

ОСОБЕННОСТИ СТРОЕНИЯ И МЕХАНИЗМ ФОРМИРОВАНИЯ СОЛЯНЫХ ДИАПИРОВ АСТРАХАНСКОГО СВОДА*

А.И.Тимурзиев

АННОТАЦИЯ. На примере Астраханского свода рассматриваются принципиальные вопросы строения и формирования соляных диапиров.

ABSTRACT. On example of the Astrakhan arch fundamental questions of a structure and formation of salt diapirs are considered.

Введение

В структурно-тектоническом плане Еленовская площадь приурочена к зоне сочленения Астраханского свода и Заволжского прогиба Прикаспийской синеклизы. По отражающему горизонту I II структура представлена субширотной ориентированной двухвершинной складкой. На площади пробурено три глубокие скважины, выполнена сейсмическая съемка МОГТ-3Д, по результатам работ открыта газоконденсатная залежь.

Во вскрытом разрезе Еленовской площади участвуют три структурно-формационных комплекса: надсолевой (плиоцен-четвертичные, палеогеновые, верхне-нижнемеловые, средне-верхнеюрские, нижне-среднетриасовые, верхнепермские отложения), подсолевой (нижнепермские, каменноугольные, девонские отложения) и разделяющая их соленосная толща кунгурского яруса и сакмарско-артинских терригенно-карбонатных образований. Соленосная толща имеет типичную, характерную для области солянокупольной тектоники грядово-ячеистую структуру. Толщина кунгурского яруса в пределах куполов варьирует в широких пределах, достигая 4,5 км, глубина залегания от нескольких сот метров до 5 км и более. Основными морфологическими элементами соленосной толщи являются диапировые купола.

Проявление соляного тектогенеза обусловило различную стратиграфическую полноту разреза подсолевого и надсолевого комплексов и сложное строение вмещающих и покрывающих толщ. Наиболее полный стратиграфический разрез представлен в осевой части Еленовской межкупольной мульды, на сводах куполов разрез резко сокращен.

В пределах Еленовской площади расположено два диапировых купола Жолтай и Западный Жолтай. Изучение соляных диапиров и характера их взаимоотношений со структурой подстилающих, вмещающих и покрывающих пород имеет важное научное и практическое значение. Без понимания особенностей строения, генезиса и структурно-тектонических парагенезов нефтегазоконтролирующих структур с соляными куполами, месте и роли диапировых структур в формировании и экранировании залежей УВ невозможна оценка перспектив нефтегазоносности подсолевых палеозойских объектов и правильное ведение поисково-разведочных работ.

Существующие взгляды на генезис соляных диапиров

В образовании диапировых куполов основное значение придается процессу выжимания пластичной соли в места формирования «ядер протыкания» вышележащих пород. Согласно В.В.Белоусову [3] «...диапировые купола образуются в результате *медленного и постепенного выжимания соли* или другого пластичного материала *сквозь окружающие породы*». Анализируя распределение мощностей надсолевых отложений на диапировых куполах Мексиканского залива, В.В.Белоусов [3] отмечает, что «...*уменьшение мощностей всех горизонтов к своду свидетельствует о длительном поднятии купола при одновременном опускании всей местности и накоплении осадков*. Колебания в уменьшении мощности свит на своде свидетельствуют о том, что отношение между интенсивностью поднятия купола и скоростью общего прогибания менялась от века к веку. *Частично уменьшение мощностей на своде может быть связано с механическим раздавливанием слоев при поднятии соли*». Выделенные курсивом слова отражают принципиальные взгляды на физические условия диапиризма.

* На примере Еленовской площади

Разделяя в целом гипотезу местного изостатического приспособления масс (принцип восстановления гидростатического равновесия соли с окружающими породами) и изостатического механизма подъема диапирового ядра, В.В.Белоусов [3] указывает, что гипотеза местной изостазии встречает крупные затруднения (далеко не всегда породы диапирового ядра легче вмещающих пород), а проблему образования диапировых куполов нельзя считать решенной и надо искать дополнительные пути решения этой проблемы.

В.Е.Хаин и М.Г.Ломизе [10], связывая вслед за Ю.А.Косыгиным (1945) происхождение соляных куполов с инверсией плотности, отмечают, что «...соляные купола развиваются очень медленно, обычно параллельно с накоплением перекрывающих их отложений». Об этом свидетельствует уменьшение мощностей отложений в сводовых частях куполов, выпадение отдельных свит из разрезов, появление местных перерывов и несогласий». Однако, тот факт, что развитие куполов происходит не только длительно, но и скачкообразно и что эти скачки совпадают с фазами тектогенеза в смежных складчатых системах, не позволяет считать солянокупольную тектонику вполне автономным процессом [10].

За прошедшие годы взгляды на генезис соляных диапиров (диапировых куполов в более широком понимании) принципиально не изменились, развитие шло по пути выявления причин и механизмов возникновения инверсии плотности в земной коре, моделирования и математического обоснования адвективных тектонических движений и сопоставления результатов моделирования с характерными особенностями структур земной коры [4-7]. Однако сложившиеся с середины прошлого века [3-7] традиционные взгляды на механизм образования диапиров под воздействием силы тяжести и адвекции в процессе стремления пород с инверсией плотности к гравитационной устойчивости, не изменились, хотя и не объясняют многие геологические факты, ставшие доступными благодаря внедрению сейсморазведки 3Д. При строгом рассмотрении важнейшие принципы сохранения временной последовательности геологических событий, а также пространственно-временных соотношений границ геологических тел и структурно-формационных комплексов не находят логическое объяснение в этой модели.

В этой связи в рамках работ по интерпретации сейсморазведки 3Д и уточнению строения палеозойского комплекса Еленовской площади (ОАО «ЦГЭ», 2005) нами осуществлено изучение диапировых структур и выполнен анализ особенностей геологии соляного диапиризма с целью поиска решений перечисленных выше задач.

Особенности морфологии соляных диапиров Еленовской площади

По кровле кунгурского яруса перепады отметок в пределах Еленовской площади достигают 4410 м (от -5278,0 м до -868,6 м). Морфологически кровля кунгурского яруса, отождествляемая с поверхностью соли, представляет две куполовидные диапировые структуры Жолтай и Западный Жолтай, разделенные межкупольной мульдой. Диапировые тела имеют концентрическое строение в плане и близкие к вертикальному падению стенки, придающее им цилиндрическую объемную форму (Рис.1, 2).

Соляной диапир Западный Жолтай (Рис.1) имеет плосковершинное двухкупольное строение и занимает всю западную, центральную и северо-западную часть Еленовской площади. Отметка кровли северного высокого выступа составляет -1080 м, отметка южного выступа -1230 м, седловина между ними опущена до отметок -1720 м. Перепады отметок поверхности диапира достигают 640 м. Видимые на участке работ 3Д размеры диапира по оконтуривающей изогипсе -1850 м составляют 9,0×11,5 км. Амплитуда северного выступа составляет 4500 м (перепады отметок от -5650 м до -1100 м), южного выступа – 4000 м (перепады отметок от -5250 м до -1250 м).

Видимая западная часть соляного диапира Жолтай (Рис.2) имеет плосковершинное однокупольное строение и занимает восточный угол участка 3Д Еленовской площади. Максимальная отметка кровли соли купола Жолтай составляет -870 м. Видимые размеры диапира по изогипсе -1850 м составляют 4,5×7,0 км. Амплитуда купола 4600 м (перепады отметок от -5450 м до -870 м).

Расчет изостатической компенсации соляного диапиризма

В соответствии с общепринятыми взглядами [3-7] формирование соляных куполов происходит за счет выдавливания и подъема пластовой соли по ослабленным зонам, в том числе разло-

мам, под усиливающейся в процессе прогрессирующего седиментогенеза неравномерной нагрузкой надсолевых пород [6].

Процесс роста диапиров имеет строгую физическую природу и должен быть обоснован расчетами изостатической компенсации земной коры, содержащей пластовые соли. Как известно, изостазия – процесс стремления постоянно нарушаемой инверсии плотности к ее выравниванию. В условиях гравитационной уравниваемости тектонически стабильной земной коры, высота подъема диапиров и их соотношение с междиапировыми мульдами должны быть взаимно скомпенсированы. Иначе будет иметь место нарушение изостатического равновесия и активные тектонические деформации, стремящиеся привести земную кору в равновесное состояние.

Для расчета изостатической компенсации соляных диапиров внутренними структурно-формационными неоднородностями земной коры (междиапировыми мульдами) проведем несложные расчеты. Примем допущение, что в пределах Еленовской площади (100 км²), земная кора изостатически уравновешена. В пользу такого допущения говорят: 1) сnivelированный дневной рельеф; 2) нерасчлененное и слабонапряженное гравитационное поле; 3) затухание структурной дифференциации земной коры.

Для расчетов нами использован реальный профильный разрез (Inline=226) через Еленовскую площадь и результаты его структурной интерпретации (Рис.3).

В соответствии с принципом изостазии, если столб земной коры в каждой точке разреза изостатически уравновешен, то: $P_z^1 = P_z^2 = P_z^3$, где P_z^i – вертикальное горное давление в точках 1, 2 и 3. Точки 1 и 3 выбраны в зонах развития кунгурских соляных диапиров, а точка 2 – в зоне междиапировой мульды пермско-триасового выполнения.

Как известно P_z^i величина интегральная, соответствует вертикальному горному P_z или геостатическому (литостатическому) давлению P_{geo} и равна весу вертикального столба горных пород на приведенной глубине замера: $P_z = \rho gh$, где ρ – плотность пород; g – ускорение силы тяжести (гравитационная постоянная $g = 9,81 \text{ м/с}^2$).

Учитывая дифференцированный характер изменения плотности горных пород по разрезу, строгая формула расчета горного давления имеет интегральную форму по интервальной (ρ_i), осредненной по толщине (h_i) плотности: $P_z^i = \sum_{i=1}^n \rho_i g_i h_i$, где n – количество интервалов с равной плотностью пород.

Для расчета изостатической компенсации соляных диапиров точных интервальных определений плотности не нужно и мы ограничимся осредненными на три комплекса (n – надсолевой, c – солевой, n – подсолевой) значениями плотности пород (Ю.А.Кашников, 2004): $\rho_n = 2,14 \text{ г/см}^3$; $\rho_c = 2,18 \text{ г/см}^3$; $\rho_n = 2,50 \text{ г/см}^3$. Для межсолевого комплекса (m) принято среднее значение плотности пород пермско-триасового заполнения междиапировых мульд $\rho_m = 2,34 \text{ г/см}^3$.

Таким образом, интегральная величина вертикального горного давления для столба горных пород может быть рассчитана как сумма (Рис.3):

$$P_z^i = P_n^i + P_c^i + P_n^i = \rho_n^i g h_n^i + \rho_c^i g h_c^i + \rho_n^i g h_n^i;$$

для участков 1 и 3 распространения соляных диапиров (P_z^1 и P_z^3) и

$$P_z^i = P_n^i + P_m^i + P_n^i = \rho_n^i g h_n^i + \rho_m^i g h_m^i + \rho_n^i g h_n^i;$$

для участка 2 распространения мульд пермско-триасового заполнения (P_z^2).

