



ВЫСОКОЭФФЕКТИВНОЕ 3D МОДЕЛИРОВАНИЕ СОЛЯНОГО ТЕКТОГЕНЕЗА В ЦЕЛЯХ ПРОГНОЗА СТРУКТУРЫ ПОДСОЛЕВОГО КОМПЛЕКСА

Б.В. Лунев¹, Т.В. Абрамов², В.В. Лапковский¹, В.И. Прийменко³

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3, Россия, e-mail: bobvalmail@mail.ru, LapkovskiiVV@ipgg.sbras.ru

²ООО "Инверсия-Сенсор", 630090, Новосибирск, ул. Николаева, 12, Россия, e-mail: timohamail@inbox.ru

³Laboratory of Engineering and Exploration of Petroleum, State University of Norte Fluminense Darcy Ribeiro –
UENF Rod. Amaral Peixoto, km163, Av. Brennand, s/n P.O. BOX 119.562, Macaé/RJ, Brazil,
e-mail: slava@lenep.uenf.br

Предложен высокоэффективный метод моделирования соляного тектогенеза, основанный на аналитическом решении соответствующей краевой задачи механики жидкости. Метод может быть использован для прогнозирования геологической структуры и напряженно-деформированного состояния в областях соляной тектоники в интересах поисков и разведки месторождений углеводородов. Предложенный метод может быть особенно полезен для уточнения структуры там, где она плохо устанавливается традиционными методами сейсморазведки, – на крутопадающих крыльях диапиров и под солью.

Соляная тектоника, численное моделирование, эффективный метод, параллельные вычисления, подсольевые структуры

AN EFFICIENT 3D MODELING OF SALT TECTOGENESIS FOR PREDICTION SUBSALT STRUCTURE

B.V. Lunev¹, T.V. Abramov², V.V. Lapkovsky¹, V.I. Priimenko³

¹Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch
of Russian Academy of Sciences, Acad. Koptuyuga prosp., 3, Novosibirsk, 630090, Russia,
e-mail: LunevBV@ipgg.sbras.ru, LapkovskiiVV@ipgg.sbras.ru

²Inversion-Sensor Ltd, Nikolaeva str. 12, Novosibirsk, 630090, Russia, e-mail: timohamail@inbox.ru

³Laboratory of Engineering and Exploration of Petroleum, State University of Norte Fluminense Darcy Ribeiro –
UENF Rod. Amaral Peixoto, km163, Av. Brennand, s/n P.O. BOX 119.562, Macaé/RJ, Brazil,
e-mail: slava@lenep.uenf.br

An efficient method for modeling of salt tectogenesis based on an analytical solution of the corresponding boundary problem of fluid mechanics is proposed. The method can be applicable to predict the geological structure and stress-strain state in the areas of salt tectonics for the purposes of petroleum geology. Especially, the proposed method can be useful for clarifying the structure of the subsalt and steep wings of diapirs, where it is poorly established by traditional methods of seismic exploration.

Salt tectonics, numerical modeling, efficient method, parallel calculations, subsalt structures

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что размещение залежей углеводородов (УВ) во многих нефтегазовых провинциях в значительной мере контролируется соляной тектоникой. Известны и трудности, возникающие при геофизических исследованиях соляных диапиров. С еще большими проблемами связано бурение в них скважин. В таких условиях полезен обоснованный прогноз геологического строения исследуемых объектов и связанного с ними напряженно-деформированного состояния среды, позволяющий

оптимально спланировать поисково-разведочные работы и минимизировать связанные с ними затраты. Хорошим подспорьем в этом может быть численное моделирование эволюции соляных структур, нацеленное на воспроизведение конкретных изучаемых объектов.

Большой объем исследований, выполненных в этом направлении, позволил вскрыть основные закономерности соляного тектогенеза как ползущего течения, реализующего неустойчивость Рэлея–Тэйлора. Однако практическое использование численного моделирования до сих пор было ограничено. Дело в том, что воспроизведение формирования какой-либо конкретной геологической структуры требует расчета большого числа альтернативных моделей эволюции, чтобы по реально проверяемым результатам можно было выбрать оптимальный вариант. Поэтому важным требованием к программе моделирования для оперативного использования в практической геологии является быстрое действие.

