

На правах рукописи

ЛУНЁВ БОРИС ВАЛЕНТИНОВИЧ

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ПРОЦЕССОВ СОЛЯНОГО ТЕКТОГЕНЕЗА
НА БАЗЕ АНАЛИТИЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ
СТАЦИОНАРНОЙ КРАЕВОЙ ЗАДАЧИ
ДЛЯ ПОЛУПРОСТРАНСТВА
ОДНОРОДНО-ВЯЗКОЙ НЬЮТОНОВСКОЙ
ЖИДКОСТИ**

25.00.10 – геофизика, геофизические методы
поисков полезных ископаемых

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Новосибирск 2009



Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук
Институте нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука
Сибирского отделения РАН

Научный руководитель:

доктор геолого-минералогических наук,
член-корреспондент РАН
Конторович Владимир Алексеевич

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук
Доровский Виталий Николаевич

доктор физико-математических наук
Назарова Лариса Алексеевна

Ведущая организация:

Учреждение Российской академии наук Институт
вычислительной математики и математической геофизики
Сибирского отделения РАН (г. Новосибирск)

Защита состоится 11 сентября 2009 г. в 11 часов на заседании
диссертационного совета Д 003.068.03 при Учреждении Российской
академии наук Институте нефтегазовой геологии и геофизики
им. А.А. Трофимука Сибирского Отделения РАН в конференцзале
ИНГГ СО РАН

Адрес: пр-т Ак. Коптюга, 3, Новосибирск-90, 630090

Факс: (383) 333-25-13

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИНГГ СО РАН

Автореферат разослан 6 августа 2009 г.

И.о. ученого секретаря
диссертационного совета
д.т.н.



И.Н. Ельцов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Объект исследования – процессы соляного тектогенеза в осадочных чехлах платформ на **предмет** их математического моделирования ползущим течением, происходящим под действием архимедовых сил, на основе аналитического решения квазистационарной краевой задачи для однородно-вязкой ньютоновской жидкости, занимающей полупространство со свободной границей.

Актуальность исследования. До сих пор, несмотря на применение современных вычислительных методов и многопроцессорных компьютеров, моделирование соляного тектогенеза для реальных геологических ситуаций (с большим количеством тел с разной плотностью) требует весьма длительных расчетов, что делает его малопригодным для оперативного использования в практической геологии. Для подбора эволюции реальных солянокупольных структур, выявляемых по геофизическим данным, в целях нефтегазовой геологии, требуется радикально увеличить производительность программ моделирования образования сложных солянокупольных структур.

Цель исследования – получить теоретическую основу для существенного увеличения быстродействия программ численного моделирования процессов соляного тектогенеза, путем отыскания аналитического выражения функции Грина для квазистационарной краевой задачи, являющейся ядром моделей такого рода.

Научная задача: аналитически получить выражение функции Грина для стационарной краевой задачи о действии архимедовых сил в полупространстве несжимаемой однородно-вязкой ньютоновской жидкости со свободной поверхностью. На основе полученного решения разработать алгоритм численного моделирования соляного тектогенеза и реализовать его в компьютерной программе.

Поставленная задача решалась **поэтапно:**

1. Обоснование корректности моделирования процессов соляного тектогенеза ползущим течением однородно-вязкой ньютоновской жидкости, с выделением, в качестве основной, стационарной краевой задачи для полупространства со свободной границей.

2. Линеаризация граничных условий задачи, сформулированной в п.1.

3. Аналитическое решение линеаризованной задачи, путем отыскания ее функции Грина.

4. Разработка алгоритма численного моделирования процесса соляного тектогенеза на основе полученного решения и его численная реализация в виде компьютерной программы.

5. Тестирование корректности и эффективности работы построенной программы (и адекватности используемого подхода, в целом), путем сравнения результатов ее применения с результатами аналогичных численных экспериментов других авторов, опубликованными результатами масштабного физического моделирования и литературными данными о структуре и характере развития реальных соляных диапиров.

6. Оценка возможностей применения в геологической практике программ, построенных на основе полученного решения, путем проведения серии численных экспериментов.