Значения глубин и толщин соответствующих комплексов брались из реального профильного разреза (Inline=226), проходящего через скважину 2Е. Расчеты сведены в табл. №1 и дают наглядную картину изостатической компенсации соляными диапирами структурно-формационных неоднородностей земной коры Еленовской площади.

Таблица № 1

ρ_n	g	h_n	P_n^1	ρ_c	g	h_c	P_c^1	ρ_n	g	h_n	P_n^1	P_r^1
0,0214	9,81	1800	378	0,0218	9,81	2450	524	0,025	9,81	2400	589	1 490,4
ρ_n	g	h_n	P_n^2	ρ_m	g	h_m	P_m^2	ρ_n	g	h_n	P_n^2	P_r^2
0,0214	9,81	1250	262	0,0234	9,81	2300	528	0,025	9,81	2700	662	1 452,6
ρ_n	g	h_n	P_n^3	ρ_c	g	h_c	P_c^3	ρ_n	g	h_n	P_n^3	P_r^3
0,0214	9,81	1000	210	0,0218	9,81	4150	888	0,025	9,81	1600	392	1 489,8

Расчеты показывают, что с расхождением в 2,5% средний вес столба земной коры от кровли нижнего девона (уровень приведения) до земной поверхности для участков развития соляных диапиров (1, 3) и междиапировой мульды (2), практически одинаков. Таким образом, можно сделать вывод, что различные типы структурно-формационных разрезов земной коры Еленовской площади взаимно скомпенсированы, а сама Еленовская площадь находится в состоянии изостатического равновесия. Наблюдаемое отклонение расчетных цифр горного давления (Табл.1) может быть связано как с точностью осреднения расчетных параметров, так и возможным разуплотнением пород в пределах блока, содержащего газоконденсатную залежь. Дополнительный эффект снижения веса столба горных пород в точке 2 может создавать «поплавковый» эффект от газовой залежи.

Если принять среднюю плотность пород междиапировых мульд по Ю.С.Кононову (1961), равной $\rho_m = 2,5-2,6 \text{ г/см}^3$ (0,025-0,026 МН/м³), то мы получим полную компенсацию сравниваемых участков (Табл.2). Различие величин горного давления в точках 1, 3 (соляные диапиры) и 2 (междиапировая мульда) составляет всего 0,1% и находится ниже уровня точности определений расчетных параметров.

Таблица № 2

ρ_n	g	h_n	P_n^1	ρ_c	g	h_c	P_c^1	ρ_n	g	h_n	P_n^1	P_r^1
0,0214	9,81	1800	378	0,0218	9,81	2450	524	0,025	9,81	2400	589	1 490,4
ρ_n	g	h_n	P_n^2	ρ_m	g	h_m	P_m^2	ρ_n	g	h_n	P_n^2	P_r^2
0,0214	9,81	1250	262	0,025	9,81	2300	564	0,025	9,81	2700	662	1 488,7
ρ_n	g	h_n	P_n^3	ρ_c	g	h_c	P_c^3	ρ_n	g	h_n	P_n^3	P_r^3
0,0214	9,81	1000	210	0,0218	9,81	4150	888	0,025	9,81	1600	392	1 489,8

Следствием этих расчетов может быть возможность физической интерпретации механизма и времени формирования диапировых структур Еленовской площади.

Сопоставление с результатами экспериментального моделирования

Анализ литературных данных по экспериментальному моделированию соляных диапиров [4-7] обнаруживает целый ряд несоответствий моделей гравитационной тектоники природным диапирам (фактические наблюдения по Еленовской площади). Рассмотрим некоторые очевидные несоответствия.

1. В моделях роста диапиров компенсация всплывающего диапира происходит за счет заполнения вышележащим материалом пространства ниже «шляпки» купола в интервале ствола диапира и краевых синклиналей (эффект инверсии и встречного движения слоев разноплотностного материала). В природе эффект нарушения стратиграфической последовательности залегания слоев наблюдается крайне редко и связан со вторичными процессами перераспределения соли.

2. В моделях роста диапиров материал самого диапира и краевых синклиналей (межкупольных мульд) испытывает интенсивное смятие и дисгармоничную складчатость как проявление эффекта раздвигания стенок соли при сохранении объема пространства.

В природе такой эффект присущ соляным диапирам в силу естественной пластичности солей, но не наблюдается в межкупольных мульдах. На границе контакта солей с вмещающими породами эти процессы имеют место, но не распространяются внутрь межкупольных мульд. Учитывая отсутствие пустоты на глубинах роста диапиров, раздвигание стенок на ширину типичных

диапиров (10 км) и диапиров-гигантов (2000-2500 км²) должно компенсироваться пропорциональным уплотнением пород или сокращением объема межкупольных мульд за счет складчатости. Ни первого, ни второго природного явления в соразмерных масштабах не наблюдается. Наблюдаемые в межкупольных мульдах пликативные деформации зачастую носят вторичный характер и связаны с изменениями уклонов толщ на крыльях, приуроченных к ближайшим растущим диапирам (формирование уклона связано с началом их роста), или постседиментационной складчатостью (блоковыми деформациями) подсолевого ложа, реже связаны с формированием под мульдами «соляных подушек» (по Ф.Трусхейм, 1960).

3. В моделях роста диапиров «шляпка» купола зачастую шире ножки и ствола диапира.

В природе чаще наблюдаются обратные соотношения.

4. На модельных примерах материал краевых синклиналей (межкупольных мульд) образует слоистость параллельную вертикальному стволу диапира или запрокидывается, нарушая естественную последовательность залегания пород.

В реальных условиях слоистость пород межкупольных мульд нормальна, реже косо наклонная, редко конформна (параллельна) стволу (боковой стенке) диапира и не бывает обратной (запрокинутой). Для демонстрации приводятся поперечные профили через межкупольные мульды (Рис.1-2). Наблюдаемые отклонения слоистости от нормального залегания находят объяснение в перерывах осадконакопления, широко развитых в межкупольных мульдах.

5. Современное соотношение плотности надсолевых ($\rho_n = 2,14 \text{ г/см}^3$) и солевых ($\rho_c = 2,18 \text{ г/см}^3$) пород при высокой компетентности и литифицированности (стадия катагенеза) первых не допускает проявление физического процесса диапиризма в надсолевой толще по механизму гравитационной изостазии, на что указывал В.В.Белоусов [3]. Фактически кровля солей картируется на Еленовской площади у кровли верхнего мела, т.е. соль прорывает юрские и меловые отложения с меньшей плотностью. Эти факты физически не могут быть объяснены механизмом гравитационной тектоники и требуют привлечения механизма принудительного внедрения солей.

6. В соответствии с принципом актуализма плотность пород триаса (терригенная толща) до завершения герцинской складчатости также не могла существенно превышать плотность соли и рост диапиров не мог начаться до времени инверсии плотности надсолевых пород, связанной с региональным метаморфизмом (катагенезом) пород. Инверсия плотности триасовых пород, заполняющих современные мульды, могла произойти только на завершающем этапе герцинской складчатости в поздне триасовое (раннеюрское) время, а учитывая отсутствие в разрезе нижнеюрских и частично среднеюрских отложений, в раннеюрское время. До инверсии плотности пород активный рост диапиров представляется маловероятным, в связи с чем, формирование диапиров по механизму изостазии могло начаться не раньше раннеюрского времени.

7. В моделях роста диапиров «стратиграфическая» последовательность и полнота «разреза» не нарушается. Рост диапиров не выражен пропорциональными амплитудами структур надсолевой толщи. С позиций представлений о конседиментационном росте диапиров невозможно объяснить существующие различия в полноте стратиграфического разреза на куполах и межкупольных мульдах. Отсутствие отложений отдельных ярусов, отделов и целых систем над соляными диапирами необъяснимо с позиции медленного конседиментационного роста диапиров [3, 5, 10] для осадочного бассейна, характеризующегося длительным и устойчивым прогибанием и одновременным изобилием перерывов осадконакопления.

8. В моделях роста диапиров проблема пространства решается только за счет перераспределения материала внутри объема сосуда согласно градиенту плотности. В природе рост диапиров может компенсироваться главным образом механическим подъемом и размывом перекрывающих пород, так как деформации пород в межкупольных мульдах ограничены изменениями уклонов стратиграфических комплексов и структурами твердого течения (будинирования) компетентных слоев (песчаник) в контрастном по пластичности матриксе (глина).

9. В моделях роста диапиров процесс адвекции завершается полным перемещением легкого материала вверх, а тяжелого вниз и прекращением движения [6]. В природе такая стадия эволюции процесса роста диапиров нигде не наблюдается. Отсутствие этой стадии объясняется большими величинами предельного напряжения сдвига и большей вязкостью горных пород [6], хотя эти отличия вполне могут быть скомпенсированы длительностью процесса роста диапиров. Возраст

кунгурских солей более 250 млн. лет, срок достаточный для преодоления напряжения сдвига и вязкости, если объяснять формирование диапиров пластическим течением солей.

10. В моделях роста диапиров создаются центробежные силы, превышающие природные условия гравитации на 2-3 порядка: до 800-990g [6] и 3000g [5]. Можно ли признать такие условия нагружения эквивалентными? Известно, что при высоких скоростях деформирования, наряду с количественными изменениями прочности и пластичности пород возможны и качественные изменения механизма деформации. Скорость деформирования оказывает значительное влияние на вид предельных кривых $\tau = f(\sigma_0)$ пластичных пород. Так для каменной соли предельные кривые при скорости деформирования 40 м/с приближаются к прямой с крутым наклоном, характерным для хрупких пород (кварцит), а при скоростях >40 м/с для всех пород (пластичных и хрупких) имеет место одна общая предельная кривая [11]. С учетом сказанного, условия эксперимента на твердых материалах и модель их деформирования нельзя признать строго соответствующими представлениям о пластическом течении как механизме формирования соляных диапиров.

11. При моделировании совершенно не учитываются процессы размыва на сводах растущих диапиров и переотложение продуктов денудации в мульдах. Это основные тектоно-седиментационные процессы, обуславливающие изостатическую компенсацию процесса роста диапиров. Изменения мощностей в межкупольном пространстве происходят за счет постседиментационных процессов кровельного срезания отложений над растущими диапирами и составляют 500-1000 м, мощности подошвенных линз склоновой седиментации (линзы свала пород) у стенок солей достигают 500 м. В экспериментальных моделях компенсация роста диапиров происходит не за счет этих масштабных геологических процессов, а за счет сомнительных и не наблюдаемых в природных условиях процессов перетекания компетентных пород.

