

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗВИТИЯ ИНВЕРСИОННЫХ СКЛАДОВ В ПОДСОЛЕВЫХ СЛОЯХ

Борис Валентинович Лунев

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. ак. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Ак. Коптюга, 3, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, e-mail: bobvalmail@mail.ru

Владимир Валентинович Лапковский

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. ак. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Ак. Коптюга, 3, кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией, e-mail: lapk@ngs.ru

Тимофей Владимирович Абрамов

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. ак. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Ак. Коптюга, 3, аспирант, младший научный сотрудник, e-mail: abramov@ipgg.sbras.ru

Численное моделирование архимедового всплывания соляного пласта позволяет предсказать, что при наличии развитых диапиров (от стадии «палец» и выше), непосредственно под подошвой соляных отложений следует ожидать ~ 2-километровую зону инверсионной складчатости, где диапирам надсолевого комплекса соответствуют синклинали, а междиапировым прогибам – антиклинали, деформации затухают с глубиной. Развитие инверсионной складчатости обусловлено исключительно течением, вызванным всплыванием неустойчивого слоя.

Ключевые слова: численное моделирование, подсолевые слои, инверсионная складчатость.

NUMERICAL MODELING OF INVERSION FOLDING IN THE SUBSALT LAYERS

Boris V. Lunev

A. A. Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuga, Senior Research Fellow, Candidate of Physics and Mathematics, e-mail: bobvalmail@mail.ru

Vladimir V. Lapkovsky

A. A. Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuga, Chief of laboratory, Candidate of Geological and Mineralogy, e-mail: lapk@ngs.ru

Timofey V. Abramov

A. A. Trofimuk Institute of petroleum geology and geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, postgraduate, Junior Researcher, e-mail: abramov@ipgg.sbras.ru

The numerical modeling of Archimedean upwelling of a salt bed predicts that, with mature diapirs (from a finger stage and later), an about 2-km-thick zone of inversion (mirror) folding, where the suprasalt diapirs correspond to the subsalt synclines while the suprasalt inter-diapir sags correspond to the anticlines in the subsalt, should be expected immediately below the bottom of the salt deposits. These deformations decay with depth. The development of the inversion folding is exceptionally due to the flow caused by the rising of the unstable layer.

Key words: numerical modeling, subsalt layers, inversion folding.

До сих пор, при исследовании областей солянокупольной тектоники, основное внимание было сосредоточено на структуре кровли соли и надсолевых слоев. Однако, в последнее время усиливается интерес к изучению подсолевых отложений. Современные методы сейсморазведки позволяют исследовать структуру подсолевых слоев и в ряде случаев обнаруживают выраженный инверсионный характер развитых в них складок, по отношению к надсолевому комплексу – куполам соответствуют синклинали, а межкупольным мульдам антиклинали [1,2, 3, 4].

Для объяснения механизма формирования инверсионной складчатости геологами привлекаются различные гипотезы, включая предположения о специфическом вулканизме, связанном с динамикой астеносферы. Методами моделирования деформации подсолевых слоев до сих пор детально не исследовались. Единственным эффектом, установленным ранее относительно поведения «подсолевого субстрата», было выраженное течение вещества его верхних горизонтов к «корням» растущих диапиров, с последующим втягиванием в диапир на более или менее высокие уровни (физическое моделирование – [5], численное – [6]). Благодаря разработанным нами высокоэффективным методам численного моделирования процессов соляного тектогенеза [7, 8], нам удалось исследовать поведение многослойных моделей и показать, что развитие инверсионной складчатости обусловлено динамикой развития плотностной неустойчивости и непосредственно связано с ростом диапиров.

В 2D постановке рассчитана эволюция нескольких вариантов следующей модели. Километровый слой «соли» плотностью 2200 кг/м^3 перекрыт двухкилометровым слоем с плотностью 2400 кг/м^3 и, выше, еще одним двухкилометровым слоем с плотностью 2300 кг/м^3 . «Подсолевой» комплекс состоит из пяти километровых слоев с плотностями, равномерно увеличивающимися от 2500 до 2600 кг/м^3 . Каждый из двух верхних слоев подсолевого комплекса разделен на пять слоев по 200 м с одинаковыми плотностями: 2500 кг/м^3 с 5 до 6 км и 2525 кг/м^3 с 6 до 7 км . На кровле «соляного» слоя задано начальное возмущение. Эволюция модели представлена на рис. 1.

