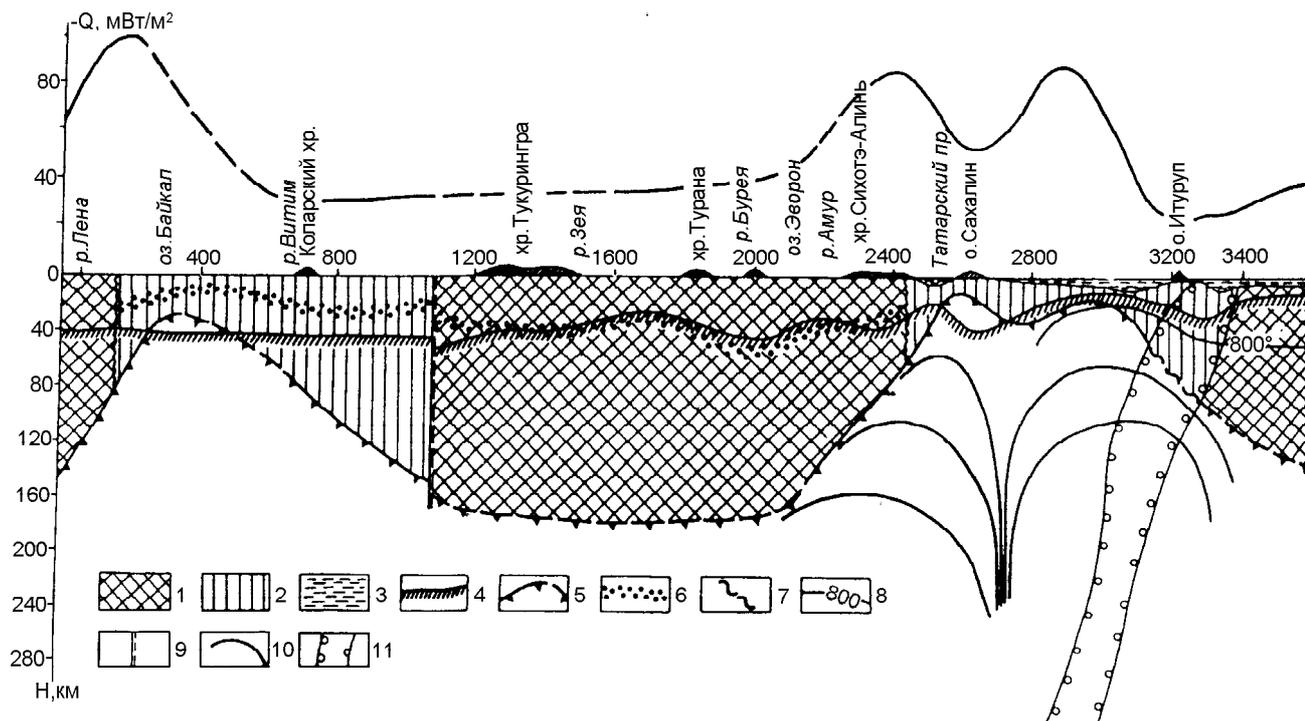


Рис. 3. Геомеханическая модель литосферы по геотранверсу оз. Байкал - р. Амур - о. Сахалин - Тихий океан (по [8, 14]).

1- области сжатия литосферы, 2-области растяжения литосферы; 3-водный слой; 4-граница Мохоровичича; 5-подошва астеносферы; 6-кровля корового высокопроводящего горизонта; 7-подошва астеносферы в пределах сейсмофокальной зоны; 8-изотерма 800° ; 9-глубинные разломы; 10-векторы вязкого течения мантийного вещества; 11-границы сейсмофокальной зоны.

но на срезе 15 км. Нижележащие горизонты имеют большую делимость. Подавляющее большинство границ имеет широтное и меридиональное направление.

Ряд выделенных границ соответствует основным тектоническим элементам региона [4]. Так, на всех срезах выделяется зона, соответствующая Становому линейменту. Эта зона характеризуется сложным строением в верхних (до 25 км) и сравнительно однообразным - в нижних горизонтах литосферы. Прослеживание Станового линеймента на большую глубину говорит о том, что он является границей литосферных блоков. Это подчеркивается и векторными картинками по всем срезам. В западном и восточном окончании этого линеймента, в участках его пересечения с субмеридиональными границами, располагаются области с минимальными скоростями течения вещества. Как видно из рис. 1в, в интервале 10-20 км описываемая граница является сейсмически активной на всем ее протяжении. Анализ механизмов очагов землетрясений, произошедших в зоне рассматриваемого линеймента, показывает, что сжимающие направления имеют северо-восточное направление [5]. Глубже, на горизонте 20-30 км, расположены очаги наиболее сильных землетрясений (М до

7.0), которые приурочены к выделенным границам или участкам их пересечения.