Показанные различия в строении соляных диапиров и их экспериментальных моделей обусловлены принципиальными различиями природного и принятого механизма формирования диапировых структур. И, если в экспериментах движущим механизмом является пассивное гравитационное всплывание и пластические деформации (течение) на границе реологических свойств пород, то в реальных условиях формирование диапиров – это активный динамический процесс, связанный с прорывом (скрытой эксплозией), принудительным (сверхгидростатическим) нагнетанием солей (соляной рапы) и хрупким разрывом (срезанием) пород на границе изменения реологических свойств вмещающих пород и прорывающей их соли. Отсутствие изменений мощностей отложений кровельных частей седиментационных циклов мульдового заполнения, наблюдаемое на многочисленных сечениях на границе стенок солей, не считая структур твердого течения и будинирования пород на стенках диапиров, демонстрируют эффект постседиментационного срезания толщ триасовых отложений по плоскостям разломов (Рис.1-2). А наблюдаемые раздувы мощностей седиментационных циклов мульдового заполнения связаны с формированием в их подошвенных частях мощных линз склоновой седиментации, синхронных этапам роста диапиров.

Несоответствия в строении модельных и природных диапиров наводят на целый ряд вопросов. Если диапиры имеют гравитационную природу и формируются на основе неустойчивого (инверсионного) распределения плотностей пород и развиваются от неравномерного распределения нагрузки вышележащих пород на соль, то почему этот процесс:

а) во-первых, прерывистый, а не непрерывный, как и определяющий неравномерность распределения нагрузки пород процесс осадконакопления;

б) во-вторых, затухает во времени (от раннего Mz к позднему Kz), а не усиливается в соответствии с увеличением нагрузки и неравномерности распределения нагрузки вышележащих пород и не завершается полным восстановлением плотностной инверсии;

в) в-третьих, почему кратковременный процесс активного роста диапиров чередуется с длительными периодами, когда их развитие приостанавливается, если определяющие процесс условия имеют непрерывную во времени продолжительность;

г) в-четвертых, почему условия, обеспечивающие неравномерную нагрузку вышележащих пород (изменения мощностей) не запечатлены в изменениях современной структуры и палеоструктуры подсолевого ложа;

д) в-пятых (что самое главное), почему соляные диапиры растут не в периоды интенсивного погружения бассейна и неравномерного накопления мощных толщ осадков, а в кратковременные этапы тектонической активности, подъема и размыва отложений.

Все эти и другие почему заставляют искать другие объяснения природному феномену, связанному с формированием соляных диапировых структур.

Объемные реконструкции (стереометрия) соляных диапиров

Рассмотрим реальные условия залегания соляных тел внутри межкупольных мульд, перекрывающих (надсолевых) и подстилающих (подсолевых) толщ по результатам реконструкции мощностей синхронных комплексов Еленовской площади (Рис.4-5).

Карты мощностей надсолевых толщ от кровли кунгурской соли до кровли четвертичных отложений (Рис.4,а), до кровли палеогена (Рис.4,б), до кровли верхнего мела (Рис.4,в) и до кровли верхней юры (Рис.4,г) показывают общую до деталей для всех анализируемых толщ картину распределения толщин покровного Mz-Kz комплекса и составляющих его подкомплексов. Во всех случаях это сокращенные мощности над диапирами Жолтай и Восточный Жолтай и разделяющая их зона увеличенных мощностей, совпадающая в плане с межкупольной мульдой.

Карты мощностей подсолевых толщ (суммарных мощностей солевых и подсолевых толщ) до кровли кунгурской соли от кровли башкирского горизонта среднего карбона (Рис.5,а), от кровли тульско-бобриковского горизонта нижнего карбона (Рис.5,б), от кровли среднего девона (Рис.5,в) и от кровли верхнего девона (Рис.5,г) показывают также общую до деталей для всех анализируемых толщ картину распределения толщин верхне-среднепалеозойского комплекса и составляющих его подкомплексов. Во всех случаях это увеличенные мощности отложений (палео-прогибы) под диапирами Жолтай и Восточный Жолтай и разделяющая их линейная зона уменьшенных мощностей отложений (палеоподнятия), совпадающая в плане с межкупольной мульдой.

Налицо зеркальная симметрия морфологии (вложенность) и инверсия процессов, определяющих распределение мощностей (палеоструктуры) надсолевого и подсолевого комплексов. Объемная визуализация (стереометрия внутренних соотношений диапиров и межкупольных мульд) позволяет наглядно представить эти соотношения (Рис.6).

Анализ соотношений современных структурных и палеоструктурных поверхностей надсолевых и подсолевых горизонтов и поверхности кунгурской соли приводит к следующим выводам.

1. Современный структурный план подсолевых палеозойских горизонтов Еленовской площади наследует палеоструктуру подсолевых (Pz) горизонтов.

2. Современный структурный план надсолевых (Mz-Kz) горизонтов имеет зеркальное строение, обратный (обращенный) характер и инверсионную природу по отношению к современному структурному и палеоструктурному плану подсолевых (Pz) горизонтов.

3. Современный структурный план кровли соли кунгурского яруса согласен с палеоструктурным планом надсолевых (Mz-Kz) горизонтов и имеет обратный (обращенный) характер и инверсионную природу по отношению к палеоструктурному плану подсолевых (Pz) горизонтов.

4. Современный структурный план кровли соли (кунгурского яруса) имеет зеркальное строение, обратный (обращенный) характер и инверсионную природу по отношению к современной структуре подсолевых (Pz) горизонтов.

Таким образом, мощность соли оказывается увеличена за счет диапирообразования над современными прогибами и палеопрогибами подсолевых (Pz) горизонтов. Над современными подсолевыми (Pz) поднятиями и палеоподнятиями мощность соли резко сокращена (уменьшена) до возможно полного выклинивания (отсутствия в межкупольной мульде на севере Еленовской площади). Полученные выводы сведены нами в графическую модель строения диапировых структур Еленовской площади (Рис.7), которую можно рассматривать как универсальную модель взаимоотношения соляных диапиров со структурой подстилающих и перекрывающих комплексов. Генетическая природа выявленных связей будет рассмотрена ниже. Отметим только, что все эти выводы справедливы при тектонической (не эрозионной) природе подсолевого палеозоя, а как будет показано ниже – это не совсем так. Дополнительное искажающее влияние на соотношения структурных и палеоструктурных поверхностей может вносить эффект гидростатического давления соляных диапиров на палеозойское ложе. Так как соль пластична и литостатическое давление

трансформируется здесь в гидростатическое, это приводит к общему росту эффективного давления над и под диапирами и как следствие к выпуклости не только кровли, но и подошвы соли.

Д.Л.Федоров и С.И.Кулаков [8] при изучении геологических особенностей формирования гигантских месторождений нефти и газа Прикаспия и Северного Каспия отмечают тенденцию, согласно которой непосредственно над наиболее приподнятой частью залежи уникальных по объему ловушек Астраханской, Тенгиза, Кашагана и Карачаганак происходит резкое уменьшение мощности соли, вплоть до практически полного ее отжатия в соляные купола, «отступающие» к периферии залежи. Как видим наша модель находит подтверждение на примере строения крупнейших нефтегазовых месторождений Прикаспийской синеклизы. Еще раньше В.В.Белоусовым было показано, что диапировые купола располагаются нередко над мульдами нижележащих отложений и между участками их поднятий [3]. Таким образом, подмеченные В.В.Белоусовым и показанные нами на примере Еленовской площади соотношения современных структурных и палеоструктурных поверхностей подсолевых и надсолевых горизонтов с поверхностью кунгурской соли могут служить генетическим критерием прогнозирования подсолевого структурного плана и локальных нефтегазоперспективных поднятий в девонском комплексе отложений.

Перерывы осадконакопления - этапы роста диапиров

Важной и не типичной для осадочных бассейнов особенностью строения Прикаспийской впадины и изучаемой площади, является обилие поверхностей несогласия, связанных с региональными и локальными перерывами осадконакопления. При огромной мощности осадочного выполнения внутри изученных сейсморазведкой 3Д и вскрытых бурением отложений верхнего палеозоя и Mz-Kz закартировано более десяти поверхностей несогласия[†]. Наиболее крупные перерывы осадконакопления, запечатленные в размыве отложений и сокращении стратиграфической полноты разреза связаны на Еленовской площади с периодами: каледонского (раннепалеозойского), герцинского (позднепалеозойского), киммерийского (мезозойского), альпийского (кайнозойского) тектогенеза. Помимо этих региональных, выделяются зональные и локальные перерывы осадконакопления: предпермский (раннепермский), предтриасовый (раннетриасовый), раннетриасовый (предоленекский), позднепермский, предмеловой (преднеокомский), предверхнемеловой (предкампанский, предсантонский), предпалеогеновый, предверхнемиоценовый, предверхнеплиоценовый, предчетвертичный и вероятно другие, менее значимые перерывы осадконакопления.

Другой важной особенностью надсолевого комплекса Еленовской площади, Астраханского свода и Прикаспийской впадины в целом, является его континентальная природа и преимущественно терригенно-молассовый состав. Состав осадочного выполнения свидетельствует о преобладании на всем позднепалеозойском (пермь) и Mz-Kz этапах развития территории режима восходящих движений с редкими эпизодами морской седиментации.

Не обсуждая здесь первопричину, заметим, что между количеством перерывов осадконакопления и импульсами роста диапиров может существовать генетическая связь, в основе которой флюидодинамическая природа механизма диапириобразования.

Механизм формирования соляных диапиров

Соляные диапиры Жолтай и Западный Жолтай сформированы по общепринятым представлениям на основе пластического течения и перераспределения масс первично горизонтальных пластовых солей кунгурского яруса (иреньский и филипповский подъярусы). По этим представлениям в качестве пускового механизма, вызывающего гравитационную неустойчивость и начало вертикального течения солей, рассматривается воздействие неравномерного гравитационного перекрытия надсолевых пород. Эта схема получила подтверждение по многочисленным результатам экспериментального моделирования и рассматривается как аксиома [4-6]. Наши наблюдения и геолого-физический анализ показывают целый ряд несоответствий модельных представлений фактическим геологическим особенностям строения диапиров Еленовской площади. Для объяснения этих несоответствий привлекается флюидодинамическая концепция генезиса соляных структур как активных структур глубинной скрытой эксплозии и соляного магматизма (принудительно-

[†] Для сравнения в Западной Сибири выделяют два региональных перерыва осадконакопления – в подошве (герцинское несогласие) и в кровле (альпийское несогласие) осадочного чехла.

го инъекционного нагнетания глубинных галоидных рассолов), а не как пассивных структур пластического течения.

С учетом выполненных расчетов совершенно очевидно, что рост диапиров физически строго согласован с общей структурой и распределением мощностей вмещающих соли пород. Высота подъема диапира не есть произвольная величина, а является функцией динамического состояния изостатически компенсирующего объема междиапирового пространства. Нарушение изостазии, вызванное скачкообразным (импульсным) подъемом диапира, должно мгновенно (в геологическом масштабе времени) компенсироваться перестройками возмущенных участков земной коры за счет интенсивной денудации сводов и лавинной седиментации в мульдах.