Фактический материал и методы исследования. Основу работы составляет математическое моделирование. Теоретической базой постановки и решения задачи являлись: теория простых жидкостей с затухающей памятью (Дж. Астарита и Дж. Маруччи, 1978); теория движения ньютоновской жидкости (Ландау Л.Д.и. Лифшиц Е.М, 1986; Бэтчелор Дж., 1973); метод возмущений (Найфэ А.Х., 1976); метод Грина – (введение фиктивного источника поля). Определения характерных скоростей деформации в процессе соляного тектогенеза и асимптотической («естественной») ньютоновской вязкости осадочных пород, использованные при обосновании выбора реологической модели, взяты из работ (Sannemann D., 1968; Seni S. J., Jackson M.P.A., 1983; Weijermars R. Schmeling H., 1986; Jackson M.P.A., Talbot C.J., 1986, 1989; van Keken P.E., Spiers C.J., van den Berg A.P., Muyzert E.J., 1993). Из этих же работ взяты данные о формах, структуре, фазах развития и скоростях роста реальных соляных диапиров. Для верификации работы программы, основанной на полученном решении, и оценки ее сравнительной эффективности, использовались, как классические в данной области результаты расчетов (Woigt W.-D., 1978; Woigt W.-D., Neugebauer H.J., 1980), так и современные результаты применения численных методов решения аналогичных задач (Zaleski S. and Julien P., 1992; Podladchikov Y., Talbot C., and Poliakov A.N.B., 1993; Наймарк Б.М., Исмаил-Заде А.Т., Короткий А.И., 1998; Исмаил-Заде А.Т., Цепелев И.А., Тэлбот К., Остер П., 2000; Volozh Yu.A., Talbot C.J., Ismail-Zadeh A.T., 2003; Ismail-Zadeh, A.T., Tsepelev, I.A., Talbot, C., and Oster, P., 2004; Ismail-Zadeh A.T., Tsepelev I.A., Talbot C.J., Korotkii A.I., 2004; Мартынов Н.И., Танирбергенов А.Г., 2006; Massimi P., Quarteroni A., Saleri F. and Scrofani G., 2007 и другие). Другим средством проверки адекватности программы моделирования послужили данные по масштабному физическому моделированию исследуемых течений в центрифугах (Рамберг Х., 1985). При моделировании характерных

геологических ситуаций проявления соляного тектогенеза использовались сведения о разрезах осадочных бассейнов из различных источников учебно-справочного характера. Моделирование формирования солянокупольных структур Предьенисейского осадочного бассейна основано на данных (Бененсон В.А., 1989; Дашкевич Н.Н., Каштанов В.А., 1990; Каштанов В.А., Филиппов Ю.Ф., 1994; Елкин Е.А., Каштанов В.А., Конторович А.Э. и др., 2001; Конторович А.Э., Конторович В.А., Филиппов Ю.Ф. и др., 2003; Елкин Е.А., Каштанов В.А., Кринин В.А. и др., 2003).

Защищаемые научные результаты.

1. Решение в виде аналитического выражения функции Грина 3-мерной стационарной задачи о действии архимедовых сил в полупространстве однородно-вязкой ньютоновской жидкости с краевыми условиями типа «скользящей границы», аппроксимирующими условия свободной поверхности весомой жидкости в случае ее малых плавных возмущений.

2. Алгоритм моделирования процессов соляного тектогенеза, основанный на свертке полученного решения с возмущением плотности, и его 2-мерная численная реализация (последняя – в соавторстве).

3. Теоретическое обнаружение (предсказание) эффекта формирования инверсионной складчатости под всплывающим низкоплотным слоем.

Научная новизна работы. Личный вклад автора.

1. Впервые получено решение в виде аналитического выражения функции Грина 3-мерной стационарной задачи о действии архимедовых сил в полупространстве однородно-вязкой ньютоновской жидкости с краевыми условиями типа «скользящей границы» (“free slip conditions” в англоязычной литературе). Этот тип граничных условий широко используется в гидродинамике для аппроксимации условий свободной поверхности весомой жидкости в случае ее малых плавных возмущений.

2. На основе полученного решения разработан алгоритм численного моделирования соляного тектогенеза, 2-мерный вариант которого реализован в компьютерной программе для персональных компьютеров. (Программа сделана совместно с В.В. Лапковским, вклад автора состоял в разработке вычислительной части алгоритма.)

3. Посредством созданной программы произведен ряд численных экспериментов. Исследована эволюция разрезов, подобных реальным

геологическим структурам, включающих многочисленные слои и замкнутые тела с разной плотностью.

4. Показана принципиальная возможность использования данного варианта геодинамического моделирования в качестве «естественного» регуляризатора при решении обратной задачи гравиразведки для сложных солянокупольных структур: численные эксперименты показали возможность подбора модели эволюции, создающей структуру, которая соответствует заданной по возмущениям гравитационного поля и свободной поверхности.

5. Численными экспериментами исследованы сопутствующие всплыванию диапиров деформации подсолевых слоев. Теоретически предсказан эффект формирования в подсолевом комплексе инверсионной складчатости (обратной к той, которая развивается над солью).

6. Подобраны варианты эволюции, воспроизводящие специфические структуры соляной тектоники в палеозойских отложениях Предьенисейского осадочного бассейна.

Теоретическая и практическая значимость. Полученное автором решение позволяет обойти наиболее сложную и трудоемкую часть вычислительного процесса в расчетах ползущих течений, развивающихся под действием архимедовых сил в среде, ограниченной свободной поверхностью, в частности – при моделировании соляного тектогенеза. Решение, полученное для однородно-вязкой ньютоновской среды, можно рассматривать как наиболее общее решение первого приближения, по отношению к которому решения, учитывающие более сложную реологию, являются специальными и могут использоваться для его уточнения. Использование полученного решения позволяет существенно (для больших задач – на многие порядки) повысить производительность программ моделирования соляного тектогенеза (и аналогичных процессов), что дает возможность оперативного расчета эволюции для систем с большим количеством сложных границ и сложным распределением плотности.

Повышение эффективности программ открывает возможность оперативного подбора моделей эволюции конкретных объектов соляной тектоники, удовлетворяющих имеющейся (неполной) геолого-геофизической информации и, тем самым, прогнозировать (в первом приближении) строение и историю формирования этих объектов в целях оптимизации структурно-геологических и поисково-разведочных работ на углеводороды.

