

## ЧИСЛЕННЫЕ МОДЕЛИ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУР СОЛЯНОЙ ТЕКТОНИКИ, ВЫЯВЛЕННЫХ СЕЙСМОРАЗВЕДКОЙ В КЕМБРИЙСКИХ ОТЛОЖЕНИЯХ ПРЕДЪЕНИСЕЙСКОГО ОСАДОЧНОГО БАСЕЙНА (ЮГО-ВОСТОК ЗАПАДНОЙ СИБИРИ)

В. А. Конторович, Б. В. Лунев, В. В. Лапковский, Ю. Ф. Филиппов

Численными экспериментами в рамках представления деформаций среды ползущим течением высоковязкой ньютоновской жидкости подобраны варианты эволюции, воспроизводящие структуры соляной тектоники. Эти структуры обнаружены сейсмическими исследованиями в кембрийских отложениях Предъенисейского осадочного бассейна. Определены причины, обусловившие специфику проявления соляного тектогенеза в изучаемом бассейне.

**Ключевые слова:** численное моделирование, соляной диапир, Предъенисейский бассейн, кембрийские отложения.

## NUMERICAL MODELS OF SALT TECTONICS STRUCTURES DETECTED BY SEISMIC EXPLORATION IN THE CAMBRIAN DEPOSITS OF THE PREDYENISEI SEDIMENTARY BASIN, SOUTH-EASTERN WEST SIBERIA

V. A. Kontorovich, B. V. Lunev, V. V. Lapkovsky, Yu. F. Filippov

Numerical experiments in the context of medium deformation presentations with creeping flow of high-viscosity Newtonian fluid are used to select evolution variants simulating salt tectonics structures. Those structures were revealed by seismic investigations in the Cambrian deposits of the Predyenisei sedimentary basin. Reasons for the specific character of salt tectogenesis manifestation in the basin under study are found out.

**Keywords:** numerical modeling, salt diapir, Predyenisei basin, Cambrian deposits.

Проведенные в конце XX – начале XXI вв. региональные сейсморазведочные работы и параметрическое бурение позволили обосновать на юго-востоке Западной Сибири наличие мощного комплекса рифей-палеозойских нормально-осадочных субплатформенных отложений. Зона их распространения названа Предъенисейским осадочным бассейном (рис. 1) [1, 2, 4, 7, 9, 10, 11 и др.].

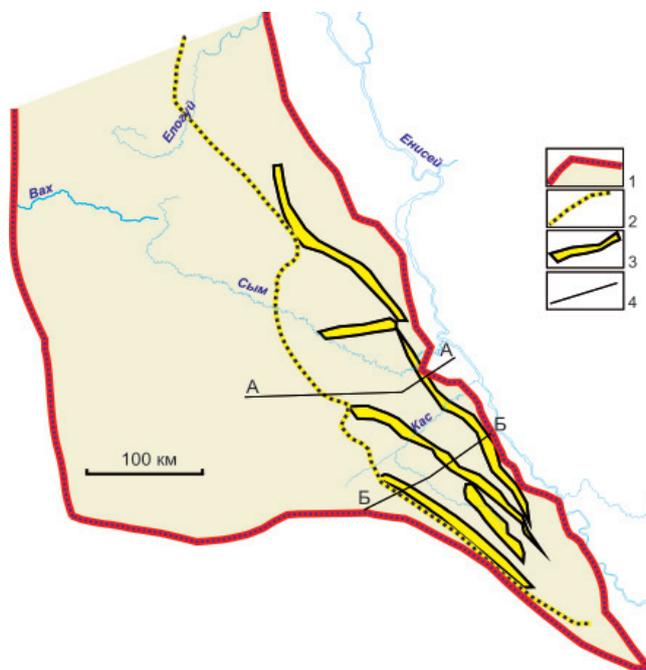
Анализ геолого-геофизических материалов позволил сделать вывод о том, что в восточной части бассейна строение рифей-кембрийской толщи пород аналогично таковому на юго-западе Сибирской платформы, в Присяно-Енисейской нефтегазоносной области (НГО). Здесь нижнекембрийский комплекс формировался в условиях солеродного бассейна и насыщен пластами солей (рис. 2). В пределах Троицко-Михайловского вала, расположенного к юго-востоку от Енисейского кряжа, в западной части Присяно-Енисейской НГО, развиты соляные купола, которые надежно выделяются на временных сейсмических разрезах и доказаны глубоким бурением (рис. 3).

В восточной части Предъенисейского бассейна развитие солеродной кембрийской толщи доказано бурением скважин Лемок 1 и Аверинской 150.

Анализ волновых полей на временных разрезах, расположенных в восточной части бассейна,

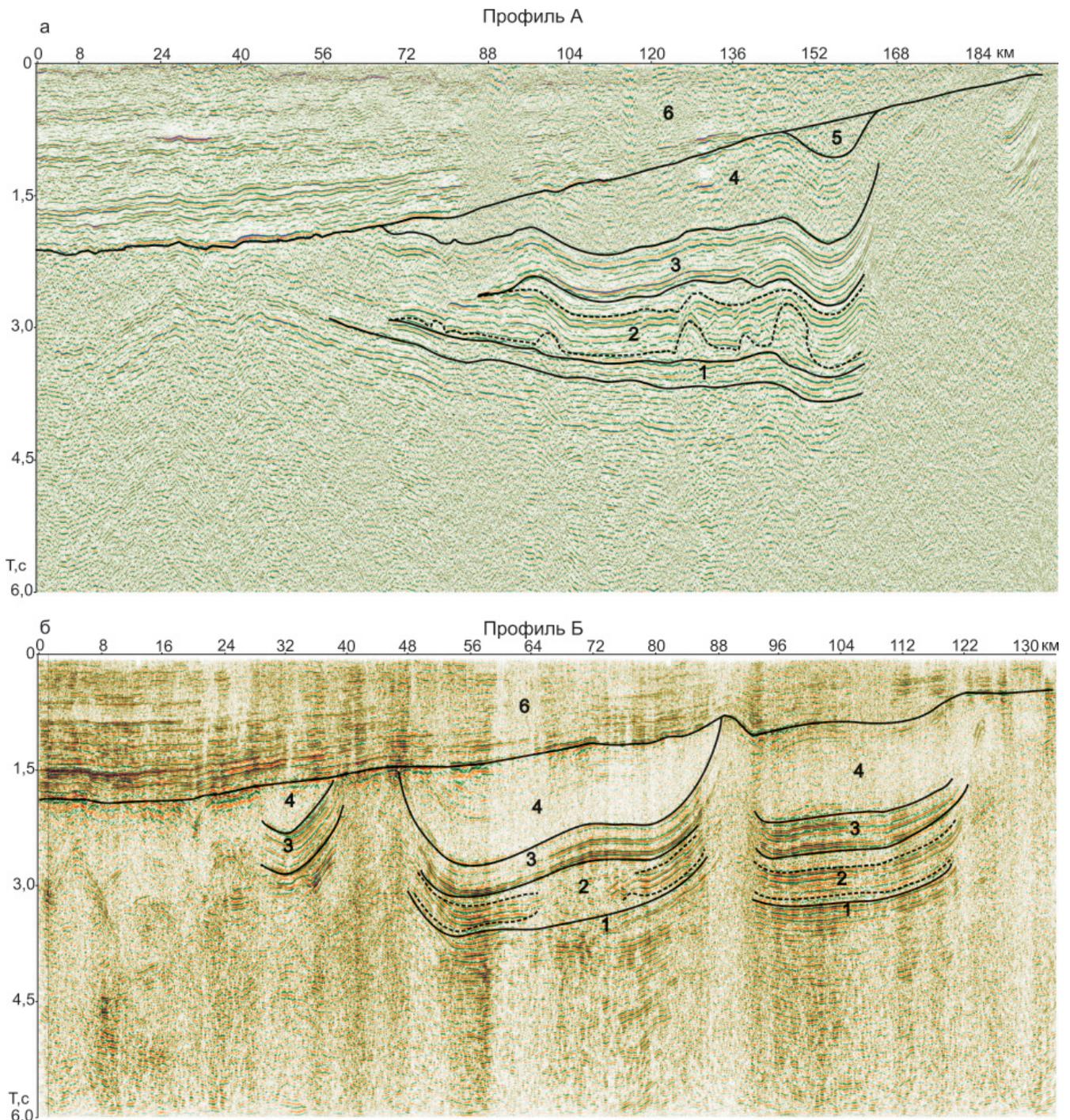
ИНГГ СО РАН (Новосибирск)