Как известно изостатические аномалии независимо от их природы не могут сохраняться длительное время после прекращения действия сил, нарушающих равновесие. В пользу этого говорят близость к равновесию (Ушаков, 1963) как районов, несущих мощную нагрузку современных оледенений (Антарктида, Гренландия), так и районов, где эта нагрузка была снята совсем недавно (Фенноскандия, Канада). Интенсивные изостатические аномалии указывают на то, что в данном районе действуют или действовали в самом недавнем геологическом прошлом силы, которые вывели земную кору из состояния изостатического равновесия. Таким образом, следует ожидать, что нарушения изостатического равновесия должны иметь определенную корреляцию с другими проявлениями тектонической активности и содержать в себе определенную информацию о тектонических силах, действующих в настоящее время или действовавших в недавнем геологическом прошлом [1]. Эти выводы в полной мере могут быть распространены на вопросы изостатической компенсации соляного диапиризма, как процесса, имеющего общую физическую основу с изостазией в геологии вообще. А потому без учета физических законов геологическое толкование процессов формирования соляных диапиров сегодня недопустимо.

Традиционно соляной диапиризм понимается как процесс, синхронный конседиментационному осадконакоплению в мульдах. Трудно представить накопление терригенных осадков (пестроцветные континентальные молассы) пермо-триаса в межкупольных мульдах с соляными бортами. Противоречит этим представлениям и наблюдаемые на Еленовской площади геологические факты. По данным сейсморазведки 3Д мы наблюдаем прямые признаки срезания пород по простиранию пластов без видимого изменения мощностей триаса на стенках соли и в осевых частях мульды. Сокращение мощностей в направлении бортов межкупольных мульд имеет постседиментационную природу, и объясняются кровельным срезанием и эффектом твердого течения и будинирования компетентных слоев на сводах и стенках растущих диапиров. Изменения толщин в межкупольных мульдах имеет природу лавинной седиментации, связаны с линзами склонового свала пород и с конседиментационным ростом диапиров не имеют ничего общего.

Рассмотрим возможные механизмы формирования соляных диапиров.

1. Расклинивание вышележащих пород и пластический переток соли вверх по разрезу согласно изостатической модели. Межкупольные мульды является в такой схеме следствием раздвижения диапирами стенок разорванных пластов. Это процесс перераспределения и горизонтального перемещения первично покровных пород и последовательного перехода по мере роста диапира покрывавших пластовую соль пород во вмещающие породы межкупольных мульд. Слабое звено при допущении подобного механизма роста диапиров – баланс пространства. Огромные в десятки километров раздвижения стенок вмещающих пород не скомпенсированы ни дисгармоничной складчатостью, ни многократным уплотнением пород междиапировых мульд, ни наличием дуплексов сжатия и растяжения придиапирового пространства, ни процессами метасоматического замещения вмещающих пород, способными объяснить столь значительные объемные деформации, вызванные внедрением соляных диапиров. Правомерность подобного механизма должна быть обоснована на физическом уровне расчетами объемно-материального баланса.

2. Механизм конседиментационного роста диапиров предполагает подошвенное налегание пород межкупольных мульд на кровлю соли. Слабое звено этого механизма роста диапиров – многочисленные примеры отсутствия признаков конседиментационного сокращения мощностей от соляных бортов к центрам мульд. Контакты вмещающих пород со стенками соляных диапиров чаще резкие, тектонические, с признаками срезания пород на границах диапиров, либо конформно повторяют кровлю соли в присводовых участках, не претерпевших полный размыв (Рис.1-2). Совершенно не поддается объяснению при таком понимании причин формирования диапиров нали-

чие внутри мульд поверхностей стратиграфического и углового несогласия, связанных с перерывами осадконакопления и приведших к формированию в локально замкнутом пространстве мульд нескольких резко несогласных структурных комплексов. Можно ли допустить, что перерывы, связанные с этапами регрессий, вызвавшие несогласное залегание верхнепермского, ниже-средне- и верхнетриасового комплексов, происходили в узком пространстве междиапировых мульд и не выходили за границы соляных стенок? Такое представить невозможно, а значит и механизм конседиментационного роста диапировых куполов не более чем сложившийся стереотип. Да и само существование соляных бортов седиментационного бассейна – геологически невероятно. И уж совсем не вяжется с представлениями о медленном конседиментационном росте диапиров повсеместное выпадение из стратиграфического разреза свит, ярусов и целых отделов (T_3 , J_1) в межкупольных мульдах, систем (Pg, K, J, T) и даже целых групп (Mz) отложений над сводами диапиров? Не объясняет этот механизм роста диапиров и наличие линз (конусов свала) терригенных моласс у основания диапиров в межкупольных мульдах.

3. Постседиментационный рост соляных диапиров по механизму импульсного флюидодинамического нагнетания на этапах тектонической активизации территории с поднятием разорванных по стенкам соли блоков вышележащих пород, их последующим размывом и перекрытием выровненной поверхности следующим структурно-формационным комплексом. В соответствии с этим механизмом, который мы считаем физически и геологически наиболее обоснованным, кровля диапира может периодически вскрываться эрозией (срезаться на уровне поверхности несогласия) при достижении ей уровня денудации. До очередного этапа тектонической активизации происходит неравномерное некомпенсированное осадконакопление (лавинная седиментация), приводящее к восстановлению нарушенного изостатического равновесия. В распределении мощностей на этом временном отрезке признаков роста соляных диапиров не наблюдается. Со следующим импульсом подъема соли по ослабленным зонам прогрессирующий рост диапира продолжается. Модель временной последовательности роста соляного диапира по схеме импульсного многоактного постседиментационного процесса демонстрируется схемой (Рис.8). Подобный механизм формирования диапиров объясняет стратиграфическую полноту разреза в межкупольных мульдах и недостающие части разреза на сводах соляных куполов.

Последний вариант (3) механизма формирования и верхний временной интервал роста диапиров может быть обоснован следующими наблюдениями.

а) Высота стратиграфического проникновения диапира контролируется ближайшей по разрезу поверхностью стратиграфического несогласия. Этапы роста диапиров коррелируют с этапами тектонических перестроек и размыва наддиапировых палеосводов (внутрипермские, внутритриасовые, внутриюрские и внутримеловые перерывы). Этот механизм объясняет отсутствие над сводами диапиров синхронных межкупольных отложений, которые были подняты растущими диапирами (поршневой эффект) и размывы в последующий этап денудации. Сохраняется принцип баланса пространства.

б) Мощности надсолевого покровного комплекса регионально выдержаны в надкупольных и межкупольных зонах и изменения их имеют природу кровельного срезания на участках роста диапиров в периоды региональных фаз тектогенеза и заполнения вторичных депрессионных впадин обрушения над растущими диапировыми сводами. На этом фоне отмечаются локальные окна прорыва солей в кайнозойскую толщу, при отсутствии инверсии плотности и пускового механизма изостатической модели.

в) Повсеместно распространенные на поверхности диапира породы, формирующие кепрок (гипс, ангидрит, глина), имеют природу кор выветривания и вторичного гипергенного изменения пород в приповерхностных условиях. Мы допускаем наличие синхронных перерывам осадконакопления кор выветривания внутри соляных диапиров, для их выделения требуется детальный анализ комплекса ГИС. В частности, на кривых ГК внутри монотонной недифференцированной толщи солей выделяются многочисленные репера, отождествляемые с перерывами осадконакопления, размывом кровли соли и переотложением продуктов разрушения.

г) В процессе импульсного поршневого выдавливания соль поднимается на высоту, превышающую уравнивающую ее величиной горного давления мощность междиапировой мульды. Не требует аргументации положение, согласно которому в моделях изостатической компенсации земной коры за счет пассивного гравитационного всплывания на участке развития диапировых

структур зеркало соли не может подняться выше стратиграфической поверхности пород со значениями плотности ниже плотности соли. Отсутствует пусковой механизм.

д) Очевидно, что в периоды прогрессирующего прогибания и накопления осадков, диапиры не испытывают активного роста, а территория изостатически восстанавливается. Существующая сегодня неравномерность в распределении мощностей вышележащих пород не вызывает рост соляных диапиров. Свидетельством тому современная гравитационная устойчивость диапиров при огромной разнице структурных отметок и толщин кайнозойского чехла в пределах Астраханского свода (разность отметок подошвы акчагыльского яруса и мощности между кровлей апшеронского и подошвой акчагыльского ярусов превышают 500 м), вызванных активным ростом структуры в неогене, размывом и последующим заполнением наложенной грабен-структуры обрушения над Астраханским сводом.

е) Традиционно сокращение мощности пластовой соли объясняется выдавливанием ее под увеличенной нагрузкой межкупольных мульд. Но почему диапиры устойчиво занимают свое структурное положение еще с позднепалеозойского и раннемезозойского времени, когда межкупольные мульды отсутствовали, традиционная модель не объясняет. На самом деле, если соль пластична и течет, подчиняясь единственно гравитационному фактору, почему положение диапиров столь стабильно во времени и, как было показано, строго увязано со структурами и палеоструктурами определенного типа. Трудно объяснить стабильное положение диапиров в пространстве при постоянной миграции во времени осей палеопрогибов в межкупольных мульдах. Определяемая весом этих толщ нагрузка была крайне неоднородна и во времени нестационарная.

Таким образом, основанные на механизме подъема под действием гравитационных сил всплывания (пассивная тектоника) экспериментальные модели, при видимом морфологическом подобии, далеки от реальных природных геологических структур динамического нагнетания пород. Без учета гидродинамического (флюидодинамического) движущего фактора в структурообразовании вообще и диапирообразовании в частности, невозможно объяснить все особенности морфологии и структурно-формационных парагенезов диапировых структур с вмещающими и перекрывающими отложениями и синхронными времени накопления этих толщ тектоническими процессами. Вся сумма геологических несоответствий традиционным представлениям и экспериментальным моделям, выявленных при анализе диапировых структур Еленовской площади, является следствием принципиального различия в механизме формирования диапиров.

