

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗРЫВА ДАВЛЕНИЙ НА ПОЛОГИХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СТРУКТУРАХ

*Борис Иванович Прилоус*

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, научный сотрудник лаборатории многоволновой сейсморазведки, тел. (383) 333-39-08, e-mail: prilousbi@ipgg.sbras.ru

В статье представлены результаты трехмерного моделирования поведения горного давления для двух слоев с пологой куполообразной структурой в нижнем слое. Показано, что при резкой смене отношений скоростей поперечных и продольных волн на границе слоев таких структур возможны два варианта отношений структуры и окружающих флюидов: от полного игнорирования структурного фактора вплоть до приобретения нижележащим слоем способности аккумулировать флюиды.

**Ключевые слова:** антиклинальные структуры, слоистая среда, разрыв давлений.

## SIMULATION OF RUPTURE PRESSURE IN GENTLY SLOPING GEOLOGICAL STRUCTURES

*Boris I. Prilous*

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, Research Scientist of the Laboratory of Multiwave Seismic, tel. (383)333-39-08, e-mail: prilousbi@ipgg.sbras.ru

The article presents the results of three-dimensional simulation of the behavior of rock pressure for two layers with gentle dome-shaped structure in the lower layer. It is shown that when there is an abrupt change of the relationship of the velocities of transverse and longitudinal waves at the boundary layers of such structures there are two possible relations between the structure and the surrounding fluids: from complete disregard for the structure factor up to the acquisition of the underlying layer of ability to accumulate fluids.

**Key words:** anticlinal structure, layered medium, rupture pressure.

Задачи использования сейсмических данных многоволновой сейсморазведки (пластовые скорости  $V_s$ ,  $V_p$  и плотность горных пород) для расчета напряженного геодинамического состояния продуктивных пластов имеют двадцатилетнюю историю [1]. Их постановка и решение имели целью определение областей пониженного горного давления, предпочтительных для аккумуляции углеводородов. Разработанный метод прогноза применен для расчета давления в пологих антиклинальных складках для тестовых задач и для реальной модели Аригольского месторождения в Восточной Сибири.

Для двуслойной модели с пологой структурой в нижнем слое в трехмерном варианте необходимо решение уравнения равновесия с граничными условиями жесткого контакта на поверхности этой структуры и нулевой нагрузки на свободной поверхности. В нулевом приближении исходная модель сводится к модели двух слоев с горизонтальной границей между ними.

В [2] отмечено, что решение даже этой простейшей задачи нетривиально, что подтверждают следующие *простые выкладки*. Вертикальное напряжение равно весу вышележащих пород. Выражая напряжения через деформации  $\sigma_{ik} = \lambda\theta\delta_{ik} + 2\mu e_{ik}$ , получим для компонент тензора напряжений

$$\sigma_{zz} = (\lambda + 2\mu)e_{zz}, \sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \lambda e_{zz}.$$

Напряженное состояние модели двух слоев с горизонтальной границей явно негидростатично, поскольку для отношения горизонтальных касательных напряжений к нормальному вертикальному напряжению получаем

$$\frac{\sigma_{xx}}{\sigma_{zz}} = \frac{\sigma_{yy}}{\sigma_{zz}} = \frac{\lambda}{\lambda + 2\mu} = 1 - 2\gamma^2, \quad \gamma = (V_s / V_p).$$

Обозначив через  $P_0$  вес вышележащих пород, получим для горного давления как среднего всех нормальных напряжений

$$P = \frac{\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz}}{3} = \rho g z (1 - 4/3\gamma^2) = P_0 (1 - 4/3\gamma^2).$$

Именно это выражение приводит к необычным с обыденной точки зрения выводам:

- 1) давление оказывается значительно меньше веса вышележащих пород;
- 2) при разном отношении скоростей поперечных и продольных волн в слоях при переходе между соседними слоями возникает скачок давления

$$\Delta P = P_1 - P_2 = \frac{4}{3} \gamma_1^2 - \gamma_2^2 P_0.$$

При скачке давления, меньшем нуля, т.е. при  $\gamma_1 < \gamma_2$ , получим  $\Delta P < 0$ .