вблизи Енисейского кряжа, позволил выделить ряд контрастных высокоамплитудных структур,



**Рис. 1.** Схема распространения соляных структур в Предъенисейском осадочном бассейне

1 – границы распространения Предъенисейского осадочного бассейна; 2 – западная граница распространения соленосных кембрийских отложений; 3 – соляные валлообразные структуры; 4 – линии сейсмопрофилей МОГТ



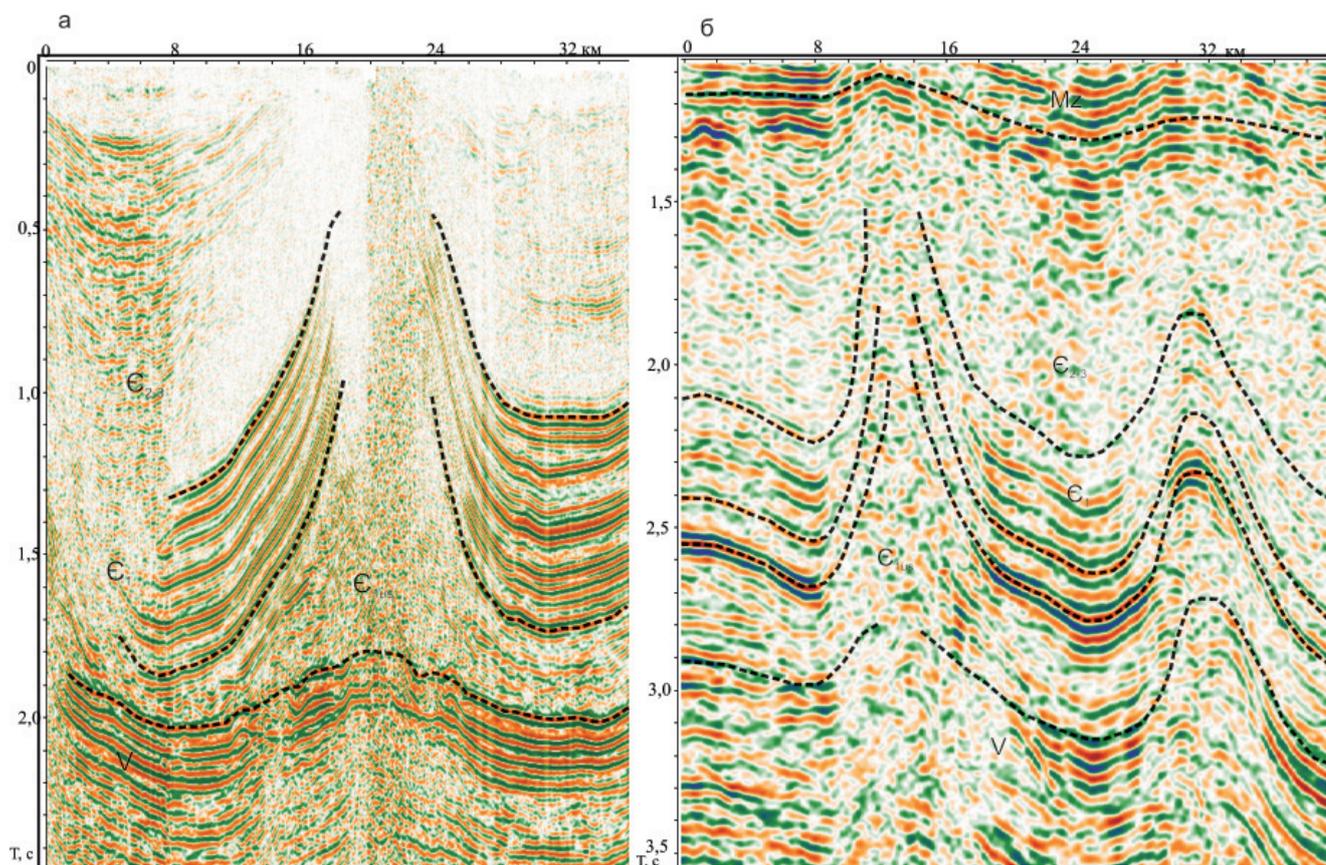
**Рис. 2.** Сейсмические (временные) разрезы

1 – подсолевые отложения, предположительно карбонаты вендского возраста; 2 – соленосные отложения нижнего кембрия; 3 – бессолевая часть нижнекембрийской эвапоритовой толщи; 4 – карбонатно-терригенные отложения среднего – верхнего кембрия; 5 – предположительно карбонатно-терригенные отложения ордовик-силурийского возраста, 6 – терригенные отложения мезозойского чехла Западно-Сибирской плиты; пунктиром обозначены предполагаемые кровля нижней пачки и подошва верхней с повышенным содержанием каменной соли

которые, на наш взгляд, также связаны с соляным тектогенезом. В ряде случаев эти структуры характеризуются традиционным рисунком сейсмической записи. В ситуации, когда купола обладают чрезвычайно высокой контрастностью, на временных разрезах фиксируются отражающие горизонты, подчеркивающие только склоны структур, а над сводами наблюдается хаотический рисунок сейсмической записи (см. рис. 2, 3).

По ряду параметров соляные структуры Предъенисейского бассейна отличаются от объектов, наблюдаемых в «классических» областях соляной тектоники. Это вызывает у ряда исследователей сомнения в их генезисе, что побуждает предполагать иную природу складчатости.

Основные особенности структур Предъенисейского осадочного бассейна сводятся к следующему:



**Рис. 3.** Типичные соляные структуры на сейсмических разрезах: а – юго-запада Сибирской платформы (Приенисейская синеклиза, Троицко-Михайловский вал), б – юго-востока Западно-Сибирской геосинеклизы (Предъенисейский бассейн)

1. Солянокупольные структуры составлены отложениями древнего (раннекембрийского) возраста. Судя по скорости эволюции диапиров, характерной для областей классического проявления соляной тектоники [15], можно ожидать, что за 300 млн лет (от среднего кембрия до начала юры) практически вся соль должна была бы всплыть к поверхности. В бассейне же наблюдаются солянокупольные структуры, связанные с нижнекембрийской эвапоритовой формацией, как крупные высокоамплитудные диапиры, деформирующие весь нижнепалеозойский разрез (и даже мезозойские отложения), так и сравнительно небольшие, заключенные внутри нижнекембрийской толщи пород.

2. Развитие неустойчивости Рэлея – Тэйлора характеризуется определенной длиной волны, приблизительно равной удвоенной толщине разреза над подошвой неустойчивого слоя. В данном случае, исходя из наблюдаемой толщины осадочного разреза около 8–9 км, можно было бы ожидать развития типичной складчатости с диапирами, разделенными межкупольными мульдами и отстоящими друг от друга на 15–20 км. Здесь же наблюдаются локальные валы на расстоянии друг от друга 40 км и более.