В «надсолевой» толще наблюдается обычная картина развития последовательных генераций «соляных» диапиров с длиной волны, определяемой параметрами системы. В «подсолевом» же комплексе наблюдается эффект развития инверсионной складчатости. По сторонам растущего возмущения на кровле легкого слоя становятся заметны депрессии, обусловленные погружением вышележащего плотного вещества – начинают формироваться так называемые «антидиапиры» (рис. 1.с). Одновременно и в связи с этим, «подсолевые» слои, начиная с глубины около 500 м под исходным положением подошвы «соли», деформируются обратным по отношению к вышележащему комплексу образом: под

растущим диапиром формируется синклиналь (прогиб), а под его краевыми депрессиями – напротив, слабо выраженные антиклинали. С ростом диапира и краевых депрессий в «надсолевом» комплексе, обратные деформации в «подсолевом» комплексе усиливаются, захватывая наверху и нижнюю часть 200-метрового слоя, непосредственно подстилающего «соль» (рис. 1.d.). По глубине область обратных деформаций ограничивается, в основном, 2,5-километровым интервалом. Рост диапиров второй генерации, по бокам первоначального, в целом, повторяет его историю, вызывая под ними развитие аналогичных обратных синклиналей. Максимальные амплитуды обратных синклиналей теперь наблюдаются под этими боковыми диапирами, тогда как деформации под центральным диапиром локализуются в ~2-километровом интервале глубин (границы слоев на глубинах 8 и 9 км под центральным диапиром обнаруживают слабый изгиб вверх). При этом синклиналь в слоях, непосредственно подстилающих «соль» под центральным диапиром становится более контрастной (рис. 1.e.). При дальнейшем росте боковых диапиров, деформации в «подсолевом» комплексе под ними повторяют развитие таковых под первоначальным, становясь все более интенсивными и захватывая нижнюю часть верхнего 200-метрового слоя. Обратная синклиналь под центральным диапиром, увеличивая контрастность, еще несколько уменьшает амплитуду и локализуется в слое мощностью около 1,6 км, тогда как прогибание под боковыми диапирами по-прежнему охватывает ~2,5-километровый интервал (рис. 1.f.).

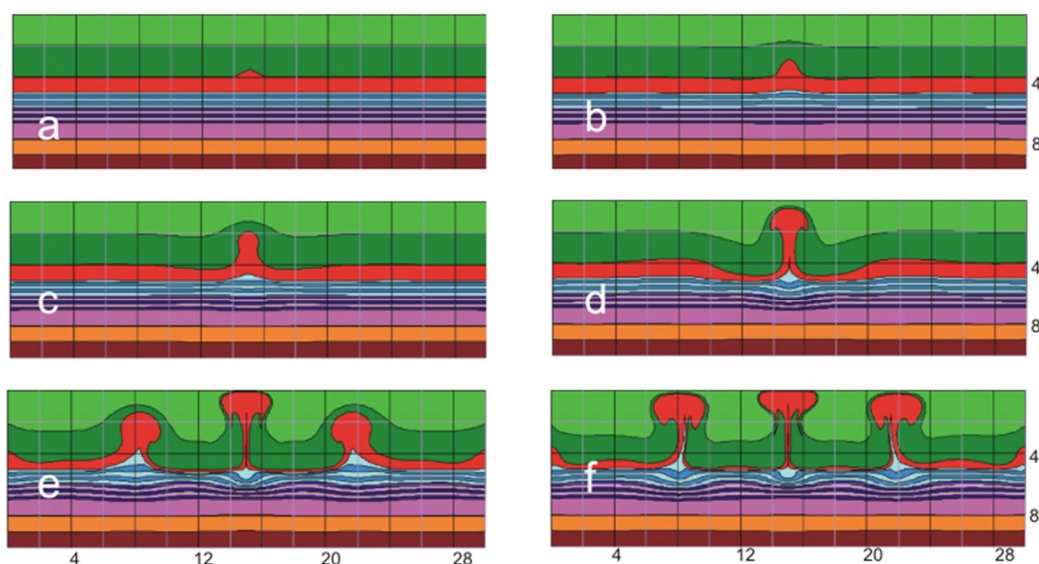


Рис. 1. Деформация надсолевых и подсолевых слоев в процессе развития плотностной неустойчивости. Последовательность стадий – а, b, c, d, e, f. Линейные размеры в км. Всплывающий низкоплотный слой («соль») – красный

Как показали численные эксперименты, изменения исходных параметров модели, заметно сказываясь на эволюции «соляного» слоя и «надсолевой» структуры, слабо влияют на картину деформирования «подсолевого» комплекса. Наибольший эффект дает изменение градиента плотности в «подсолевом» комплексе. В случае одинаковой плотности всех «подсолевых» слоев, инверсионная складчатость, не ограничиваясь 2,5-км интервалом, распространяется вниз, плавно затухая с глубиной (рис. 2). В случаях увеличения градиента плотности в «подсолевом» комплексе и увеличения скачка плотности на подошве «соли», интервал глубин развития подсолевых деформаций немного сужается и сами образующиеся складки делают более контрастными – приобретает коробчатый облик и даже опрокинутые залегания (рис. 3). Устойчивость характера и области развития подсолевой инверсионной складчатости, по-видимому, связана с гравитационной устойчивостью «подсолевого» комплекса.

Те же принципиальные характеристики эволюции обнаруживаются и при расчете 3D моделей, представленных на рис. 2.