В традиционных представлениях формирование соляных диапиров происходит путем пассивного гидростатического всплывания соли в пределах адвективных ячеек (аналоги конвективных ячеек Бенарда) по законам гравитации при инверсии плотности пород. Традиционным представлениям на процесс медленной пластической деформации (складки нагнетания и пластического течения) мы противопоставляем импульсную хрупкую деформацию горных пород при проявлении первоначальной скрытой эксплозии как механизма поступления солей в осадочный чехол. В основе этого механизма лежит соляной магматизм, вызвавший взрывное разрушение, брекчирование и вынос горных пород в окрестностях соляных кратеров и кольцевых кальдер, служивших в это время зонами поступления глубинных галоидов и гидротермальных соляных рассолов. Процесс соляного магматизма и гидротермально-галоидной деятельности обеспечивал поступление минеральных солей и формирование первичной структуры соляных колонн, пластовых соляных жил (силлы) и диапиров над скрытоэксплозивными аппаратами соляного вулканизма над глубинными разломами, узлами их пересечения и сводами поднятий. Каменная соль внедрялась изначально в пласты в форме силлов (пластовых жил) в агрегатном состоянии флюидных рассолов, имела сверхгидростатическое давление и температуру глубинного источника и рвала пласты по схеме естественного гидроразрыва. Терригенный состав и глинистая основа триаса и верхней перми обеспечивали с позднепермско-раннетриасового времени благоприятные условия экранирования для пластовой разгрузки глубинных соляных рассолов. В процессе отжатия воды и кристаллизации соли, процесс роста диапиров трансформировался в блоковые деформации, когда небольшая мощность перекрывающих толщ не требовала высокой подъемной силы для ее испарывания на всю толщину. На этом этапе активно протекали процессы метасоматоза и гидротермальной проработки вмещающих пород.

При таком механизме формирования диапиров вызывают сомнения как седиментационная природа и первично пластовое залегание кунгурской соли, так и кунгурский возраст соли и кун-

гурское время формирования пластовых солей (силлы) и соляных диапиров (колонн). Последующие вторичные процессы перераспределения солей в процессе гравитационного выравнивания изостатических аномалий, привели к частичному нарушению модельных связей и взаимоотношений (Рис.7, 8) в структуре соляных тел и вмещающих их и перекрывающих отложений. Подошвенные ядра соляных диапиров рассматриваются по этой схеме очагами поступления галоидных рассолов в зонах растяжения и скрытой разгрузки глубинных гидротермальных растворов в пределах сводов палеоподнятий и граничных зонах глубинных разломов. В таком представлении современные прогибы под диапирами в подсолевых отложениях могут представлять собой вторичные эрозионные формы палеорельефа над палеозойскими палеоподнятиями (кальдеры скрытых взрывных аппаратов), а современные выступы палеозоя под межкупольными мульдами – эрозионные останцы над палеозойскими палеопрогибами (формы обращенного палеорельефа). В пользу этого говорят и палеорекострукции, указывающие на резкое сокращение (за счет кровельного срезания) мощностей каменноугольного возраста от Астраханского свода к Заволжскому прогибу (до полного срезания башкирского и частично тульско-бобриковского ярусов). В таком представлении восточный и северо-восточный борты карбонатной платформы Астраханского свода могут иметь не седиментационную, а тектоническую природу.

Палеотектонические свидетельства

Анализ литературных данных по АГКМ и Астраханскому своду (С.В.Казеева, 2004; С.А.Важнова, 2004; А.Я.Ярошенко, 2005 и др.) и палеорекострукции по Еленовской площади показывает, что при сходной литофациальной характеристике башкирского яруса (нижнебашкирский подъярус) составляющие его горизонты имеют выдержанные мощности по месторождению: краснополянский (87-110 м), северо-кельтменский (51-61 м), прикамский (65-77 м). Для сакмаро-артинской покрывки Астраханского свода и Заволжского прогиба показана общая, как и для всех горизонтов башкирского яруса закономерность в сокращении мощностей в северо-восточном направлении (А.Я.Ярошенко, 2005). Это позволяет распространить наши выводы о тектонической предопределенности изменения мощностей в пределах Еленовской площади на весь Астраханский свод, а по разрезу вплоть до верхнебашкирского подъяруса среднего карбона и сакмаро-артинского яруса нижней перми.

Выполненное авторами районирование по стратиграфической полноте разреза и распространению литотипов пород (сводовый, склоновый, переходный) отражает географию распространения процессов денудации в период предкунгурского размыва. Локальность процессов размыва средне- и нижнекаменноугольных отложений, избирательное структурное положение «пятен» денудации свидетельствует о локальном (даже в масштабах локальных поднятий) проявлении процессов деструкции земной коры, обусловивших избирательную денудацию кровельных горизонтов под кунгурскими солями. Положение «пятен» денудации на сводах и приразломных участках структур и в других структурных условиях является наложенным на современную структуру, их первичное палеоструктурное положение определяет подошва распространения солей.

Для Еленовской площади установлено отсутствие или различная стратиграфическая полнота средне- и нижнекаменноугольных отложений (вероятно и верхов верхнего девона в объеме фаменского яруса) под подошвой распространения кунгурских солей. На края соляного диапира стратиграфическая полнота разреза возрастает, в оси диапира она минимальная. Закономерность эта предопределена особенностями предкунгурских тектонических процессов, определивших локальное срезание верхней части палеозойских отложений в зонах последующего появления соляных диапиров. Связи эти генетические и причинно-следственно взаимообусловлены. В основе этого явления процесс соляного магматизма и гидротермально-галоидной деятельности, которые были синхронны формированию герцинской складчатости в сопредельных областях Урала и кряжа Карпинского и в пределах Прикаспийской впадины были связаны с дегазацией мантийного астенолита, имевшей галоидную спецификацию. В результате начала орогенической фазы герцинского тектогенеза на сопредельных территориях (Урал, кряж Карпинского) море отступило и в пермское время территория представляла собой область размыва. В течение кунгурского века ранней перми, поздней перми и триаса произошли события глобальной разгрузки глубинных мантийных флюидов галоидной спецификации, приведшие к нарушению изостатического равновесия

земной коры, лавинной седиментации пермо-триасового времени с формированием специфических диапировых структур соляно-купольной тектоники.

О причинах отклонения соляных диапиров от идеальной цилиндрической формы

В соответствии с флюидодинамическим механизмом формирования морфология соляных диапиров должна в идеале отвечать цилиндрической форме, сформированной восходящей гидротермальной колонной пересыщенного галоидного раствора (рапы) и затем преобразованной в процессе отжатия воды и кристаллизации соли в вертикальный соляной шток. Последующие вторичные процессы пластического течения и перераспределения солей в процессе гравитационного выравнивания изостатических аномалий, а также слияния и разрастание площади куполов приводят к нарушению модельных связей и взаимоотношений (Рис.7, 8) в структуре соляных тел и вмещающих и перекрывающих их отложений. Подошвенные и кровельные карнизы объясняются пластовыми внедрениями и отжатием галоидных растворов и каменной соли в пласты-коллекторы по схеме естественного гидроразрыва с формированием пластовых силлов. Образованию подошвенных расширений (ниш и козырьков) на ножках диапиров способствует и эффект пластичного растекания солей от основания колонны под весом вышележащей соли и вследствие разности боковых давлений под диапиром и мульдой. Это физическое явление обусловлено как фактом текучести солей в геологическом масштабе времени (и их образом представления в виде заполненного жидкостью стакана с проницаемыми стенками), так и законом различной трансформации вертикального горного давления в боковое внутри солей и заполнения мульды. Выполним расчеты для определения объемных параметров диапиров и обоснования этих предположений.

Соляной диапир Западный Жолтай: радиус цилиндра $R = 10$ км; высота $h = 4,25$ км; объем цилиндрического тела $V = \pi R^2 h = 1\,335,2$ км³; видимый объем тела в пределах Еленовского участка работ ЗД (составляет $\frac{1}{4}$ часть) $v = \frac{1}{4}V = 333,8$ км³; плотность соли $\rho = 2,18$ г/см³; масса тела диапира $M = 2,9 \times 10^{15}$ тн; площадь диапира $S = \pi R^2 = 314\,159\,265$ м²; давление (вес) на единицу площади, создаваемое нагрузкой соли $P = F/S = 906$ МПа.

Величина вертикального горного давления под диапиром: $P_{гор} = \rho gh = 0,0218$ МН/м³ $\times 9,81$ м/с² $\times 4250$ м = 909 МПа[‡]. Величина бокового горного давления под диапиром: $P_{бок}^X (P_{бок}^Y) = P_{гор} \times \lambda = P_{гор} \times \mu/(1-\mu) = 909 \times 0,49/(1-0,49) = 873$ МПа. Величина вертикального горного давления под мульдой: $P_{гор} = \rho gh = 0,0234$ МН/м³ $\times 9,81$ м/с² $\times 4250$ м = 976 МПа. Величина бокового горного давления под мульдой: $P_{бок}^X (P_{бок}^Y) = P_{гор} \times \lambda = P_{гор} \times \mu/(1-\mu) = 976 \times 0,3/(1-0,3) = 418$ МПа.

Изотропное давление (среднее напряжение) на подошве соли: $P_c = 1/3 (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) = (909 + 873 + 873) = 885$ МПа; на подошве мульды: $P_m = 1/3 (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) = (976 + 418 + 418) = 604$ МПа. Среднее напряжение и величина бокового давления в соли практически совпадают.

Закон передачи вертикального горного давления в боковое внутри соли гидростатический $P_{гор}^Z = P_{бок}^X = P_{бок}^Y$ (коэффициент Пуассона $\mu = 0,49$), внутри мульды – литостатический $P_{гор}^Z \neq P_{бок}^X \neq P_{бок}^Y$ ($\mu = 0,3$). В соответствии с расчетами, приведенными к уровню подошвы соли, при близких величинах вертикального горного давления под диапиром (909 МПа) и под мульдой (976 МПа), боковое давление под диапиром (873 МПа) более чем в два раза превышает боковое давление под мульдой (418 МПа). Следствием такого распределения бокового давления является нарастающее с глубиной и достигающее максимальной величины на подошве соли увеличение бокового распора от стенки диапира, причем разность между боковым горным давлением под диапиром и под мульдой по абсолютной величине больше бокового давления под мульдой. Такое распределение давлений обеспечивает беспрепятственное проникновение соли в пласты, при этом максимальный расклинивающий эффект и подъемная сила достигается на подошве мульды, где за счет внедрения соли может происходить формирование пластовых жил - силлов, принимаемых за пластовую форму залегания солей. За счет слияния силлов при встречном движении соли от смежных диапиров в центре мульды, создается иллюзия пластового залегания соли.

Поскольку образование трещин гидроразрыва возможно уже при достижении условия $P_{пл} > P_{бок}$, где $P_{бок}$ – минимальное боковое горное давление, а в нашем случае это условие записывается

[‡] Рассчитанная по формуле величина вертикального горного давления под диапиром (909 МПа) идеально совпала с величиной, рассчитанной по геометрии диапира (906 МПа)

$P_{бок (с)} > P_{бок (м)}$, то очевидно, что на всей длине диапира по периметру контактной зоны происходит гидроразрыв пород с оттоком флюидов в пласты межкупольного пространства. Формируется оболочка кристаллической соли, препятствующая на поздних этапах оттоку и рассеиванию остаточных флюидов (рапы) и сверхгидростатических пластовых давлений из центральных частей диапиров. Следствием оттока соли из центральной части и «усадки» диапира за счет формирования пластовых силлов является формирование наддиапировых грабен-структур вторичного обрушения покровного чехла.