Происходит падение давления на границе и нижележащий слой становится областью низкого давления, что означает возможность внедрения в него флюидов.

Для изучения давлений в пологих (антиклинальных) структурах в слоях с разными сейсмическими характеристиками удобно выбрать модель, которая представляет собой полупространство, разделенное на два слоя (рис. 1).

Верхняя граница первого слоя (назовем его «покрывающим») – это свободная поверхность земли (плоскость  $z = 0$ ). Нижняя граница второго слоя (назовем его «коллекторным») бесконечна. Ось  $z$  направлена вниз, перпендикулярно осям  $x, y$ .

Граница между слоями расположена на глубине 3000 м и представляет собой куполообразную поверхность  $z_0(x, y) = H - h e^{-\frac{x^2 + y^2}{a^2}}$ , где  $H = 3000$  м, амплитуда  $h = 10$  м, размах купола  $a = 200$  м. Поверхность  $z_0(x, y)$  является границей структуры, принадлежащей нижнему слою, плотность слоев  $\rho = 3000$  Кг/м<sup>3</sup>.

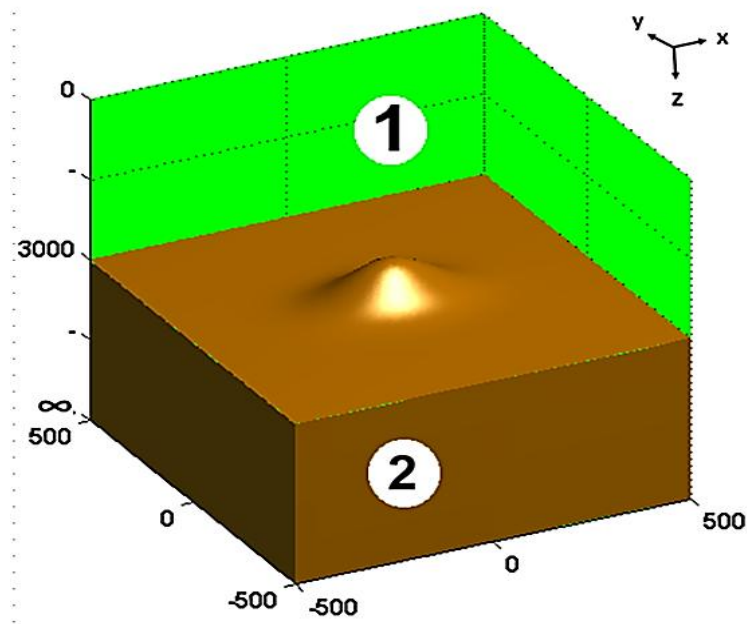


Рис. 1. Куполообразная структура в слое коллекторе ② на глубине 3000 m от свободной поверхности под действием гравитационного уплотнения покрывающего слоя ①

Главная цель прогноза напряженного состояния геологической среды, согласно [2], должна состоять в использовании самих природных сил, действующих в окрестности нефтегазоносных структур, для решения задач интенсификации процессов фильтрации наиболее экономичным и экологически разумным образом. Среди таких природных сил в пологих антиклинальных структурах важное место занимает давление.

Результаты расчетов давлений в слоях над и под поверхностью структуры представлены на рис. 2. На нем давления над поверхностью структуры отображены зеленым цветом – цифра ①, давления в самой структуре отображены коричневым цветом – цифра ②.

Левая половина рисунка относится к такому сочетанию отношений скоростей поперечных и продольных волн, когда оно в покрывающей среде больше, чем в среде-коллекторе ( $\frac{\gamma_1}{\gamma_2} > 1$ ). При этом давление в структуре ② становится больше давления в покрывающем слое ① (рис. 2 (б) слева). Структура становится запечатанной своим более высоким давлением для возможной фильтрации в нее флюидов.

Правая половина рисунка относится к такому сочетанию отношений скоростей поперечных и продольных волн, когда оно в покрывающей среде меньше, чем в среде-коллекторе ( $\frac{\gamma_1}{\gamma_2} < 1$ ). При этом давление в структуре ② становится меньше давления в покрывающем слое ① (рис. 2 (б) справа). Структура становится вполне предрасположенной к тому, чтобы стать аккумулятором флюидов.