К сожалению, существующие алгоритмы, основанные на применении разностных методов решения дифференциальных уравнений движения, требуют слишком большого времени для моделирования ситуаций, приближенных к реальным, – с большим количеством сложных границ слоев с разной плотностью. Не слишком помогает в этом случае и использование параллельных вычислений: в силу неизбежных частых обменов информацией между вычислительными узлами ускорение вычислений оказывается ограниченным пропускной способностью памяти, а не пиковой производительностью устройства.

Нам удалось обойти эти трудности и создать высокоэффективные программы расчета движимых архимедовыми силами ползущих течений, моделирующих процессы соляного тектогенеза [Лунев, Лапковский, 2009].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В соответствии с теорией простых жидкостей с затухающей памятью [Астарита, Марруччи, 1978], первым приближением реологического уравнения состояния для описания необратимого деформирования практически любого материала является уравнение ньютоновской жидкости. Это приближение адекватно для скоростей деформации, меньших некоторой критической для данного материала. Применительно к горным породам, критическая скорость деформации может быть оценена величиной порядка 10^{-14} с^{-1} [Лунев, 1996]. Ньютоновская вязкость при этом трактуется как «естественная вязкость» данного материала, определяемая как верхняя асимптота его вискозиметрических вязкостей. Имеющиеся данные [Jackson, Talbot, 1986] показывают:

- скорость деформации в процессах роста соляных куполов не превосходит указанный предел;
- несмотря на очень большую вариацию оценок эффективной вязкости осадочных пород, особенно соли, в зависимости от способа оценки и скорости деформации, верхняя асимптотика для всех близка – порядка $10^{20} \text{ Па} \cdot \text{с}$;
- характерная грибообразная форма зрелых соляных диапиров безусловно свидетельствует о близости вязкостей соли и вмещающих пород в данном процессе.

Таким образом, для рассматриваемого класса задач вполне корректным является представление среды однородно-вязкой ньютоновской жидкостью. Во всяком случае, решения, полученные в рамках этого приближения, будут верным первым приближением, независимо от поведения среды в более быстрых процессах.

Заведомая малость числа Рейнольдса (порядка 10^{-22}) определяет исследуемое течение как «ползущее», эволюция которого может быть представлена последовательностью связанных между собой квазистационарных состояний. Вычислительные трудности связаны именно с решением квазистационарной задачи – нахождением для каждого момента времени поля течения, обусловленного данным распределением плотности, определенным из предыдущего состояния.

В соответствии с изложенным, моделирование соляного тектогенеза в настоящей работе сводится к расчету происходящего под действием силы тяжести ползущего течения неоднородной по плотности ньютоновской жидкости с постоянной вязкостью, ограниченной сверху свободной поверхностью.

В прямоугольных декартовых координатах X_1, X_2, X_3 рассматривается ограниченное свободной поверхностью $F(x, t) = x_3 - h(x_1, x_2, t) = 0$ полупространство $x_3 \leq h(x_1, x_2, t)$; $\{x\} = \{x_1, x_2, x_3\}$, t – время, n – вектор единичной нормали к этой поверхности. Полупространство занято совокупностью несмешивающихся слоев (или замкнутых тел) D_k , разделенных границами $S_{k(x,t)}$, конфигурация которых

изменяется рассчитываемым течением. Движущей силой течения является нормальная сила тяжести \mathbf{g} , приложенная к возмущению плотности, связанному с конфигурацией границ $S_{k(x,t)}$. Начальные условия определяются какой-либо заданной конфигурацией границ $S_{k(x,t_0)}$. Плотность, напряжения и давление представляются в виде:

$$\begin{aligned}\rho(x,t) &= \rho_{(x_3,t)}^0 + \sigma(x,t), \\ \mathbf{T}(x,t) &= \mathbf{T}_{(x_3,t)}^0 + \boldsymbol{\tau}(x,t), \\ P(x,t) &= P_{(x_3,t)}^0 + p(x,t),\end{aligned}$$