Скорость и время формирования диапиров

Расчеты скорости подъема соляного диапира на масштабных моделях, выполненные Х.Рамбергом [5] указывают на то, что естественной структуре для поднятия диапира на высоту 2000 м от соляного слоя (кровли соли) требуется около 10^6 (один миллион) лет. Это означает среднюю скорость роста 2 мм/год (у автора скорость занижена в 10 раз, указана цифра 0,2 мм/год; с.305).

Для диапировых структур Еленовской площади с амплитудой 4 км, при расчетной средней скорости роста 2 мм/год, время их роста исчисляется 2 млн.лет (в геологическом исчислении этот временной интервал не выходит за рамки позднеплиоцен-четвертичного (акчагыльского) времени). Подобные экстраполяции маловероятны, процесс получается слишком растянутым, имея в виду, что скорости деформаций при активизации тектонических движений, увеличиваются на порядки (по данным [7] при оживлении разломов вертикальная проницаемость разреза увеличивается на три порядка), соответственно и расчетное время и скорость роста диапира может уменьшиться в разы (до 10^3 лет и до 2 м/год).

По расчетам Е.В.Артюшкова [2] время восстановления нарушений изостазии заведомо меньше характерного времени развития тектонических процессов в крупных областях, которое составляет 10^7 лет и, следовательно, за исключением районов, где изостатическое равновесие было нарушено недавно, литосфера повсеместно должна находиться в состоянии, близком к изостазии. Характерное время установления изостатического равновесия для платформенных областей с характерными для структурных элементов 2-го порядка размерами блоков земной коры 100-300 км – порядка тысячи или нескольких тысяч лет. Для тектонически активных областей (Альпийский складчатый пояс) с характерными для структурных элементов 2^{го} порядка размерами блоков земной коры 50-100 км, это время не превышает десятков или сотен лет. Эти цифры говорят о том, что формирование соляных диапиров и изостатическое выравнивание, вызванной этим процессом инверсии плотности в земной коре имеют очень высокие скорости и они многократно выше расчетов, выполненных Х.Рамбергом [5] на масштабных моделях.

Начало формирования соляных диапиров мы увязываем с возрастом самых древних отложений над первым стратиграфическим (угловым) несогласием, сохранившихся в междиапировых мульдах и отсутствующих в подошве солей под сводами диапиров. Этапам роста диапиров отвечают перерывы осадконакопления и связанные с ними временные интервалы, запечатленные отсутствием отложений в междиапировых мульдах и на сводах диапиров. Индикатором завершения активного роста соляных диапиров служит возраст самых молодых отложений, прорываемых в апикальной части купола, и/или вовлеченных в структуры вторичного обрушения надсводовых грабен-прогибов над растущими куполами. В соответствии с этим начало формирования соляных диапиров (пластовых силлов) на Еленовской площади можно связывать с концом ранней перми (предкунгурский разрыв). Процесс роста диапиров активизировался в конце индского времени раннего триаса. Основному этапу роста диапиров отвечает период поздне триас-раннеюрского времени (позднерцинская фаза тектогенеза). В мезо-кайнозойское время интенсивность роста диапиров на Еленовской площади заметно снизилась, площадь денудации сократилась до контуров сводов диапиров. Максимально высоко соль проникает на Еленовской площади достоверно до меловых и предположительно до палеогеновых отложений, структуры обрушения (грабен-прогибы плиоценового возраста) подступают под четвертичный покров. Связывая перерывы осадконакопления с этапами тектонической перестройки территории и с ростом соляных диапиров, можно допускать, что со временем формирования последнего стратиграфического несогласия, связанного с альпийской фазой тектогенеза (миоцен-плиоцен) происходил окончательный рост и формирование (переформирование) диапиров Еленовской площади.

Важным и обескураживающим на первый взгляд может оказаться вывод о том, что соляные диапиры Еленовской площади (представляется, что это универсальный закон) не связаны с перераспределением первично пластовых кунгурских солей и, что кунгурских пластовых солей, как седиментационных единиц не было как таковых, а они являются пластовыми силлами (как и триасовые магматические траппы Восточной Сибири) позднетриас-раннеюрского внутрипластового внедрения при активной вертикальной разгрузке глубинных галоидных рассолов на завершающем этапе герцинского тектогенеза. Для окончательной ревизии традиционных взглядов на генезис соляных диапиров необходимы дополнительные исследования на материалах Астраханского свода и других солеродных бассейнов мира.

ЛИТЕРАТУРА

1. Артемьев М.Е. Изостатические аномалии силы тяжести и некоторые вопросы их геологического истолкования. М., Наука, 1966, 137с.
2. Артюшков Е.В. Геодинамика. М., Недра, 1979, 327с.
3. Белоусов В.В. Некоторые вопросы глубинной тектоники. – Вестник Московского Университета. Серия геологическая, 1960, № 5, с.3-12.
4. Гончаров М.А. Инверсия плотности в земной коре и складкообразование. М., Недра, 1979, 246 с.
5. Рамберг Х. Сила тяжести и деформации в земной коре. М., Недра, 1985, 399 с.
6. Сычева-Михайлова А.М. Механизм тектонических процессов в обстановке инверсии плотности горных пород. М., Недра, 1973, 136 с.
7. Файф У., Прайс Н., Томпсон А. Флюиды в земной коре. М., Мир, 1981, 435 с.
8. Федоров д.Л., Кулаков С.И. Геологические особенности формирования гигантских месторождений нефти и газа Прикаспия и Северного Каспия. - Сборник материалов Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы прогнозирования, поисков, разведки и добычи нефти и газа в России и странах СНГ. Геология, экология, экономика». СПб., Недра, 2006, с.117-127.
9. Хаин В.Е., Н.А.Богданов, В.И.Попков и др. Тектоника дна Каспийского моря. Геология регионов Каспийского и Аральского морей. Алматы: КазГЕО, 2004, с.58-78.
10. Хаин В.Е., Ломизе М.Г. Геотектоника с основами геодинамики. М., КДУ, 2005, 560 с.
11. Шрейдер Л.А., Байдюк Б.В., Павлова Н.Н. деформационные свойства горных пород при высоких давлениях и температурах. М., Недра, 1968, 358 с.

Опубликовано: *Геофизика*, №6, 2007, с.16-29.

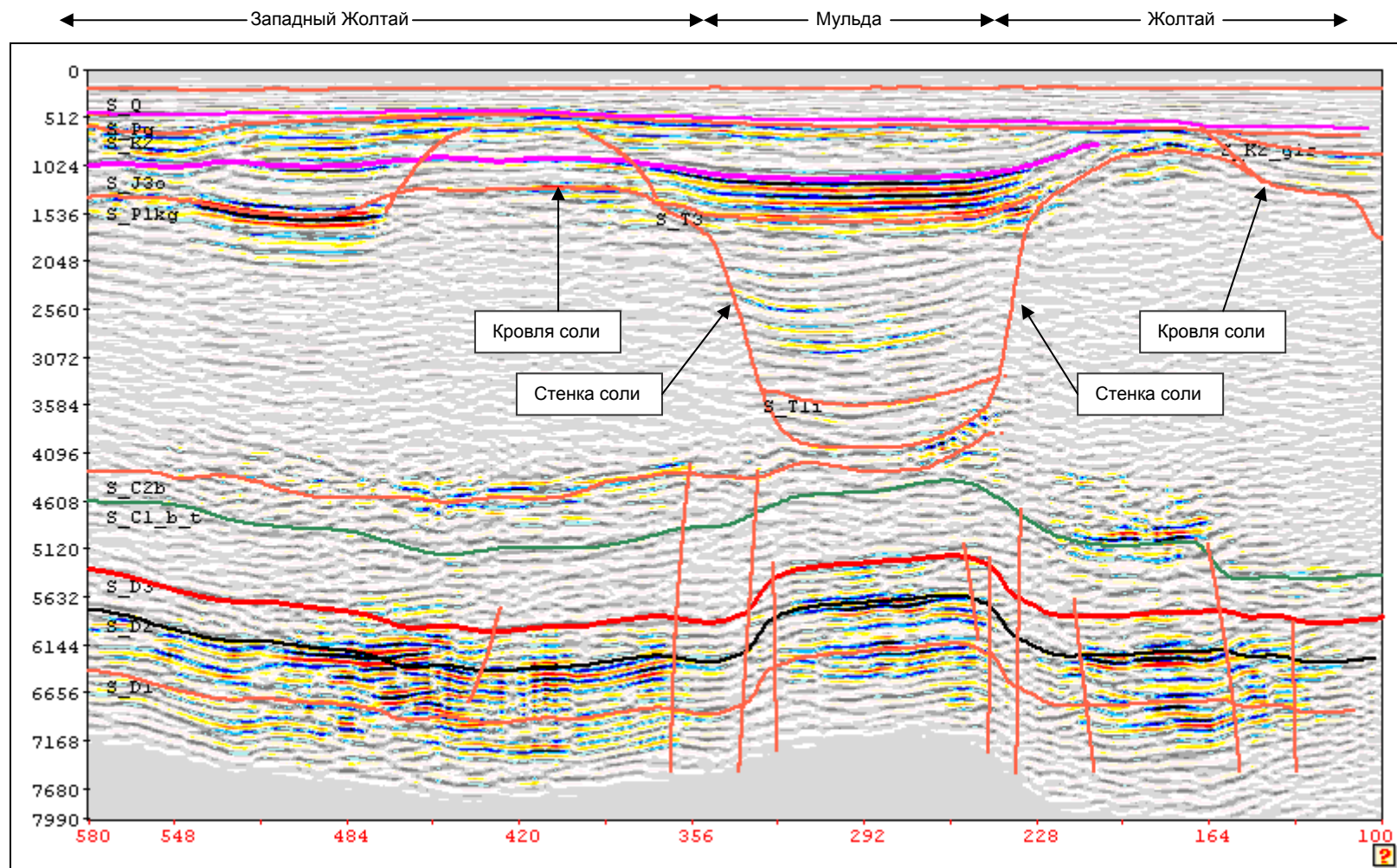


Рис.1. Произвольное сечение (СЗ-ЮВ) через соляные диапиры Западный Жолтай и Жолтай и разделяющую их мульду, Еленовская площадь.

