

УДК 550.348

*Т. М. КАЙДАШ<sup>1</sup>, Н. П. СТЕПАНЕНКО<sup>2</sup>*

## ГЕОФИЗИЧЕСКАЯ ОСНОВА МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЗЕМНОЙ КОРЫ

Оңтүстік-шығыс Қазақстанның жер қыртысының көп параметрлі көлемдік нобайын құру үшін геофизикалық параметрлердің кешені қалыптастырылған. ұсынылған серпінді-беріктік және энергетикалық параметрлер жер сілкінуінің пайда болу және сейсмикалық қауіптілікті анықтау процестерін зерттеуде өте маңызды геофизикалық сипаттамалар болып табылады.

Сформирован комплекс геофизических параметров для создания многопараметрической объемной модели земной коры юго-востока Казахстана. Предложенные упругопрочностные и энергетические параметры являются важными геофизическими характеристиками среды при изучении процессов подготовки сильных землетрясений и оценке сейсмической опасности.

The complex of geophysical parameters for creation of multiparametrical 3-D model of the earth crust for southeast of Kazakhstan is generated. Offered elasto-strengthening and energy parameters are the important geological characteristics of medium

both for study of strong earthquake preparation processes and for estimation of seismic danger.

При реализации различных подходов к тектоническому районированию неоднократно высказывались [9, 12] сожаления о недостаточности использования геофизических данных о глубинном строении в связи с их неполнотой и противоречивостью. Поэтому крайне важны выяснение возможностей и оптимизация использования геофизической информации о глубинном строении недр при тектоническом районировании нового геонамического уровня. Эта проблема имеет большое значение и для комплекса сейсмологических исследований, тем более, если учесть, что основное количество гипоцентров землетрясений юго-востока Казахстана сосредоточено в средней части земной коры. Морфологический рисунок глубинных структур, сведения о котором содержатся в геофизической информации, должен способствовать установлению закономерностей формирования очаговых зон на генетическом уровне.

При выборе параметров, эффективных на предмет выявления в исследуемой среде ее локальных объемов, ответственных за формирование очагов землетрясений, предпочтение отдано упругопрочностным и энергетическим параметрам, для вычисления которых используются базовые независимые параметры  $V_p$ ,  $V_s$ ,  $c$ , а также

литостатическое давление  $P$  и температура  $T$  [6–8]. Структурные особенности горных пород, их пористость и трещиноватость – факторы, свойственные самим породам. Эти внутренние факторы оказывают преобладающее влияние на прочностные характеристики в приповерхностных условиях.

При переходе к глубинным зонам земной коры необходимо в значительно большей степени учитывать также влияние других факторов. Некоторые из них (температура, давление) изменяются в очень широких пределах, и их роль в оценке прочности глубинных пород может быть доминирующей.

При геофизическом моделировании предпочтительнее абстрагироваться от геологической интерпретации параметрических моделей, основываясь на предположении, что имеющие отношение к сейсмичности стратиграфические, литологические и структурно-тектонические особенности среды адекватно отображаются численными значениями рассматриваемых упругопрочностных параметров, и среда может быть районирована непосредственно по ним.

Обычно результаты интерпретации глубинных геофизических исследований представляются в виде двумерных параметрических моделей, с помощью которых затруднительно в полной мере судить о морфологии выделенных струк-

<sup>1,2</sup> Казахстан, 050060, г. Алматы, пр. аль-Фараби, 75а, Институт сейсмологии МОН РК.

тур, что снижает тектоническую информативность таких моделей и не позволяет получить объективные признаки для реконструкции геодинамических процессов. Повышение информативности глубинной геофизики достигается за счет создания объемных параметрических моделей земной коры и тектоносферы в целом. Опыт построения подобных моделей до настоящего времени небольшой, так как проблема в целом наталкивается на большие теоретические и практические трудности, тем более, если решать ее на количественном уровне. Единичные попытки построения объемных моделей, базирующиеся в основном на сейсмических данных, имеют сугубо эвристический характер [5], поэтому пока мало эффективны при решении практических задач.

В этой статье предложен комплекс геофизических параметров для создания многопараметрической объемной модели земной коры юго-востока Казахстана. Конечной целью многопараметрического моделирования земной коры в плане создания глубинной геофизической основы для сейсмологических исследований является получение ее упругопрочностных и энергетических характеристик. Эффективность этих характеристик при сейсмическом районировании обоснована и апробирована сибирскими учеными [8] на примере Байкальского и Северо-Тянь-Шаньского сейсмоопасных районов. Предложенная ими методика развита и применяется в Казахстане. В качестве базовых параметров для создания объемной многопараметрической модели земной коры использованы скорости продольных  $V_p$  и поперечных  $V_s$  волн, плотность  $\rho$ . Необходимо подчеркнуть, что, во-первых, плотность  $\rho$  является независимо вычисленным параметром за счет использования ортогональных составляющих наблюдаемого поля силы тяжести (в отличие от распространенного пути вычисления этого параметра по эмпирическим зависимостям от  $V_p$  и  $V_s$  или  $\rho$  с помощью пересчета наблюдаемого поля силы тяжести на различные гипсометрические уровни), во-вторых,  $V_p$ ,  $V_s$  и  $\rho$ , вычисляемые по данным натуральных экспериментальных наблюдений, соответствуют реальным термобарическим условиям в недрах Земли.