Другой границей, выраженной в геомеханической модели, является восточная граница Сибирской платформы. С глубиной ее положение несколько меняется, как и Станового шва, но в большинстве случаев она расположена в интервале $132-138^{\circ}$ в.д. Сейсмическая активность на этой границе невысока и основные гипоцентры землетрясений находятся на глубине 20 км и более.

Так же хорошо на всех срезах отмечается восточная граница Буреинского массива. Как и в зоне Станового линеймента, она характеризуется высокой сейсмичностью с преобладающим расположением очагов землетрясений в интервале 10-20 км и северо-восточным направлением сжимающих напряжений [10].

Очень ярко проявлена граница между Амурской и Охотоморской плитами. Начиная с 5 км и до глубины в 45 км, она хорошо фиксируется очагами землетрясений. Северная ее часть, начинающаяся с 56° параллели, обозначена только отдельными сейсмическими событиями в центральной части Охотского массива. Преобладающее направление сжимающих напряжений в этой зоне - северо-восточное.

В геомеханической модели хорошо прослеживается Амуро-Олекминский линеамент [2], однако в сейсмическом поле выражены только фланги. Центральнo-Сихотэ-Алинский линеамент прослежен на глубине, начиная с 45 км (рис.1 Д-3).

В геомеханической модели не отражены линеаменты Танлу и Монголо-Охотский. В то же время, достаточно хорошо они проявлены в сейсмическом поле. Наблюдаемое несоответствие векторной картины и зон сейсмичности Монголо-Охотского линеамента и Танлу позволяет считать, что они начали развиваться после формирования плотностной структуры литосферы. Приуроченность очагов землетрясений к горизонту, расположенному на глубине 10-20 км, показывает, что развитие Монголо-Охотской структуры идет за счет процессов, протекающих в этом горизонте. В зоне Танлу, судя по расположению гипоцентров, интенсивные деформации происходят по всей мощности земной коры. Все эти особенности зон линеаментов Танлу и Монголо-Охотской требуют дополнительных специальных исследований.

Рассматривая положение очагов сильных землетрясений, видно (рис. 1), что все они тяготеют к выделенным нами границам и часто к узлам их пересечения, что хорошо соответствует современным представлениям о зависимости сейсмичности от блоковой делимости литосферы [15]. Следовательно, у нас есть основание считать выделенные границы реально существующими в литосфере и являющимися границами блоков.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сформулируем основные выводы, вытекающие из рассмотренных материалов.

1. Для исследуемого региона направление векторов скоростей вязкого течения среды соответствует направлению растягивающих напряжений в очагах землетрясений. Это соответствие говорит о том, что вязкое течение вещества, возникающее в результате взаимодействия в гравитационном поле тел различной плотности, влияет на напряженное состояние среды и, как следствие этого, на механизмы очагов землетрясений.

2. Скорость течения вещества на различных горизонтах различна. Наибольшей скоростью характеризуются горизонты глубиной 10-20 км (0,66 см/год) и 30-40 км (0,43 см/год). С этими горизонтами и их границами практически связана сейсмичность в регионе.

3. Литосфера региона характеризуется не только различными абсолютными значениями скорости течения вещества по горизонтам, но и разной его направленностью. Так, в земной коре векторы скорости течения направлены с запада на восток, в верхней мантии наоборот – с востока на запад. Последнее на-

правление подчиняется движению в конвективной ячейке, выделенной ранее для Тихоокеанско-Азиатской зоны перехода [8].

4. Горизонтам повышенных значений скорости деформаций соответствуют зоны пониженных скоростей сейсмических волн и повышенная электропроводность. В целом полученная геомеханическая модель заставляет считать, что в литосфере существуют послойные срывы. Не исключено, что и граница Мохо является не только плотностной, но и механической, т.е. по ней возможно смещение земной коры.

5. Приуроченность очагов землетрясений, и прежде всего сильных, к границам областей с различным характером вязкого течения подтверждает представление о блоковой делимости и иерархии тел в литосфере.

6. По всей мощности исследованной земной коры и верхней мантии прослеживаются границы (по характеру вязкого течения и сейсмичности) между Алдано-Становым и Амурским (проходит по Становому разлому), Амурским и Охотоморским геоблоками, между Буреинским массивом и Сихотэ-Алинской складчатой системой. Выражен, но менее отчетливо, Амуро-Охотский линеамент. Центральнo-Сихотэ-Алинский разлом прослеживается только в верхней мантии.