где $\rho_{(x_3,t)}^0$, $\mathbf{T}_{(x_3,t)}^0$, $P_{(x_3,t)}^0$ – характеристики гидростатического состояния.

$$T_{ij}^0 = -\delta_{ij}P^0 = -\delta_{ij}\rho^0 g x_3,$$

где δ_{ij} – дельта Кронекера, а $\sigma(x,t)$, $\boldsymbol{\tau}(x,t)$, $p(x,t)$ – их малые возмущения. Течение \mathbf{v} , очевидно, связано с возмущениями.

Задача расчета ползущего течения записывается следующим образом.

Квазистационарная задача

в которой по $S_{k(x,t_n)}$, данному в некоторый момент времени t_n и соответствующему возмущению плотности $\sigma(x,t_n)$, отыскивается поле течения $\mathbf{v}(x,t_n)$, $p(x,t_n)$ и форма свободной границы $F(x,t_n)$.

$$\begin{aligned}\sigma(x,t_n) &= \rho(x,t_n) - \rho_{(x_3,t_n)}^0, \rho(x,t_n) = \rho_k \text{ для } \mathbf{x} \in W_k; \\ \mu \nabla^2 \mathbf{v} - \nabla p &= -\sigma \mathbf{g},\end{aligned}$$

где μ – коэффициент вязкости;

$$\begin{aligned}\nabla \cdot \mathbf{v} &= 0; \\ (\mathbf{T} \cdot \mathbf{n})_F &= 0; \\ \frac{\partial F}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla F &= 0;\end{aligned} \tag{1}$$

$$[\mathbf{v}]_{S_k} = 0, [P]_{S_k} = 0,$$

квадратные скобки означают скачок величины на границе.

Эволюционные уравнения,

из которых отыскивается эволюция границ $S_{k(x,t)}$,

$$\frac{\partial S_k}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla S_k = 0, \tag{2}$$

с некоторыми начальными условиями $S_{k(x,t_0)}$, $\mathbf{v}(x,t_0) = 0$.

Для расчета эволюции течения при заданном из (2) $S_{k(x)}$ и соответствующем возмущении плотности $\sigma(x)$ решается задача (1), после чего при полученном $\mathbf{v}(x)$ по малому промежутку времени δt интегрируются (2).

МЕТОДИКА

Малость амплитуды возмущения свободной границы h (относительно горизонтальных размеров) позволяет линеаризовать граничные условия квазистационарной задачи (1), получая

$$\begin{aligned} \mu \nabla^2 \mathbf{v} - \nabla p &= -\sigma \mathbf{g}, \\ \nabla \cdot \mathbf{v} &= 0, \\ (v_3 = \tau_{31} = \tau_{32} = 0)_{x_3=0}, \end{aligned} \quad (3)$$

с дополнительным условием определения возмущения свободной поверхности

$$(\tau_{33})_{x_3=0} = -\rho^0 |g| h, \quad (4)$$

(условие нулевого скачка на внутренних границах в (1) заменяется требованием непрерывности решения \mathbf{v} , p всюду в полупространстве).

Для однородно-вязкой несжимаемой ньютоновской жидкости, занимающей полупространство, ограниченное свободной поверхностью, решение квазистационарной задачи удалось отыскать аналитически в виде функции Грина [Лунев, 1986], так что отыскание ползущего течения на каждый момент времени сводится к вычислению интегралов свертки:

$$\begin{aligned} v_{i(x)} &= g \iiint \sigma_{(\xi)} V_{i(x,\xi)} d\xi_1 d\xi_2 d\xi_3, \\ p(x) &= g \iiint \sigma_{(\xi)} P_{(x,\xi)} d\xi_1 d\xi_2 d\xi_3, \end{aligned} \quad (5)$$

где $v_{i(x)}$ – скорость течения в точке $\{x\}$, $\sigma_{(\xi)}$ – аномальная плотность в точке $\{\xi\}$, $V_{i(x,\xi)}$, $P_{(x,\xi)}$ – соответствующие функции Грина.