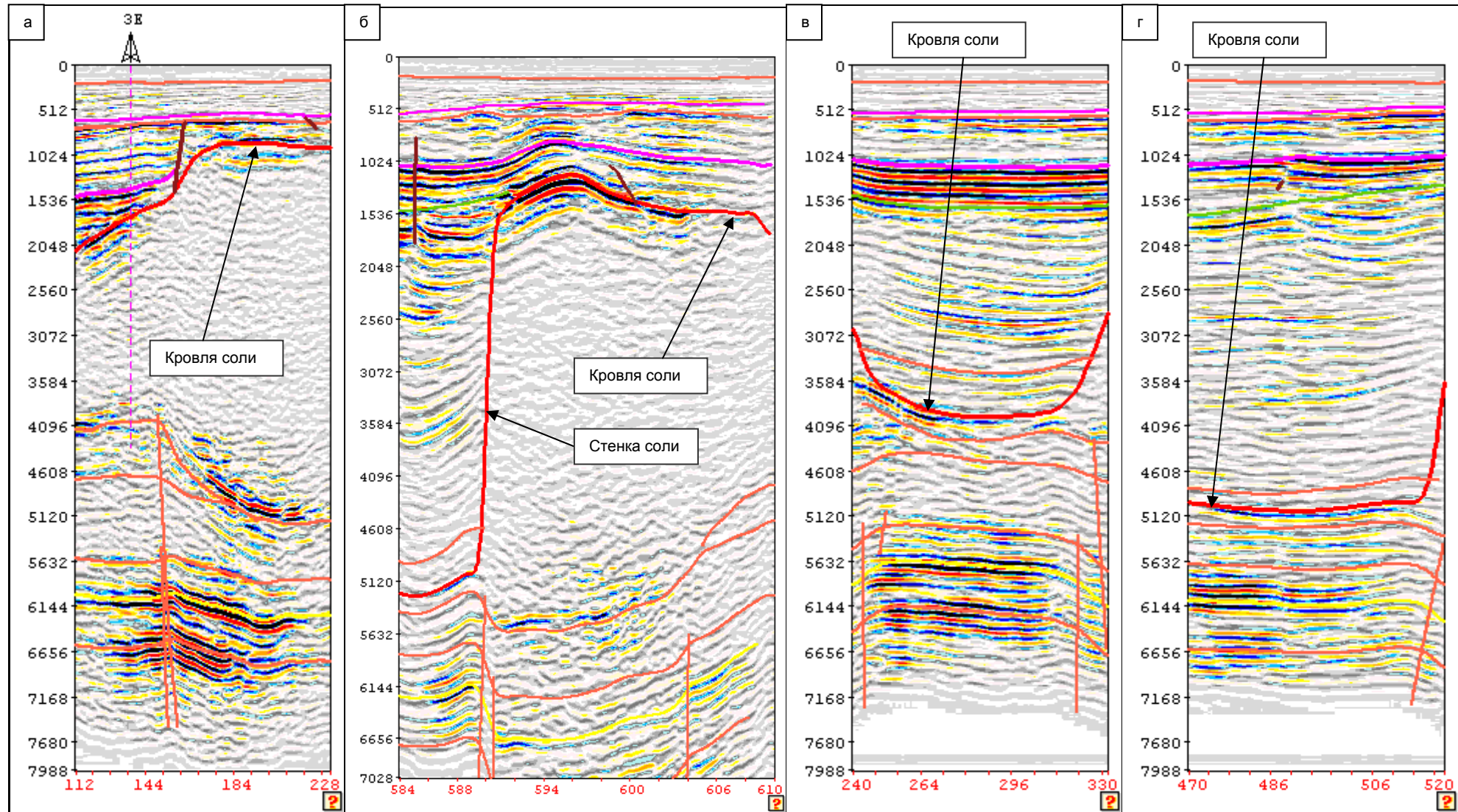


Рис.2. Произвольные сечения через соляной диапир Жолтай (а, б) и межкупольную мульду (в, г). Примеры демонстрируют: срезание пород на контактах с солью (б, в, г); отсутствие конседиментационного изменения мощностей в мульдах (б, в, г); полный разрез подсолевых каменноугольных отложений под мульдами (в, г) и разрушение их кровельной части под диапирами (а, б).

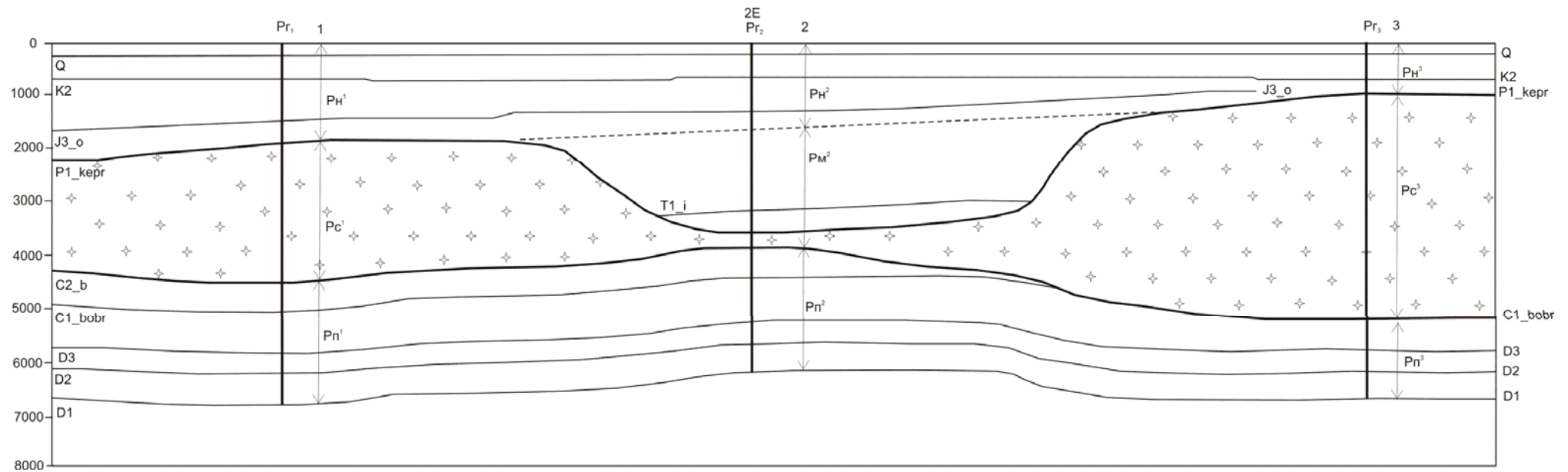


Рис.3. Модельный профиль (Inline=226), использованный для расчета изостатической компенсации соляных диапиров внутренними структурно-формационными неоднородностями верхней части земной коры (междиапировыми компенсационными мульдами)

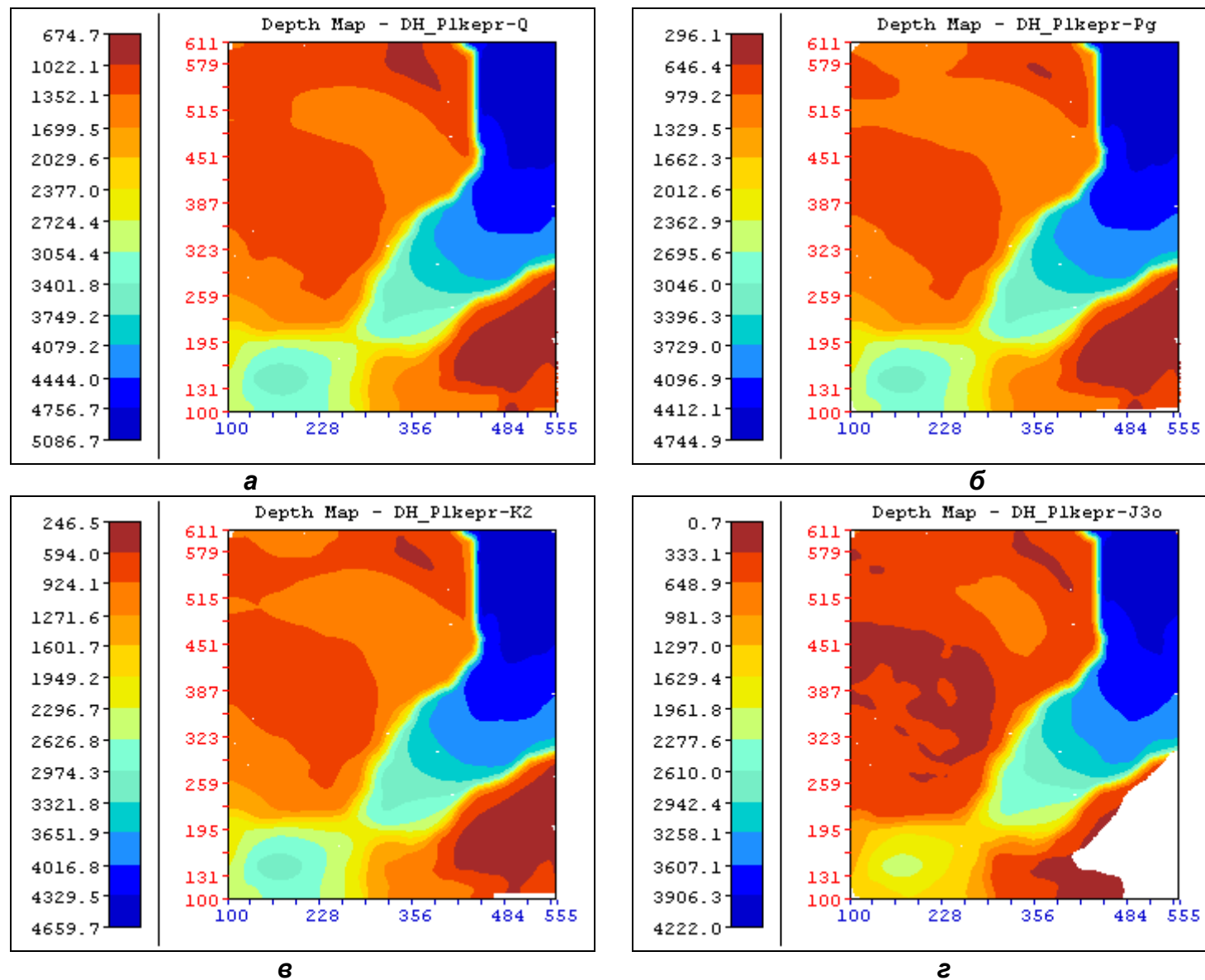


Рис.4. Карты мощностей толщ, залегающих выше кровли кунгурской соли (толща заполнения межсолевых мульд).
Примеры компенсированного распределения толщи заполнения мульд (изостатическая компенсация).