Учет предсказанного автором эффекта формирования инверсионной складчатости под всплывающим слоем, в сочетании с расчетом эволюции структуры и напряженно-деформированного состояния, может быть полезен при планировании поисково-разведочных работ в подсолевом комплексе.

Апробация работы и публикации

Основные результаты работы докладывались на IX-ой международной научно-практической конференции «Геомодель – 2007» (г. Геленджик, 2007г.) и на Всероссийской научной конференции с участием иностранных ученых «Фундамент, структуры обрамления Западно-Сибирского мезозойско-кайнозойского осадочного бассейна, их геодинамическая эволюция и проблемы нефтегазоносности» (г. Тюмень, 2008г.). Работа докладывалась на семинаре отдела математических задач геофизики Института вычислительной математики и математической геофизики СО РАН и объединенном семинаре «Информационно-вычислительные технологии (численные методы механики сплошной среды)» Института вычислительных технологий СО РАН, кафедры математического моделирования НГУ и кафедры вычислительных технологий НГТУ, о чем имеются выписки из протоколов семинаров.

По теме диссертации опубликованы 7 печатных работ, в том числе 4 в ведущих рецензируемых научных журналах, определенных высшей аттестационной комиссией: одна – в «Докладах АН СССР», две – в «Геологии и геофизике» и одна – в «Физической мезомеханике».

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, 3-х глав и заключения, содержит 138 страниц машинописного текста, 33 рисунка, и список литературы из 136 наименований.

Тема диссертации связана с плановыми исследованиями Института нефтегазовой геологии и геофизики по программам фундаментальных исследований СО РАН на 2007 – 2009 г., номер гос. регистрации 01200705125.

Благодарности

Работа выполнена под научным руководством д. г.-м. н., члена-корреспондента РАН В.А. Конторовича, которому автор искренне признателен за внимание и поддержку.

Автор пользуется случаем также выразить свою искреннюю признательность д. ф.-м. н., профессору Л.А. Маслову, д. г.-м. н., профессору И.К. Туезову и академику Ю.А. Косыгину, стоявшим у истоков данной работы.

Автор помнит и благодарен за поддержку, которую ему оказывали член-корреспондент АН СССР Э.Э. Фотиади и д. г.-м. н. В.К. Кучай.

В процессе работы над данной темой автор пользовался консультациями и советами академика В.Н. Страхова, академика В.П. Мясникова, академика С.В. Гольдина, д. ф.-м. н., профессора Б.П. Сибирякова, д. г.-м. н., профессора С.А. Тычкова, к.ф.-м.н. А.М. Айзенберга, А.Н. Василевского и к.г.-м.н. Ю.Ф. Филиппова. Всем им автор глубоко признателен.

Автор пользуется случаем поблагодарить В.И. Самойлову за помощь в работе над текстом рукописи.

Особую благодарность автор хочет выразить своему другу – к.г.-м.н. В.В. Лапковскому за неоценимую помощь в этой работе.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ МОДЕЛИРОВАНИЯ СОЛЯНОГО ТЕКТОГЕНЕЗА ПОЛЗУЩИМ ТЕЧЕНИЕМ ОДНОРОДНО-ВЯЗКОЙ НЬЮТОНОВСКОЙ ЖИДКОСТИ СО СВОБОДНОЙ ГРАНИЦЕЙ

Начиная с работ (*Arrhenius S.*, 1912 и *Nettleton L.L.*, 1934), структуры соляной тектоники рассматривается как результат архимедового всплывания соляных масс, обусловленного низкой плотностью солей, по сравнению с перекрывающими отложениями. Дальнейшие исследования соляных куполов и их моделей подтвердили, что именно этот процесс в данном случае является определяющим (*Jackson M.P.A.*, *Talbot C.J.*, 1986 и др.).

Математическое моделирование соляного тектогенеза сводится к расчету происходящего под действием силы тяжести ползущего течения неоднородного по плотности материала, ограниченного свободной поверхностью. Эволюция ползущих течений, в каждый момент времени целиком определяемых конфигурацией объемных сил и поверхностных нагрузок (в силу малости числа Рейнольдса), представляется последовательностью связанных между собой квазистационарных состояний. В рамках ньютоновской реологии, для полупространства, задача формулируется следующим образом.

В прямоугольных декартовых координатах X_1, X_2, X_3 рассматривается ограниченное свободной поверхностью $F(\mathbf{x}, t) = x_3 - h(x_1, x_2, t) = 0$ полупространство $x_3 \leq h(x_1, x_2, t)$; $\{\mathbf{x}\} = \{x_1, x_2, x_3\}$, t – время, \mathbf{n} – вектор единичной нормали к этой поверхности. Полупространство занято совокупностью несмешивающихся жидкостей W_k с постоянными свойствами. Жидкости разделены границами $S_{k(x,t)}$, конфигурация которых изменяется рассчитываемым течением. Движущей силой течения является нормальная сила тяжести \mathbf{g} , приложенная к возмущению плотности, обусловленному отклонением границ от горизонтального положения. Начальные условия определяются какой-либо заданной конфигурацией границ $S_{k(x,t_0)}$. Возмущение свободной поверхности h неизвестно и должно определяться для каждого момента времени, вместе с обуславливающим его течением $\mathbf{v}(\mathbf{x}, t)$.