Вычисление интеграла свертки дает большие вычислительные преимущества по сравнению с решением системы линейных алгебраических уравнений, возникающей при реализации разностных методов. Особенно эффективным использование функции Грина оказывается при организации массивных параллельных вычислений. При вычислении интеграла свертки каждое из вычислительных устройств может рассчитывать значения поля от «источников» – точек $\{\xi\}$, в которых задано $\sigma_{(\xi)}$, в некотором выделенном для него множестве «приемников» – точек $\{x\}$ без дополнительных обменов данными между устройствами. В результате, ускорение от применения параллельной архитектуры оказывается пропорциональным пиковой производительности системы, а не пропускной способности памяти. Очевидна также возможность масштабируемости задачи на сколь угодно большое количество вычислительных узлов.

Дополнительное ускорение вычислений дает возможность расчета скорости движения только на границах тел (слоев) с разной плотностью, вместо расчета поля скорости во всей области, обязательного при использовании разностных методов. Благодаря этому, в некотором смысле, снижается размерность задачи – вычисляется влияние трехмерного объекта (распределение плотности) на двумерный (поверхность). При этом явное описание движения границ увеличивает точность общего расчета течения.

Кроме того, наличие точного решения краевой задачи в виде функции Грина дает возможность использовать теорему о свертке и применить для вычисления интеграла (1) процедуры быстрого преобразования Фурье (БПФ). При этом прямое суммирование влияния всех «источников» на каждый «приемник» заменяется, в принципе, вычислением в каждой расчетной точке произведения Фурье – трансформант функции плотности и функции Грина с последующим обратным преобразованием. В таком случае скорость течения рассчитывается по сетке и ее значения на границах получаются путем интерполяции, что снижает точность, по сравнению с прямым суммированием в координатной области. Однако при достаточно густой сетке это снижение не принципиально, а скорость вычислений увеличивается радикально – на порядок и более. Такой способ целесообразно использовать для оперативного просчета различных вариантов модели, при подборе эволюции, воспроизводящей интересующий нас объект. После того как оптимальный вариант выбран, его можно уточнить, пересчитав методом прямого суммирования.

Заложенные в методе возможности удалось реализовать в программах параллельных вычислений, ориентированных на использование GPU [Abramov et al., 2017]. В разработанных программах

для трехмерного моделирования применяется явное описание границ тел в виде триангулированных поверхностей. Сетка источников при этом на каждом временном шаге восстанавливается из конфигурации границ тел (сетка источников имеет фиксированные размеры и является более грубой аппроксимацией области). Такое описание, понижая сложность задачи, одновременно увеличивает точность расчетов, что позволяет вместо двойной обходиться одинарной точностью (тесты показали, что использование одинарной и двойной точности дает практически идентичные результаты вплоть до глубоких стадий эволюции). Возможность использования одинарной точности позволяет значительно ускорить расчеты при использовании современных GPU, для которых характерна большая разница в производительности вычислений с одинарной и двойной точностью.

Для организации параллельных вычислений методом прямого вычисления интегралов (5) использовались надлежащим образом модифицированные методы решения задачи о взаимодействии многих тел [Harris et al., 2007]. При реализации метода, использующего теорему о свертке [Абрамов, 2016], прямые и обратные преобразования Фурье вычислялись с помощью библиотеки cuFFT [cuFFT User Guide, <http://docs.nvidia.com/cuda/cufft/index.html>].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Созданные программы позволяют рассчитывать развитие неустойчивости Рэлея–Тейлора для сложных, многослойных моделей на фоне наложенных (из геологических соображений) дифференцированных движений погружения-воздымания, сопровождающихся накоплением, уплотнением и размывом осадков. Для любой стадии эволюции также могут быть рассчитаны все компоненты напряженно-деформированного состояния и соответствующее возмущение рельефа дневной поверхности. Характерное время расчетов сложных моделей до глубоких стадий эволюции порядка 10 минут–1 часа. Расчеты проводились на персональном компьютере, оснащенный устройством Tesla c1060, и на одном вычислительном узле кластера НГУ с тремя Tesla M2090.