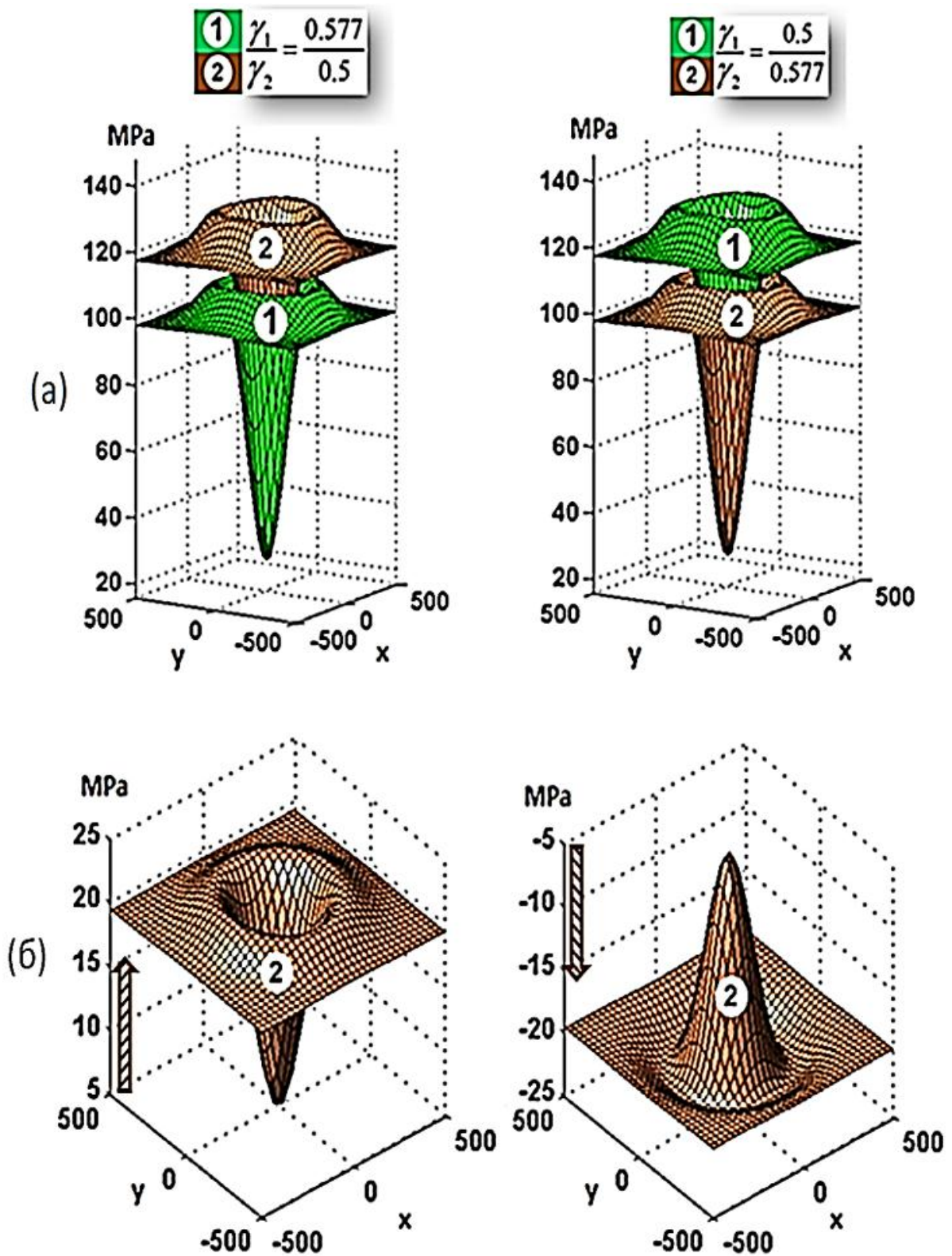


Рис. 2. (а) Сравнительное распределение давлений в покрывающем слое ① и в слое коллекторе ② в зависимости от разных значений в слоях для отношений скоростей поперечных и продольных волн  $\gamma = \frac{V_s}{V_p}$ ; (б) Величины и направления разности значений давлений между коллектором ② и покрывающим слоем ①

Давление определяется как произведение дилатации на модуль всестороннего сжатия, изменение которого между слоями незначительно. Доминирующий вклад вносится дилатацией [3], изображенной на рис. 3. Ее расчетная формула приведена ниже.