Плотность, напряжения и давление представляются в виде: $\rho(\mathbf{x}, t) = \rho_{(x_3,t)}^0 + \sigma(\mathbf{x}, t)$, $\mathbf{T}(\mathbf{x}, t) = \mathbf{T}_{(x_3,t)}^0 + \boldsymbol{\tau}(\mathbf{x}, t)$, $P(\mathbf{x}, t) = P_{(x_3,t)}^0 + p(\mathbf{x}, t)$, где $\rho_{(x_3,t)}^0$, $\mathbf{T}_{(x_3,t)}^0$, $P_{(x_3,t)}^0$ – характеристики гидростатического состояния ($T_{ij}^0 = -\delta_{ij}P^0 = -\delta_{ij}\rho^0 g x_3$, δ_{ij} – дельта Кронекера), а $\sigma(\mathbf{x}, t)$, $\boldsymbol{\tau}(\mathbf{x}, t)$, $p(\mathbf{x}, t)$ – 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 $\sigma(\mathbf{x}, t_n)$ отыскивается поле течения $\mathbf{v}(\mathbf{x}, t_n)$, $p(\mathbf{x}, t_n)$ и форма свободной границы $F(\mathbf{x}, t_n)$

$$(1) \sigma(\mathbf{x}, t_n) = \rho(\mathbf{x}, t_n) - \rho_{(x_3,t_n)}^0, \quad \rho(\mathbf{x}, t_n) = \rho_k \text{ для } \mathbf{x} \in W_k;$$

$$(2) \mu \nabla^2 \mathbf{v} - \nabla p = -\sigma \mathbf{g};$$

$$(3) \nabla \cdot \mathbf{v} = 0;$$

$$(4) (\mathbf{T} \cdot \mathbf{n})_F = 0,$$

$$(5) \frac{\partial F}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla F = 0;$$

(6) $[\mathbf{v}]_{S_k} = 0$, $[P]_{S_k} = 0$, квадратные скобки означают скачок величины на границе.

Эволюционные уравнения:

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

$$(7) \frac{\partial S_k}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla S_k = 0, \text{ с некоторыми начальными условиями } - S_{k(x,t_0)}, \mathbf{v}(\mathbf{x}, t_0) = 0.$$

Эволюция течения отыскивается итерационным способом: при заданном из (7) $S_{k(x)}$ решается система (1-6), после чего, при полученном $v_{(x)}$, по малому промежутку времени δt интегрируются (7). Уравнения (7) численно интегрируются легко. Основные вычислительные трудности связаны с решением задачи (1-6).

Обычно предполагается, что несмешивающиеся жидкости могут иметь как различные плотности ρ_k , так и различные вязкости μ_k , которые и фигурирует в (2), так что задача решается для каждой области W_k с граничными условиями (4-6). В работе полагается, что вязкость всех жидкостей одинакова $\mu_k = \mu = const$ для всего полупространства. В таком случае, потребовав, вместо (6), непрерывности решения всюду в полупространстве, можно рассмотреть задачу для всего полупространства с кусочно-постоянной плотностью (1). И, как показано в Главе 2, для линеаризованных обычным способом условий на F , решение квазистационарной задачи можно получить аналитически в виде функции Грина.

Данное упрощение представляется оправданным. Согласно «Теории простых жидкостей с затухающей памятью» (*Астарита Дж., Марруччи Дж., 1978*), ньютоновское реологическое уравнение пригодно в случае достаточно медленного деформирования среды – для горных пород скорость деформации должна быть меньше 10^{-14} с^{-1} (*Лунёв Б.В., 1996*). При этом, фигурирующая в нем «естественная» вязкость должна пониматься, как верхняя асимптота вискозиметрических вязкостей материала. Исследования реальных соляных диапиров показывают, что характерные скорости деформации достаточно малы ($10^{-17} - 10^{-14} \text{ с}^{-1}$) и, несмотря на большую вариацию оценок эффективной вязкости соли и других осадочных пород, их верхняя асимптотика близка – ($10^{19} - 10^{20}$) Па · с (обзорная статья *Jackson M.P.A., Talbot C.J., 1986* и др.). О малой вариации вязкости убедительно свидетельствует и грибообразная форма зрелых соляных диапиров. Эти данные оправдывают как использование модели ньютоновской жидкости, так и принятое в работе допущение о постоянной ньютоновской вязкости. Имея в виду формализм указанной теории, полученное в этих рамках решение можно рассматривать, как заведомо верное первое приближение, независимо от реологического поведения среды в более быстрых процессах.

Глава 2. РЕШЕНИЕ СТАЦИОНАРНОЙ КРАЕВОЙ ЗАДАЧИ ДЛЯ ПОЛУПРОСТРАНСТВА СО СВОБОДНОЙ ГРАНИЦЕЙ

Рассмотрим задачу (1-5) отыскания течения по заданному в момент времени t_n возмущению плотности $\sigma_{(x,t_n)}$ (вместо условия (6) будем требовать непрерывности решения \mathbf{v} , p всюду в полупространстве).