Расчеты хорошо согласуются с результатами физического моделирования исследуемого процесса в центрифугах (рис. 1) и позволяют воспроизвести формирование реальных геологических структур (рис. 2).

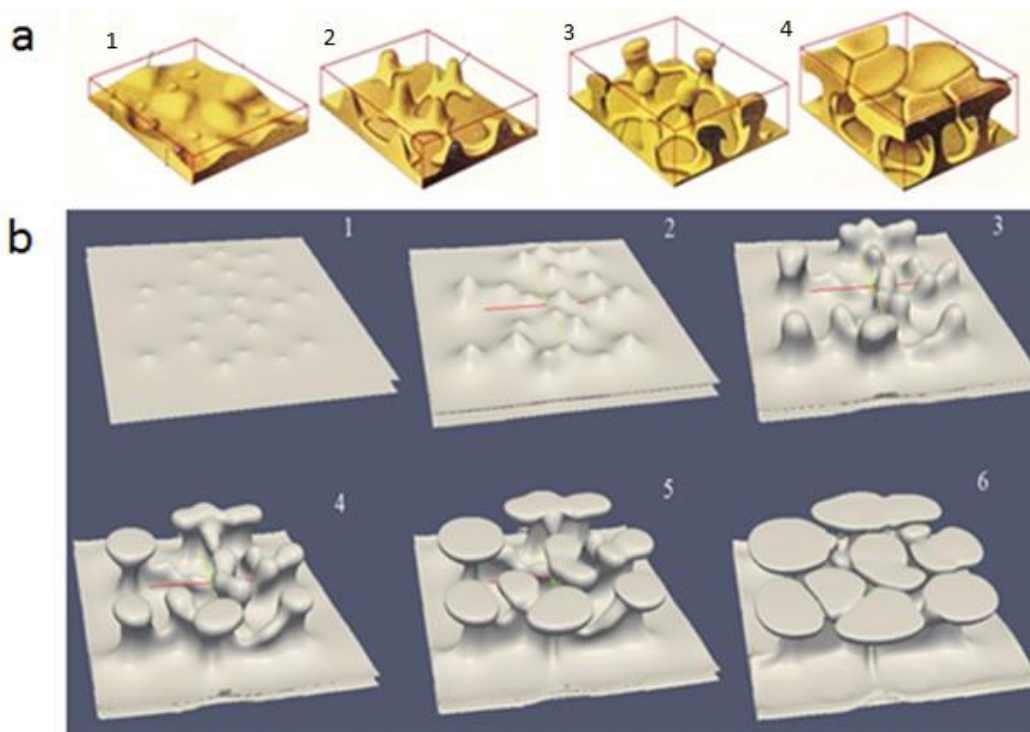


Рис. 1. Результаты физического моделирования – стадии всплывания низкоплотного слоя в центрифуге по [Talbot, Jackson, 1987] (a); последовательность стадий эволюции аналогичной системы, рассчитанные в ходе численного эксперимента (b). Очевидно принципиальное сходство результатов физического и численного моделирования, различия обусловлены разницей задания начальных возмущений (в расчетах использовано их задание с помощью генератора случайных чисел)