3. Ширина наблюдаемых диапиров плавно уменьшается с высотой. Такая ситуация свойственна лишь «подушечной» стадии растущего возмущения, тогда как дальнейшее развитие диа-

пира сопровождается сильным сжатием его основания за счет расширения «компенсационных» синклиналей [8, 15]. В Предъенисейском бассейне и на Троицко-Михайловском валу, расположенном к востоку от Енисейского кряжа, фиксируется плавное уменьшение ширины диапиров вверх по разрезу, причем в ряде случаев их верхушки срезаны эрозионной поверхностью (см. рис. 2, б и 3).

4. Амплитуда валов, фиксируемых на временных разрезах в южной и северной частях Предъенисейского бассейна, неодинакова. В южной и центральной частях бассейна развиты высокоамплитудные структуры (см. рис. 2, б и 3, б), деформирующие весь палеозойский осадочный чехол, в северной – малоамплитудные, развитые внутри раннекембрийской эвапоритовой толщи, где наблюдаются локальные антиклинали, связанные с раздувами мощности ее нижнего горизонта (см. рис. 2, а).

Цель настоящей работы – оценить возможность формирования нижнекембрийских соляных структур Предъенисейского бассейна за счет действия архимедовых сил и, если это возможно, объяснить, чем может быть обусловлена наблюдаемая специфика проявления соляного тектогенеза.

Для ответа на поставленные вопросы была проведена серия численных экспериментов по моделированию ползущих течений, вызываемых плотностной неустойчивостью соленосной толщи



бассейна. Решалась задача подбора таких вариантов эволюции разреза, которые воспроизвели бы наблюдаемые структуры с их характерными чертами.

Обычно при моделировании соляного тектогенеза ограничиваются нахождением ряда общих характеристик (характерной длины волны, амплитуды, степени зрелости и т. п.) либо производят своеобразный обратный расчет эволюции имеющейся структуры [3, 13, 14, 16], полагая, что все существенные характеристики современного разреза хорошо известны. В данном случае в рамках весьма ограниченных данных о разрезе требовалось по возможности точно воспроизвести наблюдаемую геометрию структур, решая прямые задачи расчета эволюции из некоторых начальных состояний. Эта постановка задачи аналогична той, которая используется при решении подбором обратной задачи гравиразведки и точно так же требует расчета большого числа вариантов.

Для подбора разрезов по двум сейсмическим профилям было рассчитано около 200 сложных моделей эволюции. При этом в отличие от задач гравиразведки для каждого варианта требовалось рассчитывать не единственное состояние поля, а большую их последовательность (кроме того, имеются известные сложности в решении уравнений движения вязкой жидкости). Решение такой задачи стало возможным благодаря использованию разработанной авторами высокоэффективной программы расчета ползущего течения вязкой жидкости, реализующего развитие ее плотностной неустойчивости [6, 12]. Использованный вариант программы не предусматривал моделирование конседиментационного развития плотностной неустойчивости и влияния каких-либо внешних тектонических воздействий. Рассматривалось исключительно действие архимедовых сил, присутствующих в задаваемых вариантах палеозойского разреза, и выполнялась оценка этой составляющей в формировании наблюдаемой структуры.

#### **Характеристика разреза, ограничения и предпосылки для задания начальных условий моделирования**

Сейсмостратиграфический анализ профилей МОГТ, комплексное изучение керн и материалов ГИС позволяют представить обобщенный геологический разрез рифей-палеозойских отложений Предъенисейского бассейна [1, 7, 10, 11 и др.].

Возможная неустойчивость разреза связывается с нижнекембрийской эвапоритовой формацией, общая мощность которой достигает 4 км. Снизу эта толща подстилается терригенно-карбонатными породами венда и верхнего рифея, а сверху согласно перекрывается 3-километровой средне-верхнекембрийской терригенно-карбонатной толщей.

Анализ временных сейсмических разрезов также позволил сделать вывод о том, что на ис-

следуемой территории в локальных впадинах кембрийские образования могут быть согласно перекрыты ордовикскими, возможно ордовик-силурийскими. В рамках реализованной модели предполагалось, что до эрозии, произошедшей в герцинское время, мощность этой толщи пород составляла 2 км, т. е. приблизительно соответствовала современной мощности мезозойских отложений, с резким угловым несогласием перекрывающих палеозойский комплекс на всей исследуемой территории.

Наиболее существенной характеристикой разреза для решаемой задачи является распределение плотности. Плотности подстилающих эвапоритовую формацию пород рифейского и вендского возраста составляют 2730–2770 и 2600–2800 кг/м<sup>3</sup> соответственно; терригенно-карбонатных отложений, перекрывающих нижнекембрийскую эвапоритовую формацию, – 2500–2650 кг/м<sup>3</sup>. Близкую плотность имеют карбонатно-терригенные отложения ордовика – силура. Плотность терригенных пород мезозойского комплекса не превышает 2400 кг/м<sup>3</sup> и закономерно уменьшается вверх по разрезу.

По данным бурения верхняя часть эвапоритовой формации мощностью около 2 км в Предъенисейском бассейне практически является бессолевой, хотя и наблюдается засоление некоторых ее слоев. Соленосна нижняя часть разреза, представленная чередованием слоев каменной соли, ангидритов и доломитов, а в некоторых частях – известняков и мергелей с большей или меньшей примесью глинистого вещества. Плотности этих пород резко различаются: от 2700–2800 (ангидриты и доломиты) до 2200–2400 кг/м<sup>3</sup> (каменная соль). Переслаивание высоко- и низкоплотных пород довольно тонкое (в масштабах задачи): от метров до первых десятков метров. Их равномерное чередование приводит к оценке средней плотности эвапоритов 2500–2600 кг/м<sup>3</sup>. Именно такие значения (2540–2640 кг/м<sup>3</sup>) дают и имеющиеся определения средней плотности эвапоритовой формации в целом, основанные на комплексной интерпретации сейсмических и гравиметрических данных.

Таким образом, средняя плотность соленосной толщи практически совпадает со средней плотностью перекрывающих ее пород, и речь может идти только о неустойчивости каких-то ее подразделений.

В этом случае для ограничения класса возможных исходных распределений плотности, эволюцию которых следует исследовать с целью подбора наблюдаемых структур, нужно иметь сведения о строении соленосной толщи.

Материалов бурения в исследуемом регионе явно недостаточно: соленосные отложения нижнего кембрия в Предъенисейском бассейне вскрыты лишь двумя скважинами, которые к тому же пробурены в зонах интенсивных дислокаций.



Поскольку для солей в таких условиях характерны большие градиенты мощностей, эти данные не позволяют судить об исходном (недеформированном) строении соленосной толщи. Определенные предположения о ее строении и исходной плотностной структуре этого комплекса можно сделать на основе анализа имеющихся сейсмических разрезов и сопоставления с разрезами сингенетических отложений соседних районов Сибирской платформы, которые лучше изучены глубоким бурением (см. рис. 3).

В сопредельных районах Сибирской платформы соленасыщенность нижнекембрийской эвапоритовой формации колеблется по разрезу в соответствии с циклическим, трансгрессивно-регрессивным характером осадконакопления. Содержание каменной соли в различных пачках изменяется примерно на 10 %, в целом уменьшаясь вверх по разрезу и составляя в среднем 60 % [9]. Таким образом, средние плотности пачек с относительно высоким содержанием каменной соли отличаются от средних плотностей как эвапоритовой формации, так и вышележащих пород всего лишь на десятки  $\text{кг/м}^3$ .