Малость амплитуды возмущения свободной границы h и ее производных $\frac{\partial h}{\partial x_1}$, $\frac{\partial h}{\partial x_2}$ позволяет делать «снос» условий, сформулированных для возмущенной границы F , на невозмущенную поверхность полупространства $x_3 = 0$, получая так называемые «условия скользкой границы» (“free slip conditions”). Обычно это делается на основе очевидных оценок, но в диссертации возможность такой линеаризации с точностью до малых второго порядка показана формально.

Линеаризованная задача формулируется только относительно возмущений и имеет полностью стационарную форму:

$$(8) \mu \nabla^2 \mathbf{v} - \nabla p = -\sigma \mathbf{g},$$

$$(9) \nabla \cdot \mathbf{v} = 0,$$

$$(10) (v_3 = \tau_{31} = \tau_{32} = 0)_{x_3=0},$$

с дополнительным условием для определения возмущения границы полупространства –

$$(11) (\tau_{33} = -\rho^0 |g| h)_{x_3=0} \leftrightarrow \rho^0 g h_{(x_1, x_2)} = (\tau_{33})_{x_3=0}.$$

Решение краевой задачи (8-10) получено (Лунёв Б.В., 1986) для «стокслета» – сосредоточенной единичной силы в правой части (8): $\mathbf{f}^\circ = \delta_{i3} \delta_{(x-\xi)}$ (δ_{i3} – дельта Кронекера, $\delta_{(x-\xi)}$ – дельта функция Дирака). Решение отыскивается как сумма $\mathbf{v} = \mathbf{v}^0 + \mathbf{v}^*$, где \mathbf{v}^0 есть частное решение для «стокслета» в неограниченном пространстве, полученное Ландау (Ландау Л.Д., 1944, Бэтчелор Дж., 1973), а \mathbf{v}^* дополняет его так, чтобы удовлетворить граничным условиям (10). Показывается, что влияние границы (поле \mathbf{v}^*) эквивалентно действию в пространстве другой сосредоточенной силы («изображения»), противоположно направленной и симметричной первой относительно плоскости $x_3 = 0$. Решение задачи для сосредоточенной силы записывается:

$$(12) v_3(x, \xi) = \frac{1}{8\pi\mu} |\mathbf{f}^\circ| \left[\left(\frac{1}{R(x, \xi)} - \frac{1}{R^*(x, \xi)} \right) + \frac{(x_3 - \xi_3)^2}{R^3(x, \xi)} - \frac{(x_3 + \xi_3)^2}{R^{*3}(x, \xi)} \right],$$

$$(13) v_i(x, \xi) \quad i \neq 3 = \frac{1}{8\pi\mu} |\mathbf{f}^\circ| \left[\frac{(x_i - \xi_i)(x_3 - \xi_3)}{R^3(x, \xi)} - \frac{(x_i - \xi_i)(x_3 + \xi_3)}{R^{*3}(x, \xi)} \right],$$

$$(14) p(x, \xi) = \frac{1}{4\pi} |\mathbf{f}^\circ| \left[\frac{(x_3 - \xi_3)}{R^3(x, \xi)} - \frac{(x_3 + \xi_3)}{R^{*3}(x, \xi)} \right],$$

$$(15) \tau_{33}(x, \xi) = -\frac{3}{4\pi} |\mathbf{f}^\circ| \left[\frac{(x_3 - \xi_3)^3}{R_{(x, \xi)}^5} - \frac{(x_3 + \xi_3)^3}{R_{(x, \xi)}^{*5}} \right],$$

$$(16) \tau_{i3}(x, \xi)_{i \neq 3} = -\frac{3}{4\pi} |\mathbf{f}^\circ| (x_i - \xi_i) \left[\frac{(x_3 - \xi_3)^2}{R_{(x, \xi)}^5} - \frac{(x_3 + \xi_3)^2}{R_{(x, \xi)}^{*5}} \right],$$

$$(17) \tau_{ij}(x, \xi)_{i, j \neq 3} = -\frac{3}{4\pi} |\mathbf{f}^\circ| (x_i - \xi_i)(x_j - \xi_j) \left[\frac{(x_3 - \xi_3)}{R_{(x, \xi)}^5} - \frac{(x_3 + \xi_3)}{R_{(x, \xi)}^{*5}} \right].$$

Здесь $R_{(x, \xi)} = \sqrt{(x_1 - \xi_1)^2 + (x_2 - \xi_2)^2 + (x_3 - \xi_3)^2}$ и $R_{(x, \xi)}^* = \sqrt{(x_1 - \xi_1)^2 + (x_2 - \xi_2)^2 + (x_3 + \xi_3)^2}$ – расстояния до точки $\{\mathbf{x}\} = \{x_1, x_2, x_3\}$ от точек $\{\xi\} = \{\xi_1, \xi_2, \xi_3\}$ и $\{\xi^*\} = \{\xi_1, \xi_2, -\xi_3\}$, в которых заданы единичная сосредоточенная сила $|\mathbf{f}^\circ| = 1$ и ее «изображение».

