

РЕШЕНИЕ ЭВОЛЮЦИОННОЙ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ ДЛЯ УТОЧНЕНИЯ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ В ОБЛАСТЯХ СОЛЯНОЙ ТЕКТониКИ

Б. В. Лунёв, В. В. Лапковский, М. С. Канаков, А. С. Застрожнов

Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, 630090, Новосибирск

УДК 550.311, 553.98, 517.958

Для определения структуры объектов соляной тектоники в зонах, исследование которых сейсморазведкой затруднено, или невозможно, используется восстановление сформировавшей эти объекты эволюции. Задача решается путем расчета различных вариантов эволюции, возможных в рамках имеющихся данных о геологическом строении исследуемого участка, и подбора такого варианта, который дает актуальное положение геологических границ, совпадающее с данными бурения и сейсморазведки там, где они надежны. Такое совпадение позволяет считать, что структура определена адекватно во всей области, в том числе и там, где она не установлена обычными методами — на крыльях диапиров и в подсолевом комплексе.

Ключевые слова: соляная тектоника, обратная задача, эффективный метод.

Введение

Одной из сложнейших и практически важных обратных задач геофизики остается задача определения геологической структуры в областях развития соляной тектоники. Изначально эта задача решалась, как классическая обратная задача гравиразведки, средствами которой устанавливалось само наличие соляных куполов. В последнее время, она рассматривается скорее, как обратная задача сейсмоки, являющейся основным методом исследования структуры платформенного чехла в связи с поисками и разведкой месторождений УВ. Сложность решения этой задачи обусловлена прихотливостью форм солянокупольных структур и, если иметь в виду сейсмоки — высокой контрастностью, как самих структур, так и физических свойств образующей их каменной соли. Обычная сейсморазведка позволяет надежно определять границы слоев в надсолевом комплексе там, где они расположены субгоризонтально — над вершинами соляных диапиров и днищами разделяющих их синклиналей. Положение же границ слоев на крутопадающих (а иногда и опрокинутых) крыльях диапиров и повсюду в подсолевом комплексе определяется неоднозначно. А именно эти зоны являются наиболее интересными, в плане поиска скоплений УВ, выяснение их структуры является практически важной задачей для нефтегазовой геологии.

Известный путь избавления от неоднозначности — ограничение класса возможных решений. В случае структур соляной тектоники, есть прекрасная возможность использовать для этого модель механизма их формирования, благодаря тому, что за полтора века исследований он основательно изучен. По-видимому, можно утверждать, что развитие соляной тектоники, главным образом, определяется тем, что соль, в отличие от терригенных и биогенных осадков, практически не уплотняется под весом вышележащих пород. Поэтому, после захоронения каменной соли, имеющей плотность 2100–2200 кг/м³, на глубину более 1000–1500 м, возникает инверсия плотности, так что соленосный слой начинает всплывать, формируя характерные структуры развития неустойчивости Рэлея–Тейлора. Динамика процесса и форма образующихся структур определяются соотношением плотностей, толщин и (в меньшей степени) реологических свойств всплывающего и перекрывающего слоев, темпами накопления последнего и временем. Возмущающими факторами, искажающими симметрию образующихся структур, являются наложенные, внешние, по отношению к системе, движения, краевые эффекты, обусловленные формой контура соляного пласта, и систематический

характер изменения веса перекрывающих отложений (увеличение их мощности или/и плотности в определенном направлении и во времени).

Такой процесс, в принципе, можно моделировать численно, применительно к каждому интересующему конкретному случаю. Воспроизведение региональных движений и накопления осадков, включая их уплотнение и эрозию во время подъемов территории, успешно реализуется существующими методами бассейнового моделирования. Развитие неустойчивости Рэлея–Тейлора, возникающей в процессе осадконакопления и формирующей собственно структуры соляной тектоники, моделируется решением соответствующей системы уравнений сплошной среды. Так что, если известны какие-либо параметры данной солянокупольной структуры, можно рассмотреть обратную задачу восстановления эволюции, приведшей к ее формированию.

Задача восстановления истории формирования солянокупольных структур, как развития неустойчивости Рэлея–Тейлора в высоковязкой ньютоновской жидкости, ставится в работах [1, 2, 3]. Там же показывается существование и единственность ее решения, дается методика решения и демонстрируются модельные и натурные примеры успешного восстановления эволюции системы, вплоть до начального состояния. Способ состоит в использовании отрицательного временного шага в эволюционном уравнении, связывающем между собой квазистационарные состояния системы, описываемые уравнением Стокса, так что от заданного состояния системы (актуального положения внутренних границ, определяющих распределение в исследуемом объеме параметров, прежде всего — плотности) рассчитываются предыдущие. Предполагается и показывается, что в отсутствие диссипации энергии, задача является устойчивой и корректной, независимо от направления времени.