В исследуемом регионе на временных разрезах (см. рис. 2) у кровли и подошвы соленосной части эвапоритовой формации выделяются зоны с нечеткой внутренней структурой. Мощность их сильно варьирует. Между ними наблюдается зона, представленная набором относительно выдержанных контрастных отражающих границ. Можно предположить, что сложная форма границ и нечеткая внутренняя структура «верхней» и «нижней» зон связаны с их повышенной соленасыщенностью и обусловленными этим деформациями, а выдержанная контрастная структура «средней» зоны соответствует равномерному чередованию слоев каменной соли и ангидритов – доломитов.

Основываясь на этих данных и сопоставлении с приведенными материалами по Сибирской платформе, для дальнейших расчетов принята модель эвапоритовой формации Предъенисейского бассейна из трех пачек – «нижней», «средней» и «верхней» – общей мощностью около 2 км. Эти обозначения будут использованы в дальнейшем. С учетом характера сейсмической записи и результатов глубокого бурения скважин Лемок 1 и Аверинской 150, предполагается, что верхняя и нижняя части разреза характеризуются повышенной соленасыщенностью. Степень изменения соленасыщенности по зонам и соответствующий контраст средней плотности зон приняты такими же, как в сопредельных районах Сибирской платформы.

Еще одной важной для рассматриваемой задачи особенностью строения Предъенисейского бассейна является конкордантность простираения соляных валов с границами и основными структурными элементами соседних складчатых сооружений Алтае-Саянской области и Енисейского кряжа. Как известно [3], размеры начальных

возмущений границ неустойчивых слоев сильно влияют на темпы развития плотностной неустойчивости. Особенно это важно в случае малых величин дефицита плотности. Можно предположить, что возмущения, инициирующие соляной тектогенез, были обусловлены воздействием на Предъенисейский бассейн со стороны указанных складчатых сооружений. Наиболее интенсивным это воздействие, по-видимому, могло быть в юго-восточной части бассейна (см. рис. 1), где он зажат между складчатыми областями. Вероятно, в этом районе (профиль «Б») имели место значительные подвижки взбросо-надвигового характера, которые могли приводить к сдвоению мощности соленасыщенных пачек. На северо-западе исследуемой территории, где бассейн расширяется и зона распространения соленосных отложений удаляется от Алтае-Саянской складчатой области (профиль «А»), влияние протекавших в ней тектонических процессов могло затухать, формируя в осадочном чехле бассейна лишь низкоамплитудные пологие складки.

Приведенные данные вместе со сделанными предположениями позволили ограничить класс исходных моделей, эволюция которых исследовалась. В их числе рассматривались и весьма сложные модели, состоящие из большого числа слоев разной плотности. Однако варианты, порождающие структуры, близкие к наблюдаемым, оказались хотя и своеобразными, но довольно простыми.

### Результаты моделирования

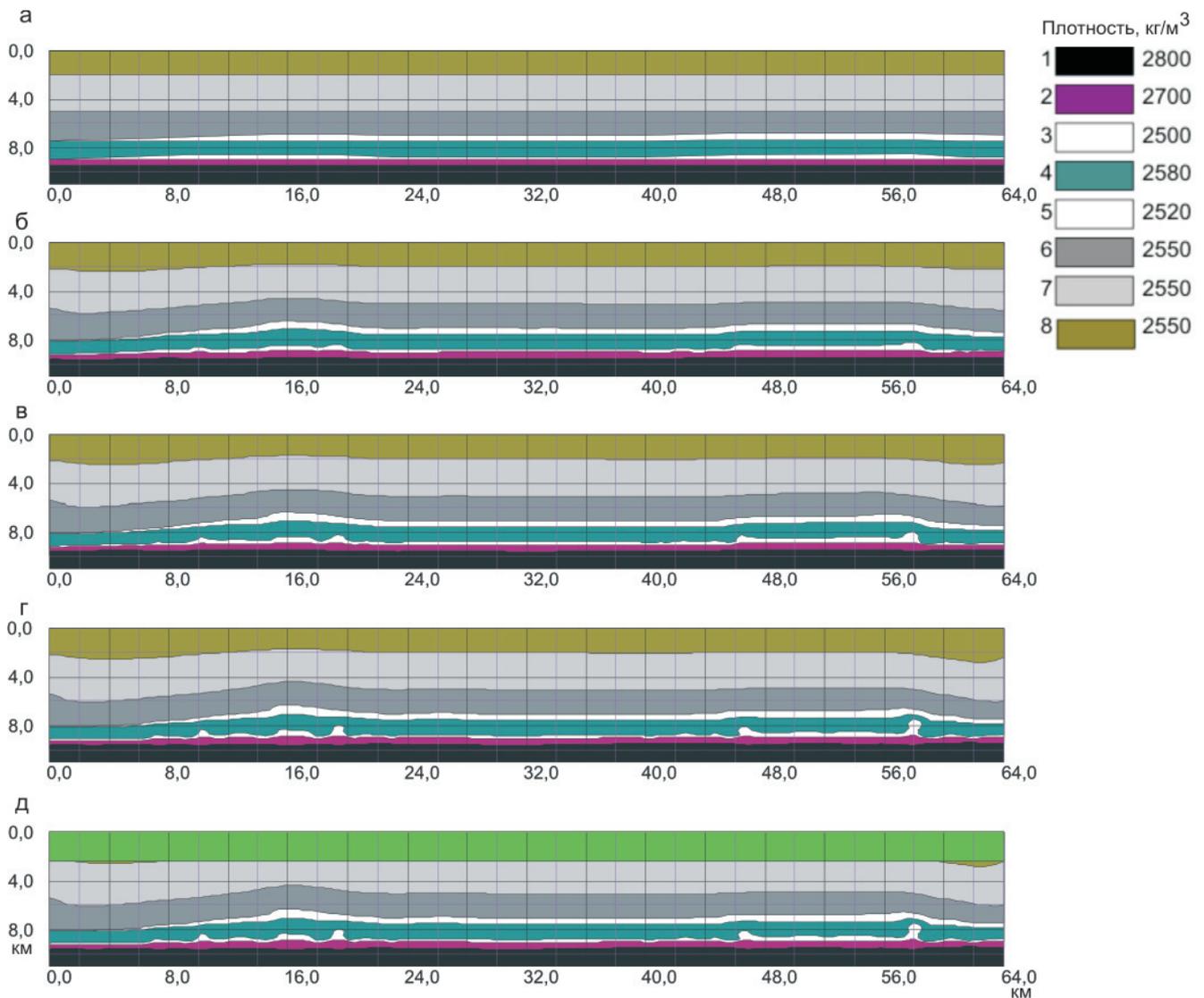
Приведем варианты моделирования, оптимально воспроизводящие изучаемые разрезы.

#### **Моделирование эволюции структуры разреза по профилю «А» (см. рис. 2, а)**

Исходная модель, которая наилучшим образом воспроизводит эволюцию малоамплитудных структур, развитых в северной части рассматриваемой территории (разрез «А»), характеризуется следующими чертами (рис. 4, а).

Соленосная толща задана трехслойной, имеющей у подошвы и кровли два неустойчивых слоя: нижний (мощность 200 м, плотность  $2500 \text{ кг/м}^3$ ) и верхний (500 м,  $2520 \text{ кг/м}^3$ ), разделенных более мощным средним (1300 м,  $2580 \text{ кг/м}^3$ ). В соответствии с наблюдаемой на разрезе ситуацией, низкоплотные слои плавно выклиниваются на западе. Плотность всех перекрывающих соленосную толщу слоев общей мощностью 7 км принята равной  $2550 \text{ кг/м}^3$ .

Подстилагается соленосная толща слоем мощностью 500 м и плотностью  $2700 \text{ кг/м}^3$  («венд») и затем толщей с плотностью  $2800 \text{ кг/м}^3$  («рифей»). На западе, в зоне выклинивания и ближе к восточному краю разреза заданы небольшие плавные начальные возмущения мощности.