Формулы (12-17) определяют функцию Грина задачи (8-10), так что для произвольного распределения плотности ее решение может быть получено как свертки ядер (12-17) с возмущением плотности $\sigma_{(\xi)}$ по области, в которой оно задано (при условии, что $\sigma_{(\xi)}$ ограничена и интегрируема в этой области):

$$(18) v_{i(x)} = g \iiint \sigma_{(\xi)} v_{i(x, \xi)} d\xi_1 d\xi_2 d\xi_3,$$

$$(19) p_{(x)} = g \iiint \sigma_{(\xi)} p_{(x, \xi)} d\xi_1 d\xi_2 d\xi_3,$$

$$(20) \tau_{ij(x)} = g \iiint \sigma_{(\xi)} \tau_{ij(x, \xi)} d\xi_1 d\xi_2 d\xi_3.$$

Выполнение условия непрерывности решения (18-20) (при указанных требованиях к $\sigma_{(\xi)}$) обеспечивается свойствами ядер (12-17).

Возмущение поверхности полупространства определится из (11, 15, 20):

$$(21) \rho^0 h_{(x_1, x_2)} = \frac{3}{2\pi} \iiint \sigma_{(\xi)} \frac{\xi_3^3}{R_{0(x, \xi)}^5} d\xi_1 d\xi_2 d\xi_3, \quad \text{где}$$

$$R_{0(x, \xi)} = \sqrt{(x_1 - \xi_1)^2 + (x_2 - \xi_2)^2 + \xi_3^2}.$$

Фактически, нагрузка $\rho^0 g h_{(x_1, x_2)}$, порождаемая в плоскости $x_3 = 0$ «топографическими массами», образует слой Грина.

Имея решение (12-21) стационарной задачи для распределения плотности в данный момент времени, эволюция ползущего течения рассчитывается итерациями при помощи уравнений (7). Они легко интегрируются численно.

Использование полученного решения дает важные преимущества при построении алгоритмов моделирования соляного тектогенеза.

1. Объем вычислений пропорционален произведению первой степени числа точек расчета течения $\{\mathbf{x}\}$, на число точек задания аномальной плотности $\{\xi\}$.

2. Для расчета эволюции структуры достаточно задавать точки $\{x\}$ только на границах тел (слоев), а точки $\{\xi\}$ только там, где возмущение плотности σ отлично от нуля.

3. На многопроцессорных компьютерах можно эффективно распараллеливать задачу, практически без обменов между процессорами.

4. Характеристики течения могут рассчитываться по регулярной сетке с нужной детальностью, по мере надобности, для любого момента времени и любой части исследуемой области.

Благодаря этому, можно существенно увеличить производительность компьютерных программ, моделирующих развитие плотностной неустойчивости в жидкости. Для больших задач – на многие порядки.

Для обычных персональных компьютеров сделана программа расчета 2-мерных течений, результаты работы которой представлены в главе 3. Для этого интегрированием выражений (12-17) были получены выражения для горизонтальных отрезков плоскостей, бесконечных вдоль одной из горизонтальных осей.

Глава 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ СОЛЯНОГО ТЕКТОГЕНЕЗА ПОСРЕДСТВОМ ПРОГРАММЫ, РЕАЛИЗУЮЩЕЙ ПОЛУЧЕННОЕ РЕШЕНИЕ

1. В целях верификации метода, проведен расчет, аналогичный сделанному в работе (*Woidt W.-D., Neugebauer H.J.*, 1980). Также представлены расчеты, воспроизводящие, с учетом коэффициентов подобия, результаты физического моделирования из (*Рамберг Х.*, 1985г.). Хорошее согласие расчетов с указанными результатами численных и физических экспериментов и с данными о развитии реальных соляных диапиров (*Jackson M.P.A., Talbot C.J.*, 1986) свидетельствует о верности работы программы моделирования и об адекватности используемого подхода, в целом.

2. Возможности программы продемонстрированы расчетом эволюции сложной модели всплывания пачки, представленной переслаиванием «легких солей» с «тяжелыми ангидритами». Отмечается быстрое подавление развития неустойчивости внутри пачки в фазе активного развития неустойчивости пачки, как целого, с последующим ее усилением после выхода крупных диапиров в верхний, низкоплотный слой. Формируется сложная структура внутри «шляпок», близкая к изученной в реальных зрелых соляных куполах Северной

Германии и юга США (Talbot C.J., Jackson M.P.A., 1987г.). Конечная фаза рассчитанной эволюции представлена на рис. 1.

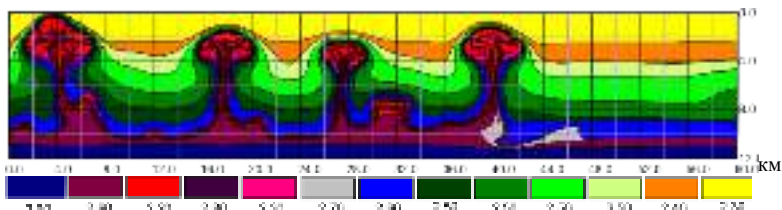


Рис. 1. Всплытие многослойной пачки. Шкала плотности в г/см³

3. С точки зрения возможного влияния на миграцию и скопление углеводородов, рассмотрено напряженно-деформированное состояние разреза, имитирующего характерную геологическую ситуацию. Показано, что определенные зоны на протяжении всей эволюции характеризуются аномально низким давлением и высокой скоростью вертикального растяжения. Эти динамические эффекты могут влиять на движение пластового флюида и, наряду с обычными структурно-литологическими факторами, контролировать размещение залежей углеводородов. Величины избыточных нормальных напряжений и давления в расчетах достигают 1 – 3 МПа, а касательных – 0,5 МПа; их максимальные значения характерны для определенных стадий эволюции структуры и бывают локализованы в довольно узких зонах.

