

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОСЛОЙНОГО ТЕЧЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД В ПРОЦЕССЕ СКЛАДКООБРАЗОВАНИЯ

Пак В.В.

*Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева, г. Владивосток
pakvv@poi.dvo.ru*

Результаты геолого-геофизического исследования геоструктур Азиатско-Тихоокеанской зоны перехода приводят к заключению о первостепенной роли послойного или близкого к послойному течения торных пород в процессе структурообразования, т.к. механические свойства горных пород не в состоянии обеспечить передачу тангенциальных напряжений на расстояния, сопоставимые с шириной тектонических зон и складчатых поясов. Поэтому механизмы продольного изгиба и расплющивания не могут выступать в качестве доминирующих. Для проверки принципиальной возможности формирования в таких условиях рассматриваемых структур был поставлен ряд экспериментов на эквивалентных материалах, в которых использовались многослойные комплексы, состоящие из чередующихся слоев повышенной и пониженной вязкости [1]. Однако, интерпретация полученных результатов столкнулась с определенными трудностями, связанными с отсутствием теоретического исследования поведения многослойного пласта в условиях послойного течения.

Рассмотрим вязкую жидкость, состоящую из трех слоев (обозначены индексами $i = 1, 3$), которые ограничены поверхностями раздела $z_i, i = 1, 4$. Верхняя граница области z_1 является подвижной и непроницаемой (т.е. отсутствует поток жидкости через границу), а нижняя граница z_4 представляет собой горизонтальную, твердую, неподвижную стенку. Течение в слоях создается переменной внешней нагрузкой на верхней границе $-Q(x_1)$. Пусть $\rho_i, \mu_i, i = 1, 3$ – плотности и вязкости слоев (постоянные внутри слоев), u_1, u_2 – горизонтальная и вертикальная компоненты скорости, p – давление, g – ускорение силы тяжести, t – время.

Для описания движения жидкости в слоях использовались следующие уравнения [2]:

$$\begin{aligned}
& \left[\mu(u_{1,j} + u_{j,1}) \right]_{,j} - p_{,1} - Q_{,1} = 0, \\
& \left[\mu(u_{2,j} + u_{j,2}) \right]_{,j} - p_{,2} - \rho g = 0, \\
& u_{i,i} = 0
\end{aligned} \tag{1}$$

На поверхности задавались условия отсутствия внешних напряжений, а на границах раздела слоев – условия непрерывности скоростей и напряжений. На нижней границе $z = z_4$ задавались условия прилипания.

Для исследования уравнений движения жидкости использовался обобщенный метод многих масштабов. Получена система первого приближения и проведен анализ ее устойчивости. В трехслойном течении, в котором относительно тонкий слой расположен между двумя слоями с одинаковыми параметрами, два других корня связаны следующим образом: $\lambda_2 \approx -\overline{\lambda_3}$. Т.к. $\lambda_2^R \approx -\lambda_3^R$, одно из них должно принимать положительные значения, и соответствующее ему решение будет неустойчивым при любом значении μ_2 отличном от вязкости смежных слоев. В отличие от варианта с постоянной толщиной слоев, доминирующее возмущение будет иметь не синусоидальную, а «модулированную» форму, т.к. ее амплитуда, волновое число и инкремент зависят от ξ .

В качестве геофизической интерпретации сделана попытка применить полученные результаты к исследованию механизма образования складок, как одной из разновидностей геологических структур [2]. В качестве объекта исследования использовались данные наблюдения складки неоднородной толщины. Исследование проводилось следующим образом. Используя контур складки, была рассчитана осевая линия, на которой были определены координаты точек максимальной кривизны и толщина складки в этих точках (см. рис. 1).