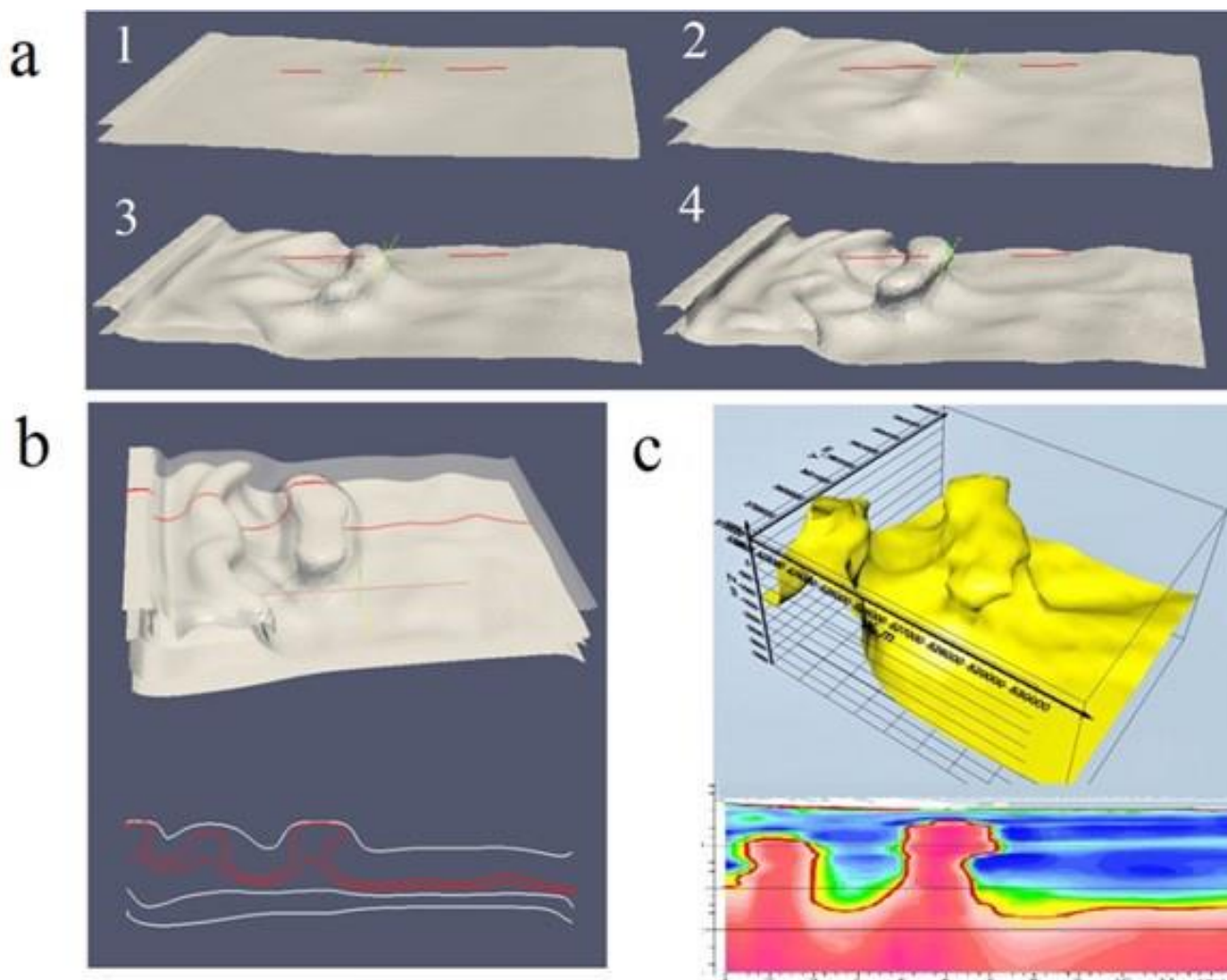


Рис. 2. Рассчитанные стадии эволюции (a); итоговое состояние модели (с разрезом), воспроизводящей солянокупольную структуру, исследованную геофизическими методами в Центральном Иране (b); 3D модель и разрез этой структуры, построенные по данным электро- и гравirazведки (c) [<http://nw-geo.ru/geophysics/oil-and-gas/izuchenie-solianogo-kupola-v-irane/>]

Возможность исследования эволюции многослойных моделей позволила получить теоретически и практически важные результаты относительно динамики и структур подсолевых слоев. Выяснилось, что всплывание диапиров вызывает в подсолевом комплексе противотечение, приводящее к развитию инверсионной складчатости, где диапирам надсолевого комплекса соответствуют синклинали, а междиапировым прогибам – антиклинали [Лунев, Лапковский, 2014]. Амплитуда складок по верхним подсолевым слоям может достигать 500 м и более, при длине волны, приблизительно совпадающей с волной развития возмущений всплывающего слоя. Наиболее интенсивно инверсионная складчатость выражена в первом километре под солью, далее с глубиной деформации быстро затухают. Ядра синклиналей под диапирами образуются за счет раздува мощности самого верхнего подсолевого слоя, верхняя часть которого втягивается в диапир. Пример эволюции такого рода показан на рис. 3.