На примере того же разреза продемонстрирована принципиальная возможность подбора модели формирования соляной структуры. Критерием успешности подбора служила близость возмущений гравитационного поля и свободной поверхности у рассчитываемых моделей к таковым у эталонной, и близость к эталонным отметок глубины залегания кровли соляного пласта на вершинах куполов и в межкупольных мульдах (где они уверенно устанавливаются на реальных разрезах обычной сейсморазведкой). Таким образом, данный вид геодинамического моделирования может использоваться как «естественный» регуляризатор при решении обратной задачи гравиразведки для сложных структур соляной тектоники.

4. Подобранные варианты эволюции, воспроизводящие специфические структуры соляной тектоники (рис. 2.), наблюдающиеся на сейсмопрофилях Предьенсейского осадочного бассейна. Показано, что особенности развития соляного тектогенеза здесь обусловлены малыми вариациями средней плотности эвапоритовой толщи, в целом близкой к

плотности перекрывающих пород, и выделением в ее составе двух неустойчивых пачек. Рассчитаны характеристики напряженно-деформированного состояния и показана возможность их использования при оценке перспектив нефтегазоносности структур.

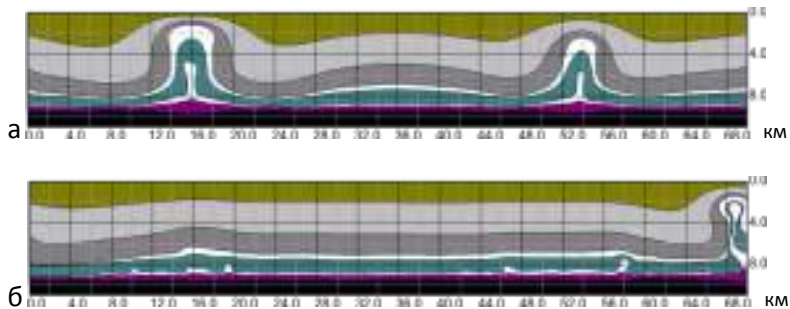


Рис. 2. Рассчитанные модели соляных валов Предбайкальского бассейна по двум профилям, по состоянию на конец палеозоя. Белым цветом показаны неустойчивые пачки, аналогичные ниже и верхнеусольской подсвитам Сибирской платформы. Различный характер эволюции моделей в значительной мере обусловлен тем, что в случае «б» неустойчивость нижней пачки усилена чуть более высокой плотностью вышележащей «среднеусольской подсвиты». Значения дефицита плотности пачек в пределах $0.03 - 0.08 \text{ г/см}^3$.

5. Серия численных экспериментов по исследованию влияния архимедового всплывания соли на подстилающие ее слои обнаружила развитие в подсолевом комплексе интенсивной инверсионной складчатости – обратной по отношению к структуре соляного слоя и надсолевой толщи: диапирам надсолевого комплекса соответствуют синклинали, а междиапировым прогибам – антиклинали (рис. 3). Ядра синклиналей под диапирами образуются за счет раздува мощности самого верхнего подсолевого слоя, верхняя часть которого втягивается в диапир. Этим раздувам на протяжении всей эволюции соответствуют зоны пониженного давления и усиленного вертикального растяжения, что может способствовать скоплению в них углеводородов.

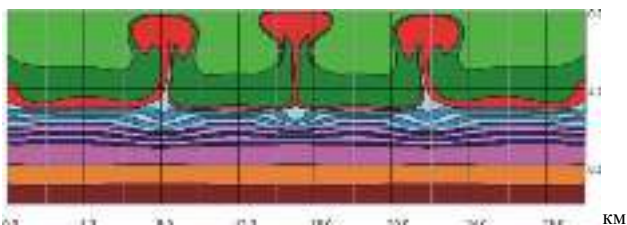


Рис. 3. Инверсионная складчатость в подсолевом комплексе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные в работе новые результаты выгодно отличают ее от ранее известных и открывают новые возможности для использования численного моделирования в изучении солянокупольных структур, в том числе – в целях практической геологии.

1. Автором получено аналитическое выражение для функции Грина 3-мерной квазистационарной краевой задачи о действии архимедовых сил в полупространстве однородно-вязкой ньютоновской жидкости со свободной поверхностью, при малом числе Рейнольдса. Эта задача является ядром расчета развития плотностной неустойчивости в жидкости, ее численное решение представляет главную трудность таких расчетов. Использование полученных формул позволяет эту трудность обойти и кардинально повысить производительность программ моделирования. Для больших задач – на многие порядки.