Скорости продольных  $V_p$  и поперечных  $V_s$  волн установлены в результате двумерного моделирования земной коры решением обратной задачи рефрагированных волн по материалам

ГСЗ или профильной томографии [15]. В результате совместной обработки материалов глубинных сейсмических зондирований тремя модификациями (ГСЗ, ГСЗ-МОВЗ, профильная томография) для исследуемой территории, включая орогены, получены данные о скоростных характеристиках земной коры по достаточно густой сети многократно пересекающихся геотраверсов различной ориентировки, проходящих через Туранскую плиту, Казахский щит, Жонгарию, Тянь-Шань, Таримскую плиту и Памир. Эти данные послужили экспериментальной основой для создания объемных скоростных моделей земной коры.

Конструирование двумерных плотностных моделей вдоль каждого геотраверса согласовано со скоростными моделями на основе методики сейсмогравитационного моделирования [14]. При этом процесс моделирования обеспечивается единой методической и системной основой и достигнута взаимная увязка моделей в узлах пересечения профилей. Плотностные модели земной коры составлены непременно с учетом гравитационных эффектов.

Двумерные скоростные (по волнам Р и S) и плотностные модели, а также созданные на их основе модели по всем упругопрочностным параметрам (модуль Юнга Е, модуль сдвига G, модуль объемного сжатия К, коэффициент Пуассона  $\nu$ , давление Р, температура Т, мгновенная прочность на сдвиг  $f_c$ , упругая энергоемкость  $\psi$ ) по 22 геотраверсам покрывают территорию примерно от 39 до 50°N и от 68 до 80°E. Значения всех упругопрочностных параметров послужили базой для создания объемного многопараметрического «куба», вмещающего земную кору Северного Тянь-Шаня и прилегающих территорий, с размерами: запад-восток – 1080 км, юг-север – 1160 км, по глубине 0–40 км. Глубина 40 км, а не вся кора до поверхности Мохоровичича, выбрана как ее средняя мощность из тех соображений, что при численном моделировании необходимо, чтобы сетка входных данных была прямоугольной по латерали и вертикали.

Многопараметрическая модель земной коры рассчитана по разработанной А. В. Матусевичем компьютерной технологии преобразования двумерных моделей по системе геотраверсов в параметрические «кубы». Из полученных «кубов» можно создать горизонтальные срезы и вер-

тикальные разрезы в любом направлении с целью выявления региональных особенностей земной коры и сейсмогенерирующих зон, т. е. районирования земной коры по упругопрочностным и энергетическим параметрам в связи с сейсмичностью.

*Модули упругости.* Упругие свойства горных пород проявляются различным способом. Наиболее грозным их выражением оказываются землетрясения. Количество энергии, затрачиваемое на разрушение горных пород при землетрясении, напрямую зависит от этих свойств. Поэтому знание упругих свойств горных пород имеет существенное значение. Упругие свойства проявляются в способности пород восстанавливать исходную форму и размеры после снятия нагрузки. Полное восстановление размеров и формы возможно только в пределах упругих деформаций. Параметры, численно оценивающие упругие свойства среды, являются коэффициентами пропорциональности между напряжениями и упругими деформациями. Такими коэффициентами являются модули Юнга  $E$ , сдвига  $G$  и объемного сжатия  $K$ . Так, модуль объемного сжатия  $K$  есть коэффициент пропорциональности между величиной всестороннего сжатия и относительным уменьшением объема. Модуль сдвига  $G$  – коэффициент, связывающий касательные напряжения с деформацией сдвига. Все они характеризуют способность среды сопротивляться деформированию, т. е. определяют жесткость среды [11].

Модули объемного сжатия  $K$ , Юнга  $E$  и сдвига  $G$  считаются основными характеристиками упругой среды. Все они связаны между собой [2]:

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)}, \quad G = \frac{E}{2(1+\nu)},$$

где  $\nu$  – коэффициент Пуассона, который является одной из наиболее важных и основных величин в теории упругости и позволяет судить об особенностях физики среды.