Такой способ восстановления эволюции предполагает, что актуальное состояние системы полностью известно. Если иметь в виду реальные природные объекты, то, как уже говорилось, надежно обычно известно только положение границ надсолевого разреза, да и то лишь там, где они субгоризонтальны, структура же подсолевых слоев, вообще, гадательна. Понятно, что в этом случае решение обратной эволюционной задачи указанным путем невозможно. Важно, тем не менее, что доказана корректность и непосредственно показана принципиальная возможность решения такой задачи.

Опираясь на эти результаты, реконструировать формирование реальных объектов, при неполноте и неточности данных, можно путем расчета различных вариантов эволюции, как прямой задачи, с начальными условиями и параметрами, варьируемыми в рамках имеющихся данных о геологическом строении исследуемого участка, и подбора такого варианта, который дает актуальное положение геологических границ, совпадающее с данными бурения и с данными сейсморазведки там, где они надежны. Это классический метод подбора, успешно используемый для решения обратных задач геофизики. Возможность его практического применения определяется наличием достаточно эффективных вычислительных средств, позволяющих оперативно решать большое количество прямых задач на компьютерах доступных классов.

К сожалению, существующие алгоритмы, основанные на применении разностных методов решения дифференциальных уравнений движения, требуют слишком большого времени расчета эволюции моделей с большим количеством слоев с разной плотностью и сложными границами, воспроизводящих реальные структуры. Это обстоятельство, фактически, исключало использование подбора для решения обратной эволюционной задачи.

Нам удалось, на основе аналитического решения соответствующей краевой задачи, разработать высокоэффективные программы расчета эволюции неустойчивости Рэлея–Тейлора, позволяющие решать подбором обратную задачу восстановления истории формирования конкретных реальных объектов соляной тектоники. Поскольку при этом на каждый момент времени, в том числе — актуальный, вычисляется положение границ всюду в исследуемом объеме, то таким образом одновременно решается важная практическая задача определения структуры исследуемых объектов соляной тектоники там, где она не устанавливается обычными методами — на крыльях диапиров и в подсолевом комплексе.

1 Методика

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 $F(\vec{x}, t) = x_3 - h(x_1, x_2, t) = 0$ полупространство $x_3 \leq h(x_1, x_2, t)$; t — время, \vec{n} — вектор единичной нормали к этой поверхности. Полупространство занято совокупностью несмешивающихся жидкостей в виде

слоев (или замкнутых тел) D_k разделенных границами $S_k(\vec{x}, t)$, конфигурация которых изменяется рассматриваемым течением. Движущей силой течения является нормальная сила тяжести \vec{g} , приложенная к возмущению плотности, связанному с конфигурацией границ $S_k(\vec{x}, t)$. Начальные условия определяются какой-либо заданной конфигурацией границ $S_k(\vec{x}, t_0)$. Плотность, напряжения и давление представляются в виде: $\rho(\vec{x}, t) = \rho^0(x_3, t) + \sigma(\vec{x}, t)$; $T_{ij}(\vec{x}, t) = T^0(x_3, t) + \tau(\vec{x}, t)$; $P(\vec{x}, t) = P^0(x_3, t) + p(\vec{x}, t)$. Где ρ^0 , T^0 , P^0 — характеристики гидростатического состояния $T_{ij}^0 = -\delta_{ij}P^0 = -\delta_{ij}\rho^0 g x_3$, δ_{ij} — дельта Кронекера, а σ , τ , p — их малые возмущения. Течение \vec{v} , очевидно, связано с возмущениями.

Задача расчета ползущего течения, как обычно, разделяется на квазистационарную и эволюционную.

В квазистационарной задаче по $S_k(\vec{x}, t_n)$, данному в некоторый момент времени t_n , и соответствующему возмущению плотности $\sigma(\vec{x}, t_n)$ требуется найти поле течения $\vec{v}(\vec{x}, t_n)$, $p(\vec{x}, t_n)$ и форму свободной границы $F(\vec{x}, t_n)$. Малость возмущения свободной границы h (относительно горизонтальных размеров) и производных $\frac{\partial h}{\partial x_1}$, $\frac{\partial h}{\partial x_2}$, позволяет линеаризовать граничные условия квазистационарной задачи и записать ее относительно возмущений в виде

$$\begin{aligned}\sigma(\vec{x}, t_n) &= \rho(\vec{x}, t_n) - \rho^0(x_3, t_n), \quad \rho(\vec{x}, t_n) = \rho_k \quad \text{для} \quad \vec{x} \in W_k, \\ \mu \nabla^2 \vec{v} - \nabla p &= -\sigma \vec{g}, \quad \mu - \text{коэффициент вязкости}, \\ \nabla \cdot \vec{v} &= 0; \\ (v_3 = \tau_{31} = \tau_{32} = 0)_{x_3=0},\end{aligned}\tag{1}$$

с дополнительным условием определения возмущения свободной поверхности — $(\tau_{33})_{x_3=0} = -\rho^0 |\vec{g}| h$ (\vec{v} и p непрерывны всюду в полупространстве).