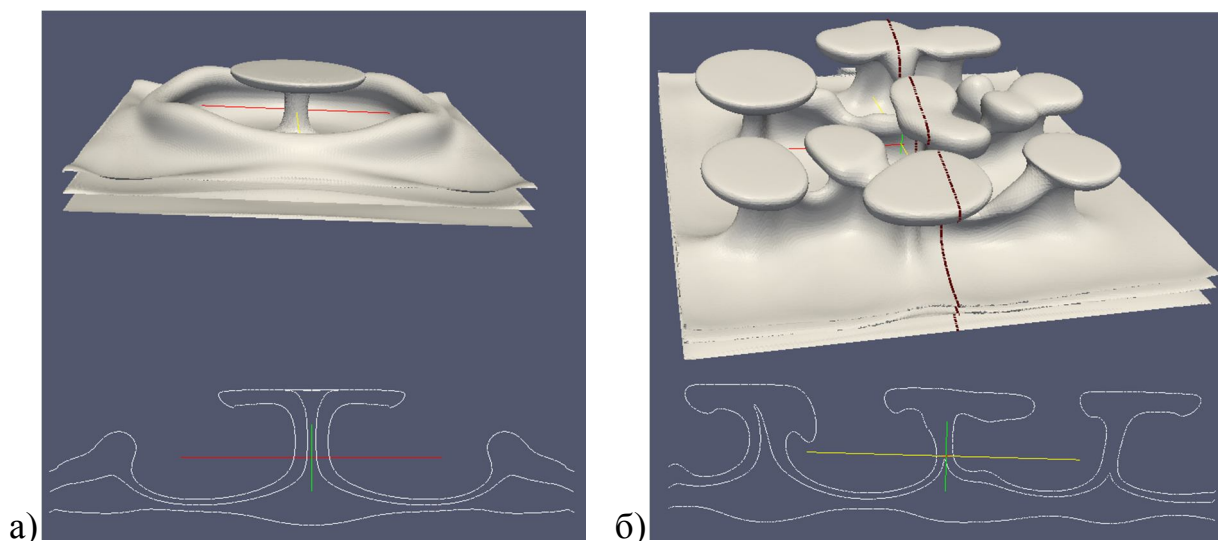


Рис. 2. Результаты расчета 3D моделей – вверху объемное изображение, внизу – его разрез:

- а) – развитие одиночного начального возмущения (разрез через ось симметрии);
- б) – развитие хаотичных начальных возмущений (линия разреза показана на объемной модели)

Основываясь на результатах настоящей работы, можно считать, что развитие инверсионной складчатости под солью обусловлено просто самой динамикой всплывания неустойчивого слоя. Можно предсказать, что при наличии развитых диапиров (от стадии «палец» и выше), под подошвой соляных отложений следует ожидать ~2-км область инверсионной складчатости, где диапирам надсолевого комплекса соответствуют синклинали, а междиапировым прогибам – антиклинали. Амплитуда складок

по верхним подсоловым слоям может достигать 500м и более при длине, совпадающей со складками надсолового комплекса. 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 подсолового слоя, верхняя часть которого втягивается в диапир.

Учет эффекта, предсказываемого в настоящей работе, может быть полезен при постановке сейсморазведочных и буровых исследований подсоловых отложений в областях развитой соляной тектоники. Помимо коррекции существующих представлений о возможной структуре подсолового комплекса, при прогнозе его нефтегазоносности, можно принять во внимание расчет сопутствующего эволюции напряженно-деформированного состояния, который обнаруживает интенсивное вертикальное растяжение и относительное разряжение (отрицательное возмущение давления) в «подкорневых» зонах растущих диапиров. Если соль подстилается коллекторами, то можно, по-видимому, говорить о первоочередной перспективности раздувов верхнего подсолового слоя, так как отрицательная аномалия давления вместе с антиклинальным изгибом подошвы соли должны способствовать притоку углеводородов, а интенсивное вертикальное растяжение может улучшать коллекторские свойства породы и извлекаемость. Иная литология подсолового разреза может сделать более интересными антиклинали, развивающиеся под междиапировыми мульдами.

Работа выполнена в рамках программы VIII.73.2 фундаментальных научных исследований СО РАН.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тимурзиев А.И. Особенности строения и механизм формирования соляных диапиров Астраханского свода // Геофизика, 2007, № 6, с.16 – 29.
2. Hantschel T. & Kauerauf A.I. Fundamentals of basin and Petroleum Systems modeling. DOI 10.1007/978-3-540-72318-9_1, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2009, 476 p.
3. Чердабаев Ж.М. Структурно-тектоническое районирование подсоловых осадочных комплексов северо-восточной бортовой зоны Прикаспийской впадины (по материалам сейсморазведки) // Геофизика, 2010, № 3, с.30 – 35.
4. Thompson L. & Oftebro C. Salt gets in your eyes^ the geological challenges and solutions to sub-salt exploration // First break, 2011, v. 5, № 3, p. 93 – 97.
5. Рамберг Х., Сила тяжести и деформации в земной коре. М., Недра, 1985, 399 с.
6. Мартынов Н.И., Танирбергенов А.Г. Численное моделирование формирования соляных диапиров в земной коре. // Математический журнал. Алматы. 2006, т.1 (19), с. 67-73.
7. Лунёв Б.В. Изостазия как динамическое равновесие вязкой жидкости. // Доклады АН СССР, 1986, т.290, № 1, с.72-76.
8. Лунёв 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.

© Б. В. Лунев, В. В. Лапковский, Т. В. Абрамов, 2014