2. На базе полученного решения разработан алгоритм моделирования соляного тектогенеза и его численная реализация в 2-мерном варианте для обычных персональных компьютеров (последняя – в соавторстве с В.В. Лапковским, вклад автора заключается в разработке вычислительной части алгоритма). Хорошее согласие расчетов с результатами численных и физических экспериментов других авторов и с данными о развитии реальных соляных диапиров свидетельствует о верности работы программы и об адекватности подхода, в целом. Использование полученного решения позволило на обычном офисном ноутбуке просчитать эволюции ряда сложных моделей, с большим числом слоев и тел с разной плотностью. В частности, рассчитано всплывание пачки, образованной чередованием «легких» и «тяжелых» слоев, обнаружившее зависимость развития неустойчивости внутри пачки от развития ее неустойчивости, как целого.

3. Показано, что определенные зоны солянокупольных структур на протяжении всей эволюции характеризуются аномально низким давлением и высокой скоростью вертикального растяжения. Эти динамические эффекты могут влиять на движение пластового флюида и, наряду с обычными структурно-литологическими факторами, контролировать размещение залежей углеводородов. Величины избыточных нормальных напряжений и давления в расчетах достигают 1 – 3 МПа, а касательных – 0,5 МПа; их максимальные значения характерны для определенных стадий эволюции структуры и бывают локализованы в довольно узких зонах. Определение таких зон для

конкретных геологических структур может быть полезно при планировании геологоразведочных работ.

4. На примере модельного разреза продемонстрирована возможность подбора такой модели формирования соляной структуры, которая удовлетворяет данным возмущениям гравитационного поля и свободной поверхности и положению кровли соли в нескольких точках. Таким образом, данный вид геодинамического моделирования может использоваться как «естественный» регуляризатор при решении обратной задачи гравиразведки. Необходимая оперативность расчета большого числа вариантов эволюции обеспечивается предложенным в работе решением.

5. Подобранные варианты эволюции, воспроизводящие структуры соляной тектоники Предъенисейского осадочного бассейна и позволяющие объяснить особенности соляного тектогенеза региона. Рассчитанные характеристики напряженно-деформированного состояния могут быть использованы при оценке перспектив нефтегазоносности структур.

6. Численные эксперименты по исследованию влияния архимедового всплывания соли на подстилающие ее слои обнаружили развитие в подсолевом комплексе инверсионной складчатости – обратной по отношению к структуре соляного слоя и надсолевой толщи. Развитие инверсионной складчатости ограничивается интервалом глубин порядка 2 км непосредственно под подошвой всплывающего слоя. Наиболее интенсивно она выражена в первом километре под солью (где углы падения слоев могут становиться отвесными и отрицательными).

Непосредственной перспективой использования полученного решения является создание высокоэффективных программ 3-мерного моделирования соляного тектогенеза для многопроцессорных компьютеров. С точки зрения практической геологии, представляется перспективным использование возможностей метода (в комплексе с другими геолого-геофизическими методами) для подбора структуры и истории формирования конкретных объектов соляной тектоники.

Помимо моделирования соляной тектоники, полученное решение может быть использовано для расчета возбуждаемых архимедовыми силами ползущих течений во всех случаях, когда среду можно рассматривать, как однородно-вязкую несжимаемую ньютоновскую жидкость.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

1. **Лунёв Б.В.** *Изостазия как динамическое равновесие вязкой жидкости.* // Доклады АН СССР. – 1986. – т.290. – № 1. – С.72-76.
2. **Лунёв Б.В.** *Напряжения в океанической литосфере, обусловленные плотностными неоднородностями.* // Глубинная морская геофизика. – 1991. – Л. – Недра. – С.29-36.
3. **Лунёв 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.
4. Филиппов Ю.Ф., Лапковский В.В., **Лунёв Б.В.** *Соляной тектогенез и формирование деформационных структур Предъенисейского осадочного бассейна (юго-восток Западной Сибири).* // Сборник тезисов докладов IX международной научно-практической конференции и выставки «Геомодель 2007». – Геленджик, 2007. – С.128.
5. Филиппов Ю.Ф., Лапковский В.В., **Лунёв Б.В.** *Численное моделирование соляного тектогенеза в верхнерифейско-палеозойском Предъенисейском осадочном бассейне.* // Материалы всероссийской научной конференции с участием иностранных ученых «Фундамент, структуры обрамления Западно-Сибирского мезозойско-кайнозойского осадочного бассейна, их геодинамическая эволюция и проблемы нефтегазоносности», Тюмень - Новосибирск, 2008. – С.215-220.
6. Филиппов Ю.Ф., Лапковский В.В., **Лунёв Б.В.** *Численное моделирование соляного тектогенеза в кембрийских отложениях Предъенисейского осадочного бассейна (Западная Сибирь).* // Геология и геофизика. – 2009. – т.50. – № 2. – С.127 - 136.
7. **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.

Технический редактор О.М.Вараксина

Подписано в печать 16.07.2009

Формат 60x84/16. Бумага офсет №1. Гарнитура Таймс

Печ. л. 0,9. Тираж 110. Зак. № 24

ИНГГ СО РАН, ОИТ, 630090, Новосибирск, проспект Ак. Коптюга, 3