Эти результаты приобретают особую важность в связи с тенденцией к поискам месторождений УВ в подсолевых комплексах (Прикаспий, атлантический шельф Африки и Южной Америки и др.), где современными сейсмическими методами установлены довольно интенсивные обратные изгибы подсолевых слоев [Тимурзиев, 2007; Hantschel, Kauerauf, 2009; Чердабаев, 2010], весьма похожие на рассчитанные нами.

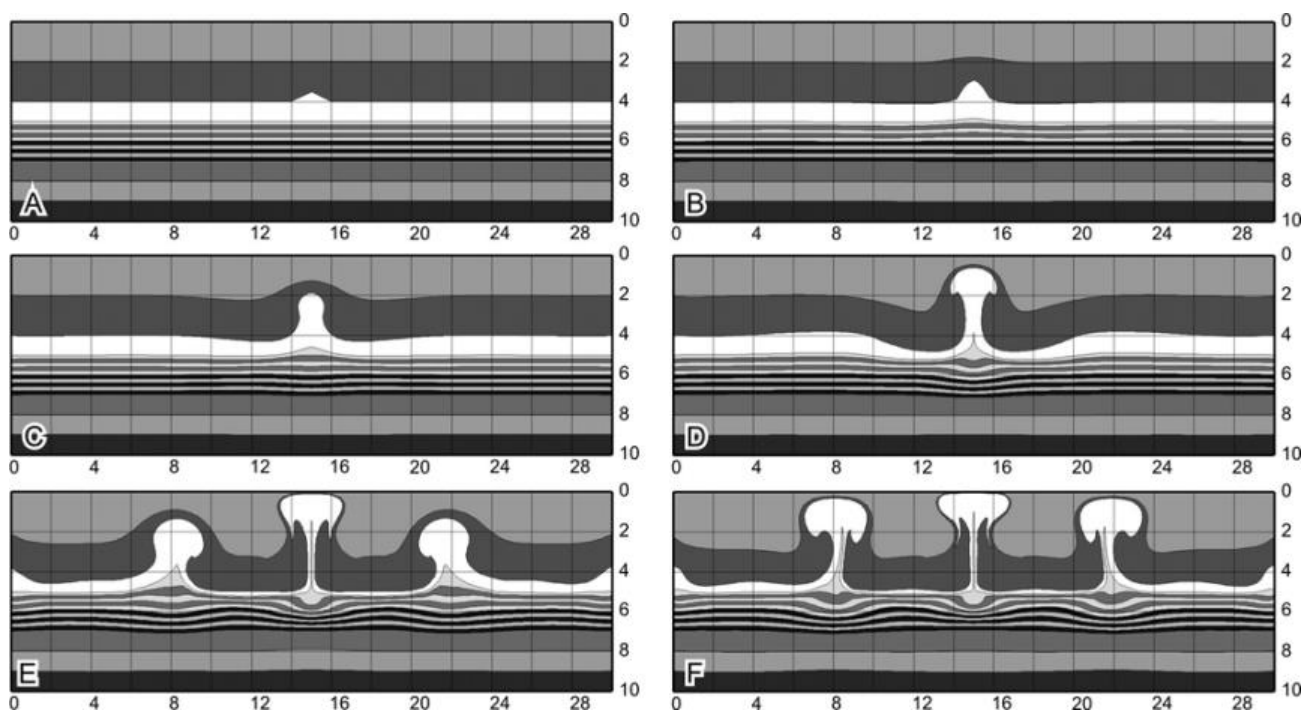


Рис. 3. Стадии развития неустойчивости Рэлея–Тэйлора, сопровождающегося формированием инверсионной складчатости ниже всплывающего слоя

ВЫВОДЫ

Разработан и реализован вычислительный алгоритм, который может быть полезным инструментом прогнозирования геологического строения и напряженно-деформированного состояния при поисках и разведке углеводородов в областях соляной тектоники. Полученные результаты показывают большие возможности разработанной методики в решении соответствующих геологических задач.