Если предположить, что до начала деформации осевая линия складки была прямой, то точки максимальной кривизны будут соответствовать точкам, в которых в начальный момент времени амплитуда поперечного изгиба складки была максимальной (в дальнейшем будем называть их экстремальными точками). «Выпрямим» складку вдоль осевой линии. Если обозначить через $d_n^e, n = \overline{1, N}$ расстояния между точками максимальной

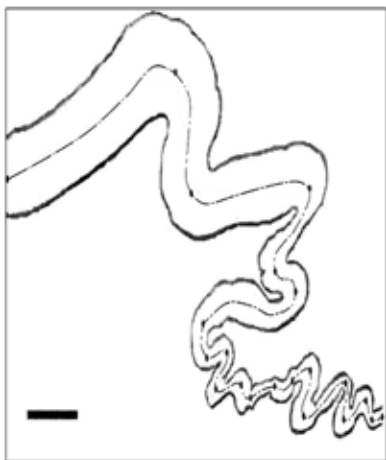


Рис. 1. Контур складки неоднородной толщины (масштаб 10 см в левом нижнем углу изображения). Осевая линия складки изображена штрихпунктирной линией. Маркерами показаны положения точек максимальной кривизны складки

кривизны, то координаты этих точек на прямой оси вычисляются следующим

$$\text{образом: } x_n^e = \sum_{l=1}^n d_l^e, n = \overline{1, N}.$$

По значению толщины складки в точках x_n^e вычислялись поле основной компоненты скорости, а затем основные параметры неустойчивости.

При расчетах использовались следующие значения параметров модели: $L = 1$ м, $\rho_0 = 3000$ кг/м³, $\mu_0 = 10^{15}$ Па·с; $\rho_1 = \rho_2 = \rho_3 = 1$; $\mu_1 = \mu_2 = 1$. Толщина среднего слоя h_2 задавалась равной толщине складки. Общая толщина слоев принималась равной 1, причем средний слой находится посере-

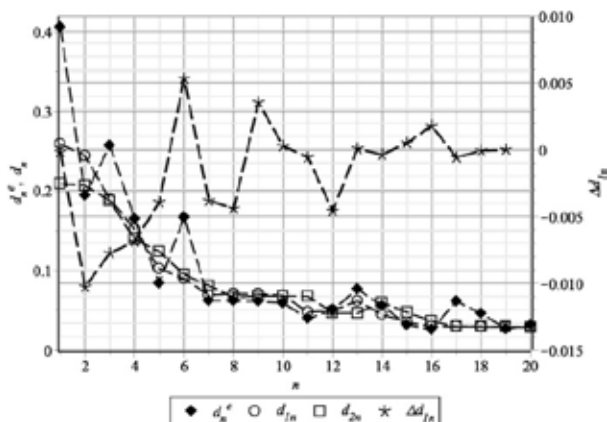


Рис. 2. Сравнение модельных расчетов с геологическими данными: $d_{1n} = d_{0n} |_{\mu_2=0.1}$, $d_{2n} = d_{0n} |_{\mu_2=10}$, $\Delta d_{1n} = \Delta d_n |_{\mu_2=0.1, t=t_{min}}$ – невязка (значения на правой шкале)

дине расчетной области: $h_1 = h_3 = (1 - h_2) / 2$. Вязкость среднего слоя μ_2 варьировалась от 0,1 до 10. Значение Q варьировалось в пределах от 0,2 до 2.

Сравнение модельных расчетов с наблюдаемыми данными, представленные на рисунке 2, показывает достаточно хорошее совпадение наблюдаемых данных с вычислениями в достаточно широком диапазоне значений параметров модели.

Результаты моделирования в широком диапазоне значений параметров с экспериментальными данными показывает возможности использования предложенной модели для теоретического исследования послойного течения торных пород в процессе образования складчатых структур.

Работа выполнена по программе фундаментальных научных исследований ТОИ ДВО РАН «Моделирование и анализ разномасштабных динамических процессов и распространения звука в океане» №124022100072-5.

Литература

1. Миллер Ю.В. Послойное и субпослойное течение пород и его роль в структурообразовании // Геотектоника. 1982. № 6. С. 88-96.
2. Пак В.В. Асимптотическое исследование неустойчивости в трехслойном стоксовом течении с неоднородной толщиной слоев. Моделирование процесса образования складок // Прикладная механика и техническая физика. 2019. Т. 60. № 6. С. 53-64. DOI: 10.15372/PMTF20190606.