Эволюционная задача состоит в отыскании движения границ $S_k(\vec{x}, t)$ из уравнений

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

с некоторыми начальными условиями $S_k(\vec{x}, t_0)$, $\vec{v}(\vec{x}, t_0) = 0$.

Для расчета эволюции течения при заданном из (2) $S_k(x)$ и соответствующему возмущению плотности $\sigma(\vec{x})$ решается задача (1), после чего, при полученном $\vec{v}(\vec{x})$, по малому промежутку времени интегрируются (2).

Уравнения (2) легко решаются численно. Основные вычислительные трудности при расчете ползущих течений исследуемого типа, связаны с квазистационарной задачей (1). Ее решение удалось получить аналитически в виде функции Грина [4], так что расчет ползущего течения на каждый момент времени сводится к вычислению интегралов свертки:

$$\begin{aligned}v_i(\vec{x}) &= g \iiint \sigma(\vec{\xi}) V_i(\vec{x}, \vec{\xi}) d\xi_1 d\xi_2 d\xi_3, \\ p(\vec{x}) &= g \iiint \sigma(\vec{\xi}) P(\vec{x}, \vec{\xi}) d\xi_1 d\xi_2 d\xi_3,\end{aligned}$$

где $V_i(\vec{x}, \vec{\xi})$, $P(\vec{x}, \vec{\xi})$ — соответствующие функции Грина.

Вычисление интеграла свертки имеет большие вычислительные преимущества, по сравнению с решением системы линейных алгебраических уравнений, возникающей при реализации разностных методов [5]. Наличие точного решения краевой задачи в виде функции Грина позволяет применить теорему о свертке, с помощью процедуры быстрого преобразования Фурье [6], что и было реализовано в программе CoreModuleFFT, разработанной в лаборатории математического моделирования природных нефтегазовых систем ИНГГ СО РАН, использованной в настоящей работе.

Применение простой реологической модели для моделирования соляного тектогенеза в теоретическом плане оправдано следующими соображениями. Уравнение ньютоновской жидкости является первым приближением реологического уравнения состояния, для описания необратимого деформирования практически любого материала [7]. Это приближение адекватно для скоростей деформации, меньших некоторой критической для данного материала, которая для горных пород оценивается величиной порядка 10^{-14}с^{-1} . Ньютоновская вязкость при этом трактуется, как “естественная вязкость” данного материала, определяемая

как верхняя асимптота его вискозиметрических вязкостей. Имеющиеся данные [8] показывают: 1) скорость деформации в процессах роста соляных куполов не превосходит указанного предела; 2) 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} Па*с; 3) характерная грибовидная форма зрелых соляных диапиров безусловно свидетельствует о близости вязкостей соли и вмещающих пород в данном процессе. Таким образом, представление среды однородно-вязкой ньютоновской жидкостью для рассматриваемого класса задач является вполне корректным. Во всяком случае, решения, полученные в рамках этого приближения, будут верным первым приближением, независимо от поведения среды в более быстрых процессах.

В практическом отношении, адекватность предлагаемой модели демонстрируется примерами расчетов, приведенными ниже.

2 Результаты

Ниже, (рис. 1–3) представлен результат подбора эволюции, сформировавшей структуру соляной тектоники на одном из участков Александровского свода в северном Прикаспии. В данном случае специально не учитывалась пространственная неоднородность осадконакопления и наложенных региональных тектонических движений (хотя использованные программы предоставляют такие возможности) — исследовалось только влияние на структуру района соляного тектогенеза в чистом виде. Для подбора эволюции пришлось рассчитать несколько десятков ее вариантов. На рис. 1 приводятся несколько стадий подобранной эволюции структуры, соответствующие указанным моментам ее геологической истории.

На рис. 2 приводится итоговое, соответствующее актуальному, состояние модели, в сопоставлении с моделью этой же поверхности (кровля кунгурской соленосной толщи), построенной в результате интерпретации данных сейсморазведки.