Работа выполнена в рамках программы IX.131.2.2 фундаментальных научных исследований СО РАН.

ЛИТЕРАТУРА

- Абрамов Т.В.** Быстрое численное решение краевых задач с известной функцией Грина через циклическую свертку // Вычислительные технологии. – 2016. – Т. 21, № 2. – С. 3–11.
- Астарита Дж., Марруччи Дж.** Основы гидромеханики неньютоновских жидкостей. – М.: Мир. – 1978. – 309 с.
- Лунев Б.В.** О природе верхнемантийной аномалии плотности под Срединно-Атлантическим хребтом и ее роли в рифтогенезе и спрединге // Геология и геофизика. – 1996. – Т. 37, № 9. – С. 87–101.
- Лунев Б.В.** Изостазия как динамическое равновесие вязкой жидкости // Доклады АН СССР. – 1986. – Т. 290, № 1. – С. 72–76.
- Лунев Б.В., Лапковский В.В.** Быстрое численное моделирование соляной тектоники: возможность оперативного использования в геологической практике // Физическая мезомеханика. – 2009. – Т. 12, № 1. – С. 63–74.
- Лунев Б.В., Лапковский В.В.** Механизм развития инверсионной складчатости в подсолевом комплексе // Физика Земли. – 2014. – № 1. – С. 59–65.
- Тимурзиев А.И.** Особенности строения и механизм формирования соляных диапиров Астраханского свода // Геофизика. – 2007. – № 6. – С. 16–29.
- Чердабаев Ж.М.** Структурно-тектоническое районирование подсолевых осадочных комплексов северо-восточной бортовой зоны Прикаспийской впадины (по материалам сейсморазведки) // Геофизика. – 2010. – № 3. – С. 30–35.

Abramov T., Lavrentiev M., Lunev B. Implementation and testing of the fast numerical algorithm for simulation of 3D gravity creeping flow of incompressible Newtonian fluid // 2nd International Conference on Applications in Information Technology (ICAIT-2016): Proceedings. – Aizu-Wakamatsu: University of Aizu, 2016 – P. 121–124.

cuFFT User Guide, <http://docs.nvidia.com/cuda/cufft/index.html>

Hantschel T., Kauerauf A.I. Fundamentals of Basin and Petroleum Systems Modeling. – Berlin: Springer, 2009. – doi: 10.1007/978-3-540-72318-9-1.

Harris M., Nyland L., Prins J. Fast n-body simulation with CUDA. In GPU Gems 3, Addison-Wesley. – Boston, MA, 2007. – P. 677–695.

Jackson M.P.A., Talbot C.J. External shapes, strain rates and dynamics of salt structures // Geological Society of America Bulletin. – 1986. – Vol. 97. – P. 305–323.

Talbot C.J., Jackson M.P.A. Salt tectonic // Scientific American. –1987. – Vol. 257, No. 2 – P. 70–79.

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

ЛУНЕВ Борис Валентинович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник ИНГТ СО РАН. Основные научные интересы: геодинамика и математическое моделирование природных нефтегазовых систем.

АБРАМОВ Тимофей Владимирович – младший программист ООО "Инверсия-Сенсор". Основные научные интересы: программирование, параллельное программирование.

ЛАПКОВСКИЙ Владимир Валентинович – кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией математического моделирования природных нефтегазовых систем ИНГТ СО РАН. Основные научные интересы: математическое моделирование природных нефтегазовых систем.

ПРИЙМЕНКО Вячеслав Иванович – профессор, Laboratory of Engineering and Exploration of Petroleum, State University of Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Основные научные интересы: теория и практика решения обратных задач.