**Рис. 4.** Эволюция разреза по профилю «А» (стадии эволюции: а – исходное состояние, б – 304 млн лет, в – 377 млн лет, г – 450 млн лет; д – то же, но со «срезанными эрозией» верхними 2,3 км разреза, замещенными «отложениями мезозоя» – зеленый слой)

1 – «рифей»; 2 – «венд»; пачки соленосной толщи: 3 – «нижняя», 4 – «средняя», 5 – «верхняя»; 6 – бессолевая часть эвапоритовой формации; 7 – терригенно-карбонатные отложения среднего – верхнего кембрия, 8 – предполагаемые терригенно-карбонатные отложения ордовика – силура

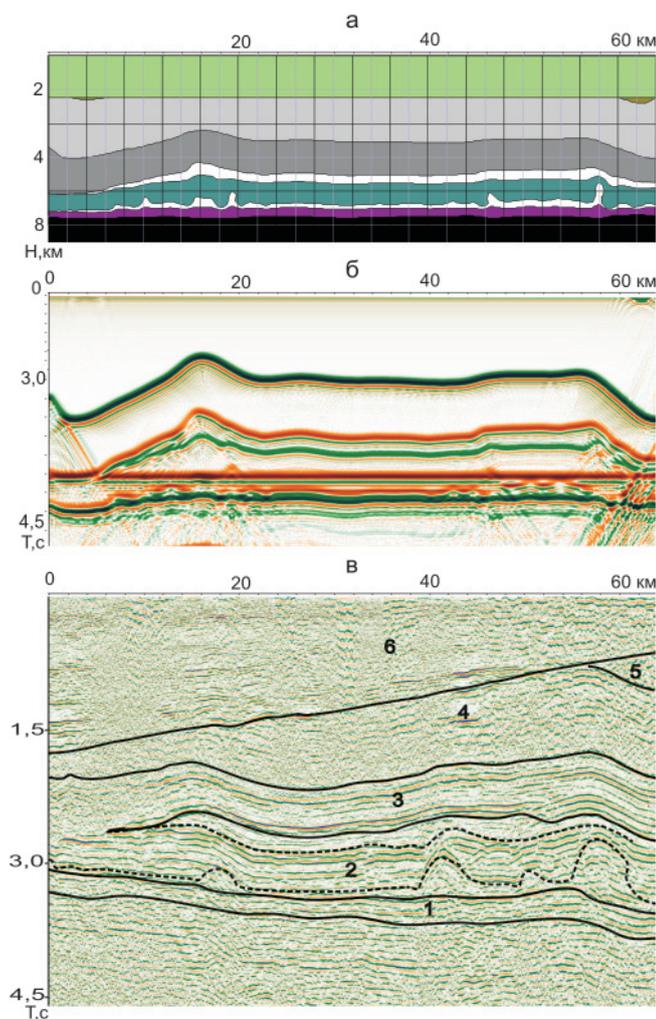
Большая величина инверсии плотности нижнего слоя приводит к тому, что в первую очередь развивается именно его неустойчивость. Однако область ее распространения ограничена верхним низкоплотным слоем: течение в основном замыкается между подошвой нижнего и кровлей верхнего неустойчивых слоев. Причина этого заключается в том, что восходящий поток относительно тяжелого вещества среднего слоя над каждым растущим возмущением нижнего слоя поднимает над собой подошву верхнего, формируя тем самым положительную аномальную массу, которая стремится растечься в стороны. В верхнем «легком» слое, таким образом, формируется противотечение, «растаскивающее» его над растущими возмущениями нижнего слоя. В результате этого процесса формируется характерная структура с диапирами, образованными в среднем слое веществом нижнего. Верхний слой, утоняясь над

диапирами нижнего слоя и раздуваясь над их компенсационными синклиналями, приобретает четковидную структуру (см. рис. 4, г).

Преимущественное развитие неустойчивости нижнего слоя тормозит развитие неустойчивости верхнего. Тем не менее последний хотя и замедленно, но также всплывает, формируя вспучивания, связанные с исходными возмущениями низкоплотных слоев (см. рис. 4).

Результирующее состояние модели (см. рис. 4, д), хорошо согласуется со структурами, наблюдаемыми на сейсмическом разрезе (см. рис. 2, а). Здесь также воспроизводится образование характерных общих «вздутий», сопровождаемое развитием внутриформационных диапиров и структур «растаскивания» верхнего инверсионного слоя.

На рис. 5 результаты моделирования сопоставляются с данными сейсморазведки. Для удо-



**Рис. 5.** Сопоставление результатов моделирования с сейсмическим разрезом по профилю «А»: а – результирующее состояние модели (стадия «д» на рис. 4); б – синтетический сейсмический временной разрез, рассчитанный для этого состояния; в – фрагмент реального временного разреза, представленного на рис. 2, а. Усл. обозн. см. на рис. 4, цифровые – на рис. 2

ства сравнения на рис. 5, б приведен синтетический сейсмический временной разрез, полученный в результате расчета полного волнового поля для результирующего состояния модели (см. рис. 4, д) средствами программного пакета W-seis [5].

Видно, что расчетная и наблюдаемая картины волновых полей принципиально близки.

### **Моделирование эволюции структуры разреза по профилю «Б» (см. рис. 2, б)**

Найти подходящий вариант исходного распределения плотности для воспроизведения структур профиля «Б» оказалось сложнее. Ясно, что инициация роста диапиров сквозь слои, перекрывающие соленосную толщу, обусловлена преимущественно в развитии возмущений верхнего неустойчивого слоя по сравнению с нижним. Труднее было найти условия, при которых два далеко отстоящих друг от друга диапира развивались бы локально, не возбуждая роста промежуточных

возмущений между собой в соответствии с характерной для данной ситуации длиной волны. Проблемой также стало выяснение условий, определяющих плавное уменьшение ширины диапиров с высотой, наблюдаемое на разрезах как Предъенисейской субпровинции, так и Троицко-Михайловского вала, расположенного к востоку от Енисейского кряжа (см. рис. 3).

Остановимся сначала на проблеме уменьшения ширины соляного купола вверх по разрезу. Как уже отмечалось, рост диапира после «подушечной» стадии сопровождается сжатием его основания за счет расширения окружающих «компенсационных» синклиналей, превращающихся в мульды. Это обусловлено тем, что опускающееся тяжелое вещество перекрывающего слоя растекается в стороны, выжимая более легкий всплывающий материал.

Это происходит в тех случаях, когда вещество, подстилающее всплывающий слой, имеет плотность больше или меньше, чем у перекрывающего слоя. Результаты моделирования показали, что единственным исключением из этого правила является ситуация, когда плотность вещества, подстилающего неустойчивый слой, равна плотности перекрывающего слоя, причем мощность неустойчивого слоя должна быть достаточно мала по сравнению с характерной длиной волны.

В такой ситуации субстрат, имея нулевую плавучесть относительно вещества, через которое поднимется растущий диапир, свободно в него втягивается, препятствуя сжатию его корневой части. Этот факт, обнаруженный проведенными расчетами, подтверждается физическими масштабными экспериментами, результаты которых опубликованы в работе Х. Рамберга [8]. Возможность такого распределения плотности не противоречит имеющимся данным о разрезе кембрийских отложений Предъенисейского бассейна.

Обособленное развитие двух диапиров возможно в случае отсутствия выраженных плотностных границ выше неустойчивого слоя. Как известно, изолированное начальное возмущение горизонтального неустойчивого слоя развивается обособленно, пока его рост не замедлится в связи с подходом к границе слоя, менее плотного, чем тот, в котором начинал подниматься диапир. При подходе к такой устойчивой плотностной границе, верхняя часть диапира начинает расширяться, т. е. формируются выраженные нисходящие ветви течения, инициируя рост возмущений кровли неустойчивого слоя. Если в перекрывающей толще нет плотностных границ, то изолированное начальное возмущение развивается в виде обособленного диапира до тех пор, пока его вершина не подойдет к поверхности.