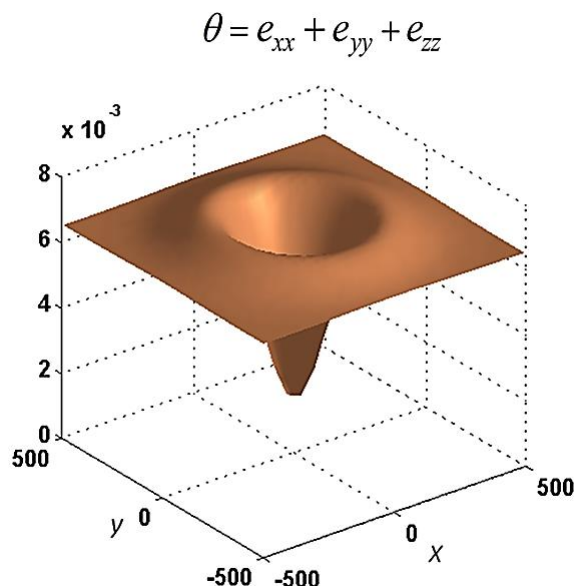


Рис. 3. Поверхность дилатации. Зоны относительного разуплотнения находятся между центром структуры и ее периферией, где наблюдаются зоны относительного уплотнения

Основными геометрическими характеристиками, влияющими на изменение дилатации, являются: а) углы наклона поверхности структуры, связанные с первыми производными  $z_x, z_y$ ; б) отрицательные кривизны поверхности структуры, связанные со вторыми производными  $z_{xx}, z_{yy}$ . Влияние углов наклона незначительно по сравнению с влиянием кривизны. Заданный вид структуры в виде куполообразной экспоненты определяет как зоны разуплотнения, так и зоны уплотнения, которые представляют собой своеобразный барьер для проникновения флюидов непосредственно к месту их аккумуляции.

$$\theta z_0(x, y) = -\frac{gz}{V_P^2} \left( 1 + \frac{z_x^2 + z_y^2}{\sqrt{1 + z_x^2 + z_y^2}} \right) - \frac{gz^2}{2V_P^2} \frac{z_{xx} + z_{yy}}{\sqrt{1 + z_x^2 + z_y^2}} \left( 1 - \frac{z_x + z_y}{1 + z_x^2 + z_y^2} \right)$$

$$z_0(x, y) = H - he^{-\frac{x^2 + y^2}{a^2}}, \quad z = e^{-\frac{x^2 + y^2}{a^2}}$$

Итак, трехмерное моделирование поведения давлений на пологой структуре, поверхность которой разграничивает две среды с контрастными сейсмическими характеристиками (либо коэффициентом Пуассона, либо отношением

скоростей поперечных и продольных волн), показало, что разрыв давлений на этой поверхности определяется не только указанной контрастностью, но и такими геометрическими характеристиками структуры, как углы наклона и средние кривизны, значения которых пропорциональны перепаду давлений. Отмечены условия, при которых в коллекторе пологих структур появляются отрицательные давления, благоприятствующие их превращению в аттракторы (аккумуляторы) флюидов.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сибиряков Б.П. Многоволновая сейсморазведка и прикладная геодинамика в нефтегазоносных областях / Б.П. Сибиряков, А.Д. Заикин // Геология и геофизика. - 1994. - №5 - С. 49–55.
2. Сибиряков Б.П. Динамика микронеоднородных геологических сред: учеб. пособие. - Новосибирск: НГУ, 2004.
3. Е.Б. Сибиряков, Б.П. Сибиряков Многоволновая сейсморазведка и динамика нефтегазоносных структур // Геофизические методы исследования земной коры: материалы Всерос. Конф., посвященной 100-летию со дня рождения академика Н.Н. Пузырева (Новосибирск, 8–13 декабря 2014 г.). - 2014. - С. 92–96

© Б. И. Прилоус, 2015