Основной объем информации в сейсмологии получают с помощью определения поля скоростей продольных  $V_p$  и поперечных  $V_s$  волн. Установлено [3], что если скорости продольных волн позволяют судить о структурных особенностях строения земной коры, то привлечение поперечных волн дает принципиально новую информацию –

о петрофизических характеристиках вещества. Совместное же использование скоростей продольных и поперечных волн, в частности, их отношение  $V_p/V_s$ , дает важную информацию не только при изучении структурно-тектонических элементов земной коры, но и при построении плотностных и петрологических ее моделей. Параметр  $V_p/V_s$ , однозначно определяющий коэффициент Пуассона [4], открывает широкие возможности для петрофизической интерпретации данных глубинного сейсмического зондирования. Коэффициент Пуассона в совокупности с  $V_p$  и  $V_s$  позволяет значительно полнее прогнозировать свойства геологической среды. Показано [6,13], что для малотрещиноватых консолидированных горных пород наиболее высокие значения прочности отмечены у образцов с малой величиной коэффициента Пуассона. Для осадочных, более рыхлых и менее прочных пород коэффициент Пуассона имеет повышенные значения. Он является параметром, хорошо коррелирующимся с прочностными свойствами среды, и может быть использован при районировании среды по этим свойствам.

Упругие модули  $E$ ,  $K$ ,  $G$  и коэффициент Пуассона  $\nu$  в зависимости от  $V_p$ ,  $V_s$ , с определялись по соотношениям [4]:

$$\nu = \frac{\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 2}{2\left[\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 1\right]}, \quad E = 3K \left( \frac{1}{\frac{V_p^2}{V_s^2} - 1} \right),$$

$$K = \rho V_s^2 \left( \frac{V_p^2}{V_s^2} - \frac{4}{3} \right), \quad G = \rho V_s^2.$$

*Температура  $T$ .* Изучение теплового поля Земли дает важнейшую количественную информацию для понимания и моделирования геодинамических процессов в геосферах и для оценки геолого-геофизических проявлений. Между распределением тепловых потоков и другими геофизическими полями существуют достаточно тесные связи. Они основаны, с одной стороны, на чувствительности этих полей к колебаниям

физических параметров горных пород, которые определяются их литолого-петрографическими особенностями, минеральным составом и характером залегания, с другой – на зависимости этих параметров от температуры, изменяющейся в соответствии с величиной теплового потока.

Сейсмотектоническая активизация земной коры, обусловленная накоплением упругой энергии за счет деформации горных пород, создается в результате изменения термодинамических (в числе других) характеристик, предопределяющих пространственно-временную структуру теплового поля в ее консолидированной части. Изучение глубинной температуры земной коры имеет большое значение для решения прикладных задач, в частности, таких, как выявление природы условий формирования сейсмогенерирующих зон.

Базовыми параметрами, на основе которых создавалась двумерная температурная модель по геотраверсам, покрывающим исследуемый регион, являлись скорости продольных волн  $V_p$ , плотность  $\rho$ , а также карта теплового потока (ТП) масштаба 1:5 000 000, изданная в 1991 г. под редакцией В. В. Гордиенко и У. И. Моисеенко.

Для расчета температуры привлечена мето-

$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	<2,65	2,65	2,70	2,75	
$\lambda_p$ , Дж/(мс · град)	2,0	2,3	2,4	2,5	
$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	2,80	2,85	2,90	2,95	>2,95
$\lambda_p$ , Дж/(мс · град)	2,5	2,6	2,7	2,8	3,0

дика Е. А. Любимовой и др. [10]. Зависимость коэффициента теплопроводности  $\lambda$  от плотности  $\rho$  [1] для слоев горных пород, слагающих земную кору исследуемого региона, приведена ниже:

*Мгновенная прочность на сдвиг  $\phi_c$ .* Сейсмологические и макросейсмические данные, а также независимые от них результаты сейсмологических исследований [7] показывают, что коровые землетрясения связаны лишь с разрывами сколового типа. Поскольку причиной развития сколов является действие касательных напряжений, то при прогнозе землетрясений большое внимание должно уделяться выявлению областей, характеризующихся повышенными величинами максимальных касательных напряжений в земной коре. Поэтому при оценке напряженно-

деформированного состояния земной коры сейсмоактивных районов большое внимание уделяется одному из важнейших механических параметров кристаллических пород – их прочности на сдвиг  $\phi_c$  при быстром (условно мгновенном) протекании процесса деформации в диапазонах температуры и всестороннего давления, характерных для разных глубинных уровней земной коры [7]. Доминирующая роль сдвиговых напряжений и деформаций в момент разрушений при землетрясении обуславливает обращение к параметру  $\phi_c$ .