Несмотря на то что имеющиеся данные о средней плотности палеозойских пород надсолевой части разреза прямо не исключают ее постоян-



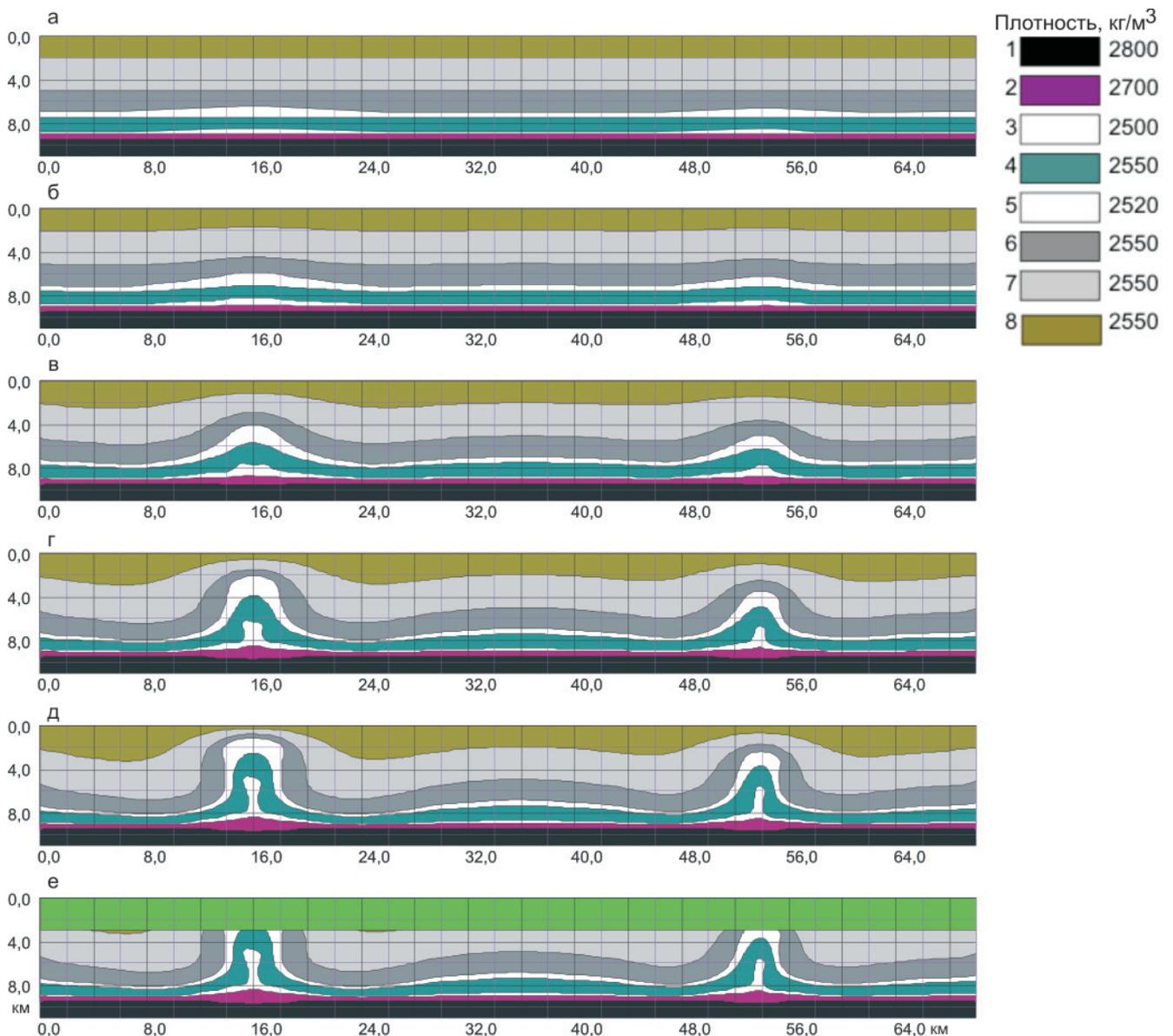
ства, все же это представляется маловероятным. Увеличение вверх по разрезу терригенной составляющей вместе с исчезновением ангидритов и доломитов должно приводить к закономерному снижению средней плотности. Вполне возможно, однако, что она убывает вверх по разрезу достаточно плавно, без скачков. В таком случае течение может развиваться приблизительно так же, как при постоянной плотности перекрывающего слоя.

Таким образом, воспроизвести основные черты солянокупольных структур профиля «Б» удастся при расчете эволюции следующего начального состояния.

Общая геометрия разреза та же, что и для профиля «А», с той разницей, что неустойчивые слои не выклиниваются. Главные отличия этой модели от предыдущей состоят в следующем. Во-первых, плотность среднего слоя (разделяющего неустойчивые слои) принята равной  $2550 \text{ кг/м}^3$  –

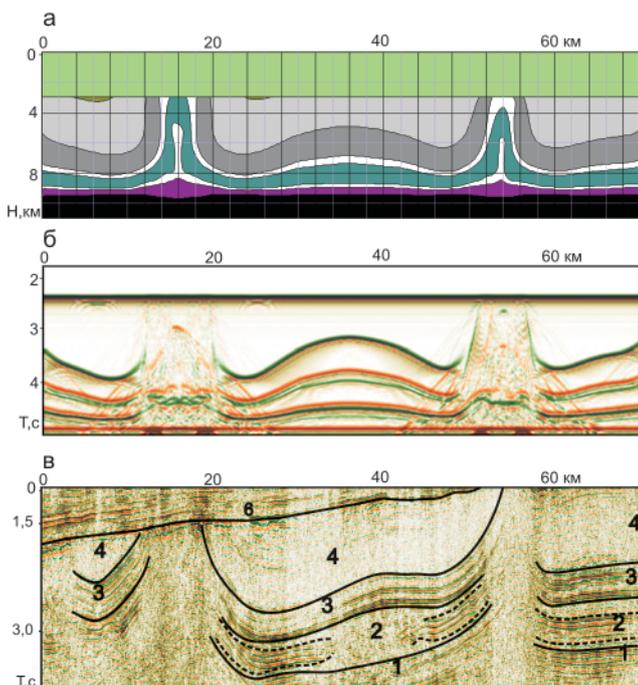
такой же, как у перекрывающей толщи. Во-вторых, в соответствии с упоминавшимися тектоническими особенностями бассейна здесь в его южной части, сжатой между складчатыми сооружениями, были заданы гораздо большие начальные возмущения – удвоением мощности соленасыщенных слоев. Эволюция, рассчитанная при указанных условиях, представлена на рис. 6.

Несмотря на большую величину дефицита плотности у нижнего слоя, вначале преимущественно развиваются более крупные возмущения более мощного верхнего слоя, формируя большие развитые диапиры. Постоянство плотности перекрывающей толщи позволяет растущим диапирам подняться практически к свободной поверхности без возбуждения роста возмущений второй генерации, не считая плавного изгиба слоев между диапирами, что соответствует волновой картине, наблюдаемой на сейсмическом разрезе



**Рис. 6.** Эволюция разреза по профилю «Б» (е – то же, что и д, но со «срезанными эрозией» верхними 2,3 км разреза, замещенными «отложениями мезозоя» – зеленый слой)

Усл. обозн. см. на рис. 4



**Рис. 7.** Сопоставление результатов моделирования с сейсмическим разрезом по профилю «А»: а – результирующее состояние модели (стадия «е» на рис. 6); б – синтетический сейсмический временной разрез, рассчитанный для этого состояния; в – фрагмент реального временного разреза на рис. 2, б

Цифровые обозн. см. на рис. 2

региональных дислокаций, которые выражены в общем западном погружении осадочных комплексов, связанном с увеличением мощности мезозойских отложений.