На рис. 3. демонстрируется сопоставление разреза итогового состояния рассчитанной модели с сейсмическим разрезом и его существующей геологической интерпретацией.

Сопоставление рассчитанной поверхности с данными интерпретации сейсморазведки показывает следующее.

1. Согласно расчетам, заметные деформации начинаются в мелу, наиболее существенный их рост происходит в позднем палеогене, продолжаясь в неогене и квартере, что согласуется с геологическими данными.
2. Общая конфигурация структур в плане совпадает.
3. Амплитуды структур (как куполов, так и мульд) также, практически совпадают.
4. Рассчитанные структуры, в отличие от приведенной интерпретации, имеют грибовидную форму, что позволяет предположить более высокий поисковый потенциал зон примыкания под шляпками диапиров (анализ закономерностей динамики развития плотностной неустойчивости и сопоставление с данными по другим регионам развития соляного диапиризма показывает, что именно грибовидную форму и должны иметь зрелые диапиры при данных соотношениях толщины неустойчивого слоя и глубины его залегания).
5. В отношении структуры подсолевого комплекса, расчеты предсказывают глубокое засасывание верхних подсолевых отложений в диапир, создающее очень благоприятные условия для накопления УВ, и развитие в нижележащих отложениях характерной складчатости — инверсионной, по отношению к надсолевому разрезу (под диапирами формируются синклинали, а под мульдами — антиклинали), что также стоит учитывать при планировании поисково-разведочных работ (вопрос о механизме развития в подсолевых слоях инверсионной складчатости, регулярно обнаруживаемой детальными работами в последнее время, специально рассмотрен в работе [9]).

Таким образом, рассчитанная модель согласуется с интерпретацией сейсморазведки там, где последняя дает надежные результаты (вершины куполов и днища мульд), и дает новую информацию на крутопадающих крыльях соляных структур и под солью, где интерпретация данных сейсморазведки затруднена и неоднозначна.

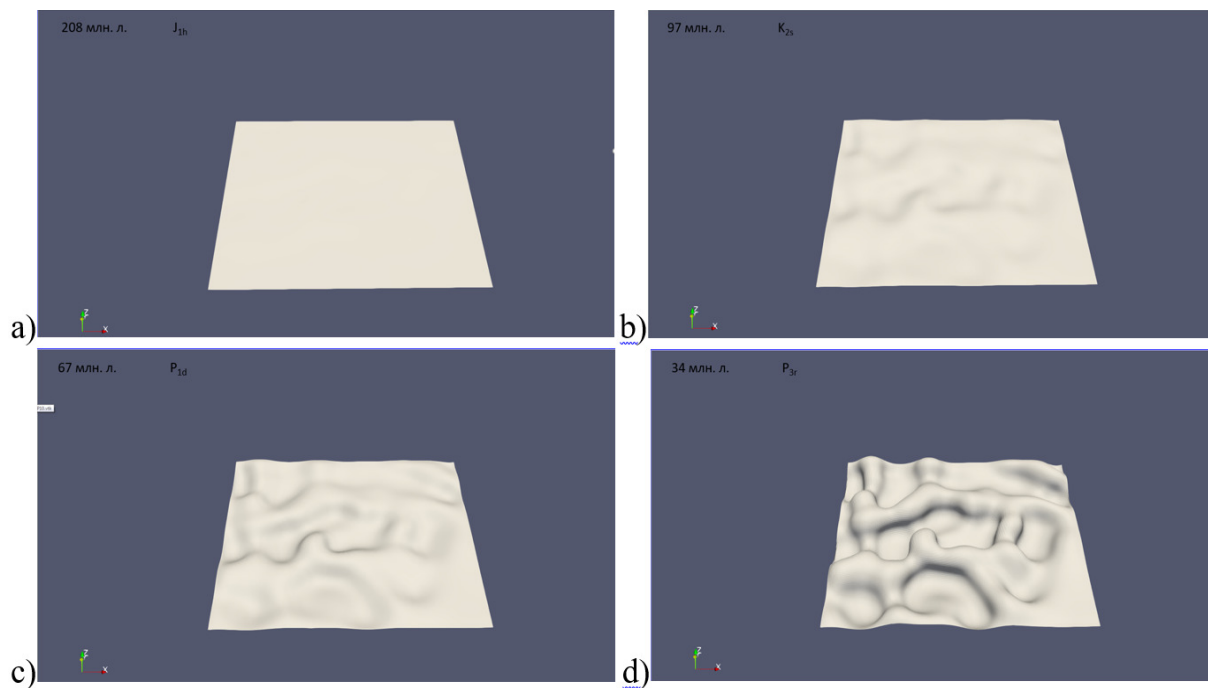


Рис. 1: Рассчитанные стадии эволюции кровли кунгурской соленосной толщи на моменты времени: а) 208 млн лет назад; б) 97 млн лет назад; в) 67 млн лет назад; д) 34 млн лет назад.