8. Положение вышеназванных границ меняется с глубиной, что говорит о сложном строении зоны сочленения геоблоков.

9. Основная сейсмичность приурочена к границам геоблоков, что говорит об их взаимном перемещении, на которое накладывается вязкое течение вещества. Сейсмическая активность Монголо-Охотской складчатой системы и зоны разломов Танлу на рассматриваемой территории начала развиваться после формирования плотностной структуры литосферы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вашилов Ю.Я. Блоково-слоистая модель земной коры и верхней мантии. М.: Наука, 1984. 240 с.
2. Врублевский А.А., Онухов Ф.С., Корчагин Ф.Г., Чжао Чунь Цзинь, Изосов А.А., Дуань Жуй Янь, Хе Гоци. Тектоническое районирование и глубинные неоднородности сопредельных территорий Востока России и Китая // Вестн. ДВО РАН. 1996. № 3. С. 7-21.
3. Гришкян Р.И., Парфенов Л.М., Уфимцев Г.Ф. Космическое изображение Байкальской рифтовой области и ее возможная кинематическая модель // Роль рифтогенеза в геологической истории Земли. Новосибирск: Наука, 1977. С. 104-108.
4. Карсаков Л.П. Раннедокембрийские комплексы в структуре Восточной Азии. Дис. в виде науч. докл. ... д-ра геол.-минер. наук. Хабаровск, 1995. 88 с.
5. Козьмин Б.М. Сейсмические пояса Якутии и механизмы

- очаговых землетрясений. М.: Наука, 1984. 127 с.
6. Комова О.С., Маслов Л.А., Туезов И.К. Решение прямой трехмерной задачи геомеханики для аномальных плотностных тел // Тихоокеан. геология. 1984. № 3. С. 110-115.
 7. Корчагин Ф.Г., Золотарская С.Б., Никитенко Ю.П., Ставров В.Н. К вопросу о современной геодинамике Приамурья // Тихоокеан. геология. 1988. № 2. С. 35-43.
 8. Корчагин Ф.Г., Маслов Л.А. Геодинамика Азиатско-Тихоокеанской зоны перехода // Тихоокеан. геология. 1994. №1. С. 2-14.
 9. Корчагин Ф.Г. Сейсмичность и современная геодинамика // Золотоносные структурно-вещественные ассоциации Дальнего Востока. Владивосток: Дальнаука, 1997. С. 41-51.
 10. Николаев В.В., Семенов Р.М., Семенова В.Г., Солоненко В.П. Сейсмотектоника, вулканы и сейсмическое районирование хребта Станового. Новосибирск: Наука, 1982. 149 с.
 11. Рудик М.И. Параметры очагов землетрясений Приморья и Приамурья // Землетрясения в СССР, 1962-1989 гг. М.: Наука, 1964-1993.
 12. Сейсмотектоника и сейсмическое районирование Приамурья / Николаев В.В., Семенов Р.М., Оскорбин Л.С. и др. Новосибирск: Наука, СО, 1989. 128 с.
 13. Солоненко В.П. Сейсмотектоника и современное структурное развитие Байкальской рифтовой зоны // Байкальский рифт. М.: Наука, 1968. С. 57-71.
 14. Туезов И.К. Геоэлектрический разрез литосферы и астеносферы северо-восточной Азии и прилегающих частей Тихого океана. Владивосток: Дальнаука, 1994. 300 с.
 15. Уломов В.И. Глобальная упорядоченность сейсмогеодинамических структур и некоторые аспекты сейсмического районирования и долгосрочного прогноза землетрясений // Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии. М., 1993. Вып.1. С. 24-44.

Поступила в редакцию 18 октября 1999 г.

Рекомендована к печати Ю.Ф.Малышевым

F. G. Korchagin, L. A. Maslov, O. S. Komova

Geomechanical model of Priamurye and its seismotectonic consequences

The paper considers geomechanical model of Priamirye based on density model with the account of data on seismicity and earthquake focal mechanisms. It is shown that boundaries between the Amur, Aldan-Stanovoy and Okhotsk Sea geoblocks, the Bureya Massif and the Sikhote-Alin fold system are continuously traced in the crust and upper mantle. The major seismic activity of the region is related to these boundaries. The distinctions in the structure of the upper mantle and the Earth's crust are shown. The horizons are determined in the lithosphere which differ in the rate of the viscous substance flow. It is pointed out that as distinct from the Stanovoy lineament, those of the Mongolo-Okhotsk and Tan-Lu are not reflected in the structure of the viscous flow of the crustal substance. Probably, this is the indication of their young age.