**Напряженно-деформированное состояние разреза и его возможное влияние на потенциальную нефтегазоносность структур**

Успешное воспроизведение наблюдаемых на сейсмических разрезах структур позволяет считать, что вдали от краевых зон бассейна локальное напряженно-деформированное состояние разреза в основном обусловлено действующими в нем архимедовыми силами – теми силами, которые формируют локальные структуры. Рассмотрим некоторые компоненты напряженно-деформированного состояния, рассчитанные нами в процессе моделирования на примере разреза по профилю «Б».

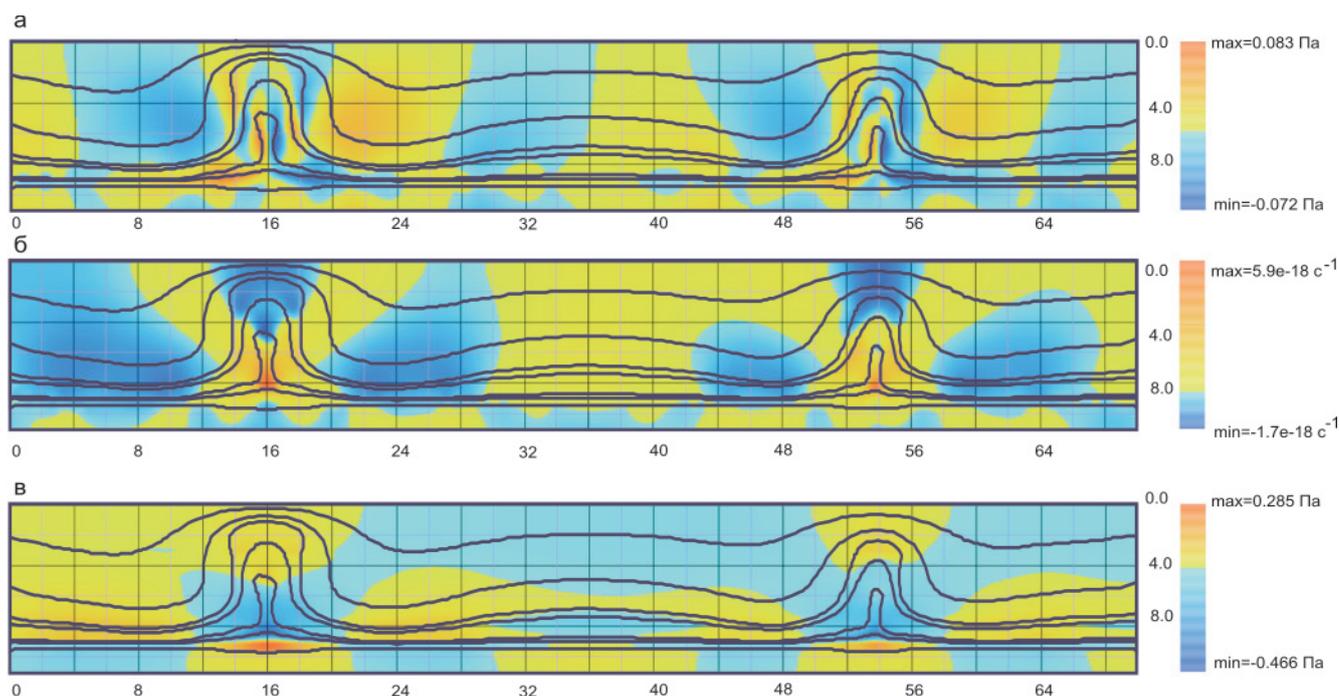
На рис. 8 приведены расчеты касательных напряжений, скорости вертикальной деформации и аномального давления по профилю, соответствующему состоянию, представленному на рис. 6, д.

Корневым зонам двух крупных диапиров соответствуют выраженные минимумы аномального давления, сопровождающиеся максимумами скорости вертикального растяжения. Компенсацион-

(см. рис. 2, б). В свою очередь, равенство плотности пород, перекрывающих соленосную толщу, плотности пород ее «средней» пачки обеспечивает плавное уменьшение ширины диапиров с высотой, вплоть до глубоких стадий эволюции.

На рис. 7, так же как на рис. 5, представлены результирующее состояние модели (см. рис. 7, а), рассчитанный для нее синтетический временной разрез (см. рис. 7, б) в сопоставлении с реальным сейсмическим разрезом по профилю «Б» (см. рис. 7, в).

Синтетическое волновое поле согласуется с рисунком сейсмической записи, наблюдаемым на реальном временном разрезе, с точностью до



**Рис. 8.** Элементы напряженно-деформированного состояния разреза по профилю «Б» (см. рис. 7, д): а – касательное (скальывающие) напряжение; б – скорость нормальной вертикальной деформации (растяжение – сжатие в вертикальном направлении); в – возмущение давления



ные синклинали, окружающие диапиры, характеризуются интенсивным вертикальным сжатием, т. е. горизонтальным растяжением, проявляющимся в утонении нижнего соленасыщенного слоя.

Если исходить из предположения о наличии нефтематеринских отложений в подсолевой толще (о докембрийском возрасте нефтематеринских пород свидетельствуют геохимические данные [7]), то можно сделать следующие выводы. Интенсивное растяжение и утонение «нижней» пачки соленосной толщи, вероятно, ухудшало ее свойства как покрывки, что в сочетании с распределением аномального давления могло способствовать перетоку пластового флюида в корневые зоны диапиров, характеризующиеся пониженным давлением. Высокая скорость вертикальной деформации в этих зонах способствует повышению их проницаемости, что облегчает флюиду путь вверх внутри диапиров. Срезание предъюрской эрозией апикальных частей диапиров ликвидирует флюидоупор «верхней» соленасыщенной пачки, что создает условия для расконсервации и дисперсии возможных залежей.

Более благоприятные условия для формирования залежи можно предположить в карбонатах внутри соленосной толщи, в области между диапирами (точнее, между их компенсационными синклиналями). С этой зоной также связан минимум давления, что способствует притоку пластового флюида. Но в отличие от замковых зон развитых диапиров флюидоупор верхней соленасыщенной пачки остается в этой зоне ненарушенным. Зоны повышенного давления над компенсационными синклиналями ограничивают переток флюида в ядра диапиров. С учетом регионального западного наклона реальной структуры наиболее перспективным участком выглядит эта часть разреза в интервале 70–80 км профиля «Б» (см. рис. 2, б).

## Выводы

Настоящая работа посвящена моделированию соляных диапиров в Предъенисейском осадочном бассейне.

С учетом данных о стратиграфии и строении Предъенисейского бассейна удалось подобрать модели формирования наблюдаемых в нем структур соляной тектоники. Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что эти структуры могли быть сформированы развитием плотностной неустойчивости нижнекембрийских соленосных отложений. Специфика соляного тектогенеза на рассматриваемой территории обусловлена прежде всего тем, что плотность всего палеозойского разреза (осредненная по достаточно крупным пачкам) близка к постоянной –  $2550 \text{ кг/м}^3$ , а ее вариации, в том числе и обуславливающие наличие инверсионных слоев, малы – десятки  $\text{кг/м}^3$ .