Исходными данными для определения  $\phi_c$  явились опубликованные в работе [7] результаты деформационно-прочностных лабораторных испытаний образцов горных пород при их кратковременном неравномерном трехосном сжатии на установках высокого давления в широком диапазоне температур. Напряженно-деформированное состояние, возникающее в образцах горных пород при экспериментах, наиболее приближено к реальным условиям, когда под действием тектонических сил возникает объемное напряженное состояние пород. Такие зависимости получены в результате анализа более трехсот испытаний на образцах при давлении  $P$  от 0,1 до 1000 МПа и температуре  $T$  20–800 °С. Глубинное распределение температур рассчитывалось по данным геотермических исследований. Анализ зависимостей  $\phi_c$  от давления  $P$  и температуры  $T$  позволяет утверждать, что прочность увеличивается с ростом давления и уменьшается при возрастании температуры.

В рамках создания объемной модели при проведении расчетов мгновенной прочности на сдвиг  $\phi_c$  всестороннее давление в первом приближении заменялось на литостатическое, равное весу вышележащих горных пород:

$$P = g_0 \sum_{i=0}^n \rho_i h_i,$$

где  $g_0 = 9,81$  м/с<sup>2</sup>;  $\rho_i$ ,  $h_i$  – плотность и мощность слоя соответственно.

*Предельная упругая энергоемкость  $u_c$ .* По значениям  $\phi_c$  и модуля сдвига  $G$  находится распределение предельной энергоемкости глубинных пород:

$$\omega = \frac{\tau_c^2}{2G}$$

Этот важный для характеристики очаговых зон параметр равен максимальной величине упругой потенциальной энергии, могущей накопиться в единичном объеме среды в результате ее деформирования под действием касательных напряжений вплоть до разрушения.

Таким образом, предложен перечень упругопрочностных и энергетических параметров как важнейших геофизических характеристик среды при изучении процессов подготовки сильных землетрясений и оценке сейсмической опасности.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Аширов Т.* Геотермические аномалии в период сейсмотектонической активизации земной коры // Геотермические исследования в Средней Азии и Казахстане. М.: Наука, 1985. С. 150-157.
2. *Безухов Н.И.* Основы теории упругости, пластичности и ползучести. М.: Высшая школа, 1961. 538 с.
3. *Егоркин А.В., Егоркина Г.В.* Поперечные волны при глубинных исследованиях // Исследование литосферы и астеносферы на длинных профилях ГСЗ. М., 1980. С.140-172.
4. *Кольский Г.* Волны напряжения в твердых телах. М.: Иностранная литература, 1955. 192 с.
5. *Краснопевцева Г.В., Щукин Ю.К.* Объемная глубинная модель земной коры Восточно-Европейской платформы по данным региональных сейсмических исследований // Региональная геология и металлогения. 2000. №10. С.73-84.
6. *Крылов С.В., Брыксин А.В., Тен Е.Н.* Упругие свойства силикатных минералов и кристаллических горных пород для изотропной модели // Геология и геофизика. 1990. №12. С.101-112.
7. *Крылов С.В., Тен Е.Н.* Оценка прочности кристаллических пород по данным глубинного сейсмического зондирования на Р- и S- волнах // Геология и геофизика. 1994. Т. 35, №5. С.20-30.
8. *Крылов С.В., Тен Е.Н.* Прочностные и упругие свойства очаговых зон сильных землетрясений на участках Байкальского и Северо-Тянь-Шаньских регионов // Геология и геофизика. 1995. Т. 36, №2. С.137-150.
9. *Курскеев А.К., Тимуш А.В., Шацлов В.И.* и др. Сейсмическое районирование Республики Казахстан. Алматы: Эверо, 2000. 220 с.
10. *Любимова Е.А., Любоиц В.М., Парфенюк О.И.* Числовые модели тепловых полей Земли. М.: Наука, 1983. 126 с.
11. *Ржевский В.В., Новик Г.Я.* Основы физики горных пород. М.: Недра, 1984. 359 с.
12. Сейсмическое районирование территории СССР // Методические основы и региональное описание карты 1978 г. М.: Наука, 1980. 308 с.
13. *Халевин Н.И., Тиунова А.М.* Поперечные волны и коэффициент Пуассона при изучении земной коры Среднего Урала // Сейсмические исследования земной коры и рудоперспективных структур Урала. Свердловск, 1980. С. 28-40.
14. *Шацлов В.И., Горбунов П.Н., Белоусова Н.П., Степаненко Н.П.* Строение тектоносферы Тянь-Шаня на основе новой геофизической информации // Inland Earthquake. 1995. V. 11, №3. 1997. P. 265-271.
15. *Шацлов В.И., Горбунов П.Н., Степаненко Н.П. и др.* Скоростные модели земной коры Казахстана. Алматы: Евразия, 1993. 105 с.