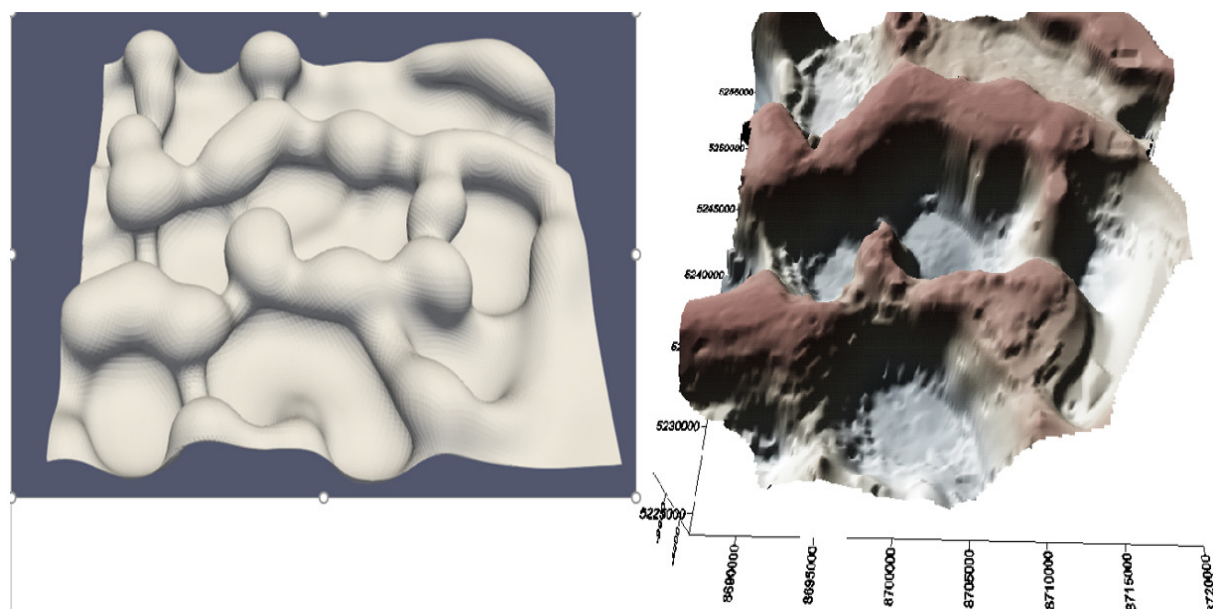


Рис. 2: Итоговое состояние поверхности соли в рассчитанной модели (слева) и модель этой поверхности, построенная по данным сейсморазведки (справа).

- [4] Лунёв Б.В. Изостазия как динамическое равновесие вязкой жидкости. // Доклады АН СССР, 1986, Т. 290, № 1, С. 72–76.
- [5] 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 // Proceedings of the 2nd International Conference on Applications in Information Technology. Aizu-Wakamatsu, Japan, October 6–8, 2016. The University of Aizu Press, 2016. P. 121–124
- [6] Абрамов Т.В. Быстрое численное решение краевых задач с известной функцией Грина через циклическую свертку // Вычислительные технологии. 2016. Т. 21, № 2. С. 3–11.
- [7] Астарита Дж., Марруччи Дж. Основы гидромеханики неньютоновских жидкостей. М., Мир, 1978, 309с.
- [8] Jackson M.P.A., Talbot C.J. External shapes, strain rates and dynamics of salt structures.// Geological Society of America Bulletin, 1986, V.97, P. 305–323.
- [9] Лунёв Б.В., Лапковский В.В. Механизм развития инверсионной складчатости в подсолевом комплексе. // Физика Земли, 2014, № 1, С. 59–65.

*Лунёв Борис Валентинович — к.ф.-м.н., с.н.с. Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН;
e-mail: bobval@mail@mail.ru;*

*Лапковский Владимир Валентинович — к.г.-м.н., зав. лабораторией Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН;
e-mail: lapk@ngs.ru;*

*Канаков Михаил Сергеевич — н.с. Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН;
e-mail: KanakovMS@ipgg.sbras.ru;*

*Застрожных Андрей Станиславович — к.г.-м.н., зав. лабораторией Всероссийского научно-исследовательского геологического института;
e-mail: bobval@mail@mail.ru.*

Дата поступления — 31 мая 2017 г.