Движущими силами формирования исследуемых валов являются архимедовы силы, которые

связаны с плотностной неустойчивостью пачек с повышенной соленасыщенностью, расположенных у подошвы и кровли соленосной толщи. При этом имеет место «конкуренция» в реализации неустойчивости: преимущественное развитие получают возмущения той пачки, чья неустойчивость больше. Степень неустойчивости определяется величиной дефицита плотности, мощностью пачки и величиной начальных возмущений: при небольших начальных возмущениях мощности «верхней» и «нижней» пачек и несколько повышенной плотности разделяющей их «средней» пачки большей неустойчивостью обладает «нижняя». В этом случае реализуется режим образования внутриформационных диапиров и формирования четковидной структуры «верхней» пачки (профиль «А», см. рис. 2, а, 4). При больших начальных возмущениях преимущество получает более мощная «верхняя» пачка и реализуется режим роста крупных диапиров в породах, перекрывающих соленосную толщу с подавлением развития неустойчивости нижнего слоя (профиль «Б», см. рис. 2, б, 6). Смену режимов определяют величина начальных возмущений в сочетании с мощностью неустойчивых пачек и вариация средней плотности «средней» пачки, изменяющая относительную величину дефицита плотности неустойчивых слоев. Совпадение средней плотности промежуточной пачки со средней плотностью пород, перекрывающих соленосную толщу (профиль «Б») приводит к специфической картине плавного уменьшения ширины диапиров с высотой. Обособленное положение крупных диапиров на профиле «Б» объясняется (наряду с малой величиной инверсии плотности) отсутствием резких плотностных границ в надсолевом разрезе палеозоя.

Малый контраст средних плотностей достаточно крупных пачек (на порядок меньше, чем в областях «классической» соляной тектоники) дает на порядок меньшие величины действующих архимедовых сил и также на порядок меньшие темпы развития соляного тектогенеза. Кроме того, малые величины дефицита плотности обуславливают чувствительность процесса к небольшим латеральным вариациям плотности «средней» пачки, разделяющей неустойчивые слои. Это же обстоятельство определяет сильную зависимость процесса от величины начальных возмущений, определяя (вместе с малой скоростью их роста) выраженную связь соляных структур с региональной тектоникой.

Использованные при моделировании данные об исходной плотностной структуре палеозойского разреза, во-первых, согласуются с имеющимися геологическими материалами и, во-вторых, позволяют воспроизвести наблюдаемые структуры Предъенисейского бассейна со всеми их принципиальными особенностями как результат развития плотностной неустойчивости нижнекембрийских соленосных отложений.



Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что именно соляной тектогенез, накладываясь на региональные движения и пограничные воздействия, играет основную роль в формировании и динамике локальных структур в зоне распространения соляных отложений Предъенисейского бассейна. Расчеты эволюции и характеристик напряженно-деформированного состояния, обусловленного соляным тектогенезом, имеет смысл учитывать при исследовании вопроса о возможной нефтегазоносности структур бассейна.

Особенности строения эвапоритовой толщи и проявлений соляного тектогенеза в Предъенисейском бассейне свойственны (с некоторыми вариациями) и Сибирской платформе (Троицко-Михайловский вал и др.), в чехле которой ведутся интенсивные поиски и разведка месторождений углеводородов. Полученные результаты могут оказаться полезными при анализе генезиса подобных структур и оценке их нефтегазоносности и в Восточной Сибири.

*Работа выполнена в рамках проекта базовых исследований РАН VIII.73.2.2. и при поддержке Интеграционного проекта СО РАН и УрО РАН № 50.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Венд** и кембрий юго-востока Западной Сибири: стратиграфия, седиментология, палеогеография [Текст] / С. В. Сараев, А. В. Хоменко, Т. П. Батурина [и др.] // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2004. – № 1. – С. 7–18.
- Дашкевич, Н. Н.** Платформенные отложения палеозоя и подсолевые комплексы докембрия левобережья р. Енисей – новый объект нефтегазопромысловых работ [Текст] / Н. Н. Дашкевич, В. А. Каштанов // Докл. АН СССР. – 1990. – Т. 315, № 5. – С. 1187–1191.
- Исмаил-Заде, А. Т.** Реконструкция истории движения стратифицированной среды: обратная задача гравитационной неустойчивости [Текст] / А. Т. Исмаил-Заде, Б. М. Наймарк, К. Тэлбот // Проблемы динамики и сейсмичности Земли. – М. : ГЕОС, 2000. – С. 53–61. – (Вычислительная сейсмология, вып.31).
- Каштанов, В. А.** Геологическая интерпретация материалов сеймопрофилеирования МОГТ лево- и правобережья Енисея и перспективы нефтегазоносности докембрийских и палеозойских отложений : Препринт [Текст] / В. А. Каштанов, Ю. Ф. Филиппов. – Новосибирск : ОИГГМ СО РАН, 1994. – 28 с.
- Конторович, В. А.** W-Seis – отечественный интегрированный программный комплекс сейсмогеологического моделирования [Текст] / В. А. Конторович, В. В. Лапковский // Матер. IX Междунар. Санкт-Петербургского форума ТЭК. – СПб., 2008.
- Лунев, Б. В.** Быстрое численное моделирование соляной тектоники: возможность оперативного использования в геологической практике [Текст] / Б. В. Лунев, В. В. Лапковский // Физическая мезомеханика. – 2009. – Т. 12, № 1. – С. 63–74.
- Предъенисейская** нефтегазоносная провинция – новый перспективный объект поисков нефти и газа в Сибири [Текст] / А. Э. Конторович, В. А. Конторович, Ю. Ф. Филиппов [и др.] // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2006. – № 5–6. – С. 9–23.
- Рамберг, Х.** Сила тяжести и деформации в земной коре [Текст] / Х. Рамберг. – М. : Недра, 1985. – 399 с.
- Соляная** тектоника Сибирской платформы [Текст] / Под ред. акад. Ю. А. Косыгина. – Новосибирск : Наука, 1973. – 162 с. – (Тр. ИГиГ СО РАН, вып. 65).
- Схема** стратиграфии кембрийских отложений Приенисейской части Западной Сибири [Текст] / Е. А. Елкин, В. А. Каштанов, А. Э. Конторович [и др.] // Геология и геофизика. – 2001. – Т. 42, № 7. – С. 1015–1027.
- Филиппов, Ю. Ф.** Геология и перспективы нефтегазоносности домезозойских отложений левобережья р. Енисей (Кеть-Елогуйское междуречье) : Автореф. дис. ... к. г.-м. н. – Новосибирск, 2001. – 24 с.
- Филиппов, Ю. Ф.** Численное моделирование соляного тектогенеза в кембрийских отложениях Предъенисейского осадочного бассейна (Западная Сибирь) [Текст] / Ю. Ф. Филиппов, В. В. Лапковский, Б. В. Лунев // Геология и геофизика. – 2009. – Т. 50, № 2. – С. 127–136.
- Ismail-Zadeh, A. T.** Dynamic restoration of profiles across diapiric salt structures: numerical approach and its application [Text] / A. T. Ismail-Zadeh, C. Talbot, Y. A. Volozh // Tectonophysics. – 2001. – Vol. 337. – P. 21–36.
- Ismail-Zadeh, A. T.** Reconstruction of the history of the movement of layered geostructures: Inverse problem of gravitational stability [Text] / A. T. Ismail-Zadeh, B. Naimark, C. Talbot // Comput. Seis. Geodyn. – 2004. – N 6. – P. 27–32.
- Jackson, M. P. A.** External shapes, strain rates and dynamics of salt structures [Text] / M. P. A. Jackson, C. J. Talbot // Geological Society of America Bulletin. – 1986. – Vol. 97. – P. 305–323.
- Three-dimensional** forward and backward modelling of diapirism: Numerical approach and its applicability to the evolution of salt structures in the Pricaspian basin [Text] / A. T. Ismail-Zadeh, I. A. Tsepelev, C. J. Talbot, A. I. Korotkii // Tectonophysics. – 2004. – Vol. 387. – P. 81–103.