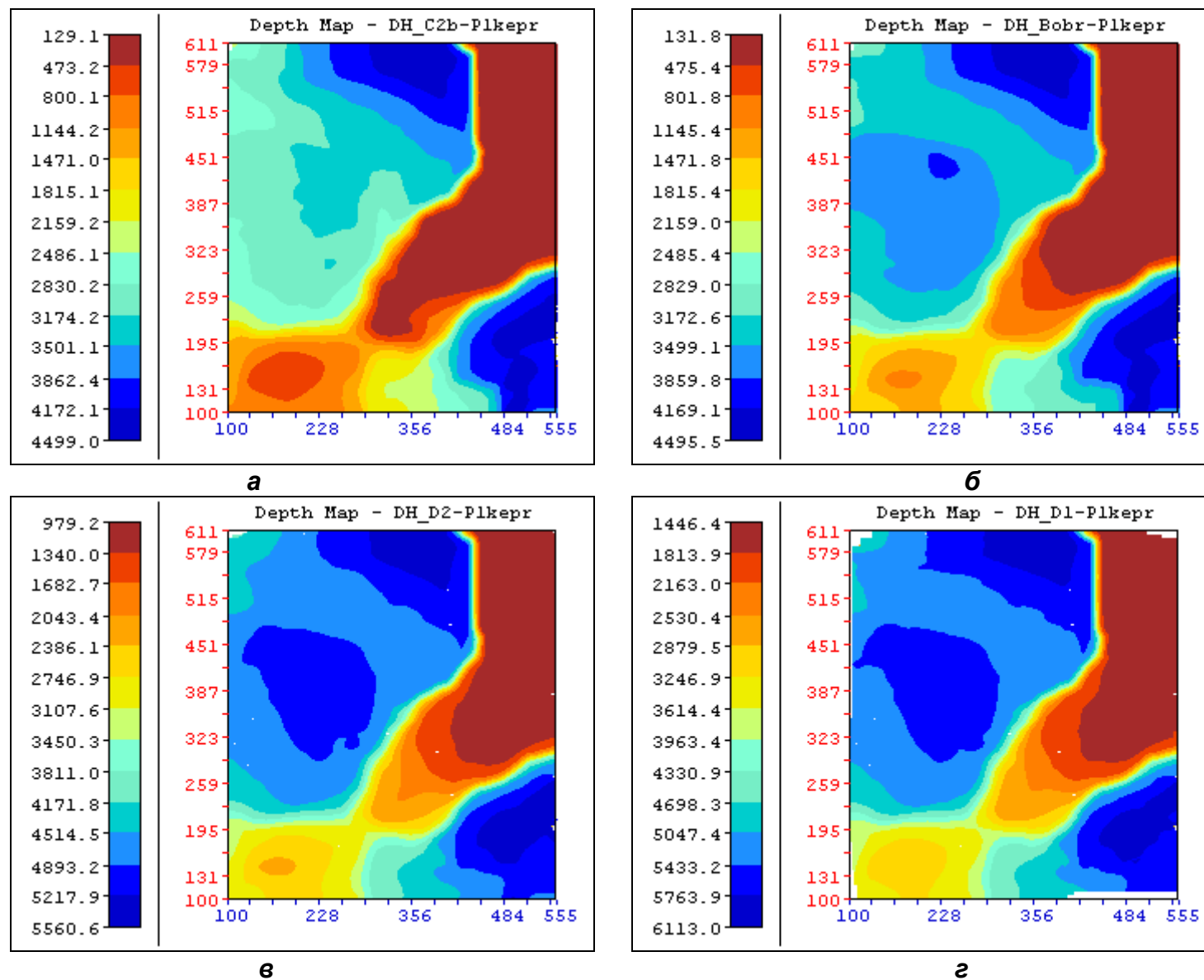


Рис.5. Карты мощностей толщ, залегающих ниже кровли кунгурской соли (солевые и подсолевые мощности).
Пример компенсированного распределения толщи солей (изостатическая компенсация).

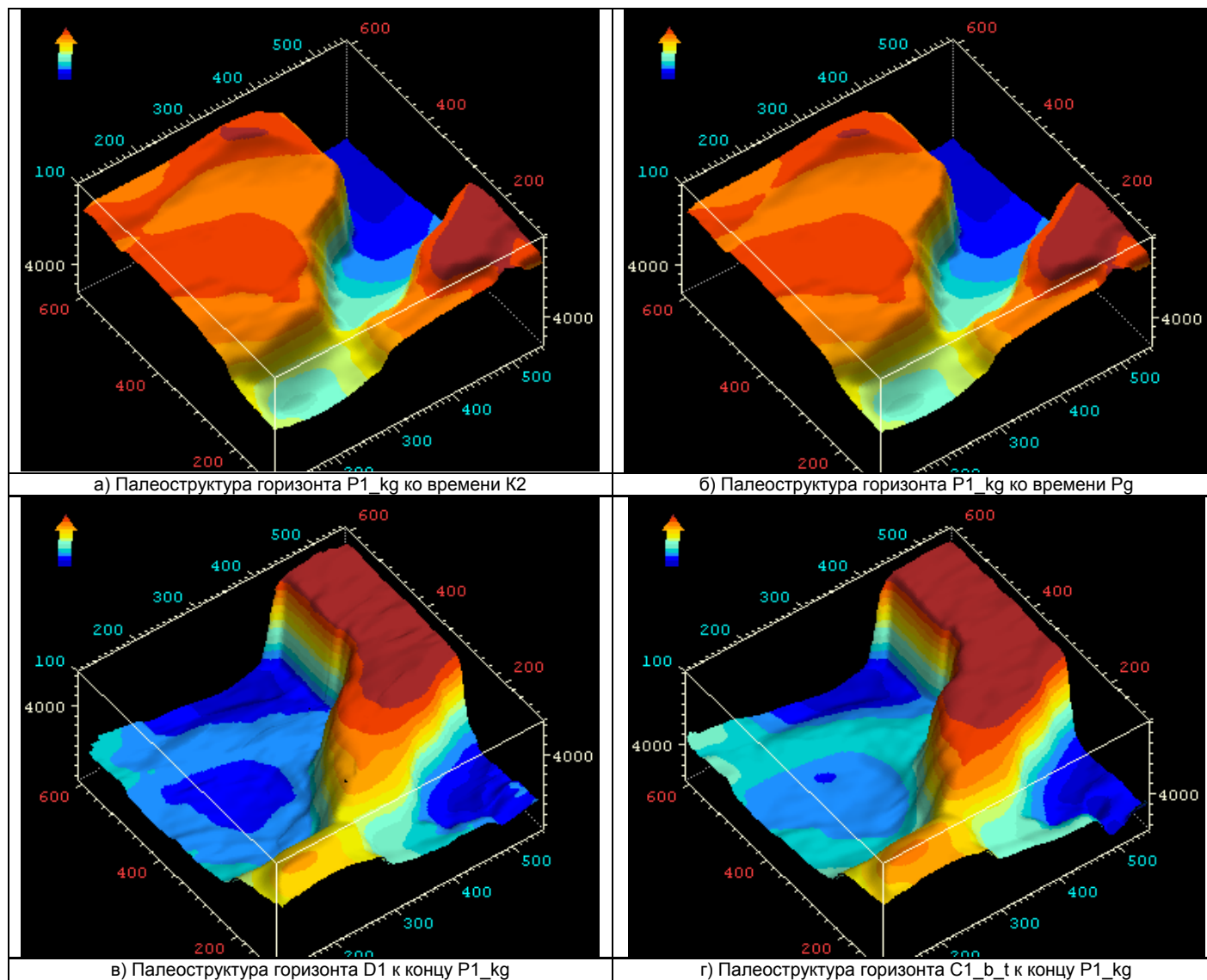
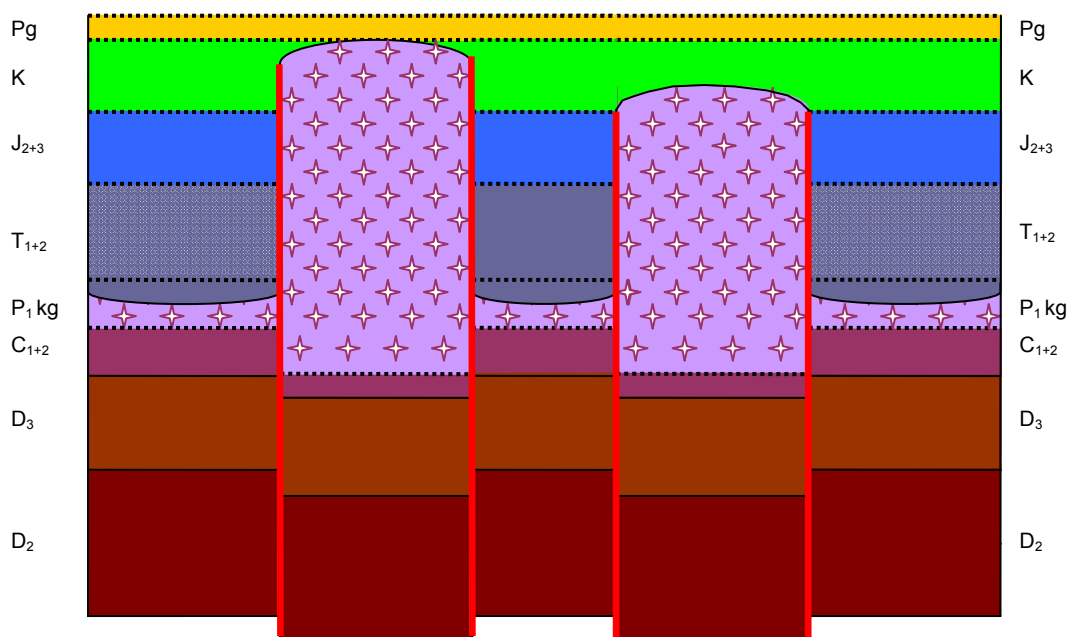
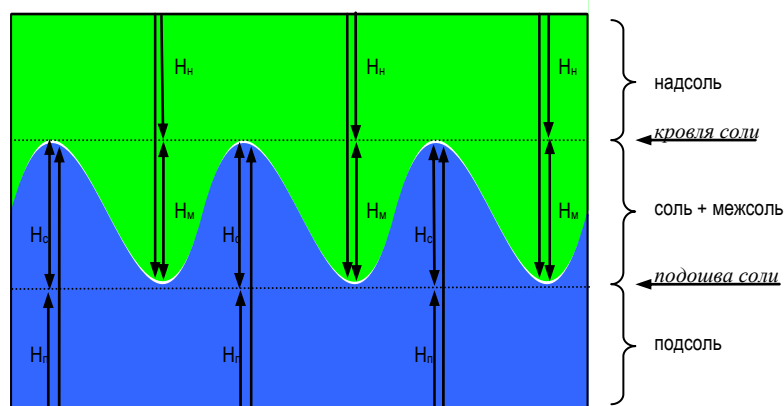


Рис.6. Стереометрия внутренних соотношений соляных диапиров и межкупольных мульд для палеоструктуры надсолевых (а, б) и подсолевых (в, г) горизонтов

А



Б



H_c – мощность соляной толщи,
 H_m – мощность межкупольной мульды,
 H_n – мощность надсолевой толщи,
 H_p – мощность подсолевой толщи,
 Kp_c – кровля соли,

$$Kp_c = H_n + H_m; Kp_c = H_n + H_c; H_c = H_m;$$

Рис.7. Модельное представление структурно-морфологических связей между диапировыми куполами и межкупольными мульдами, подсолевым и надсолевыми комплексами. А - модельный профиль через соляные диапиры и межкупольные мульды. Б - характер внутреннего соотношения надсолевого и подсолевого комплексов

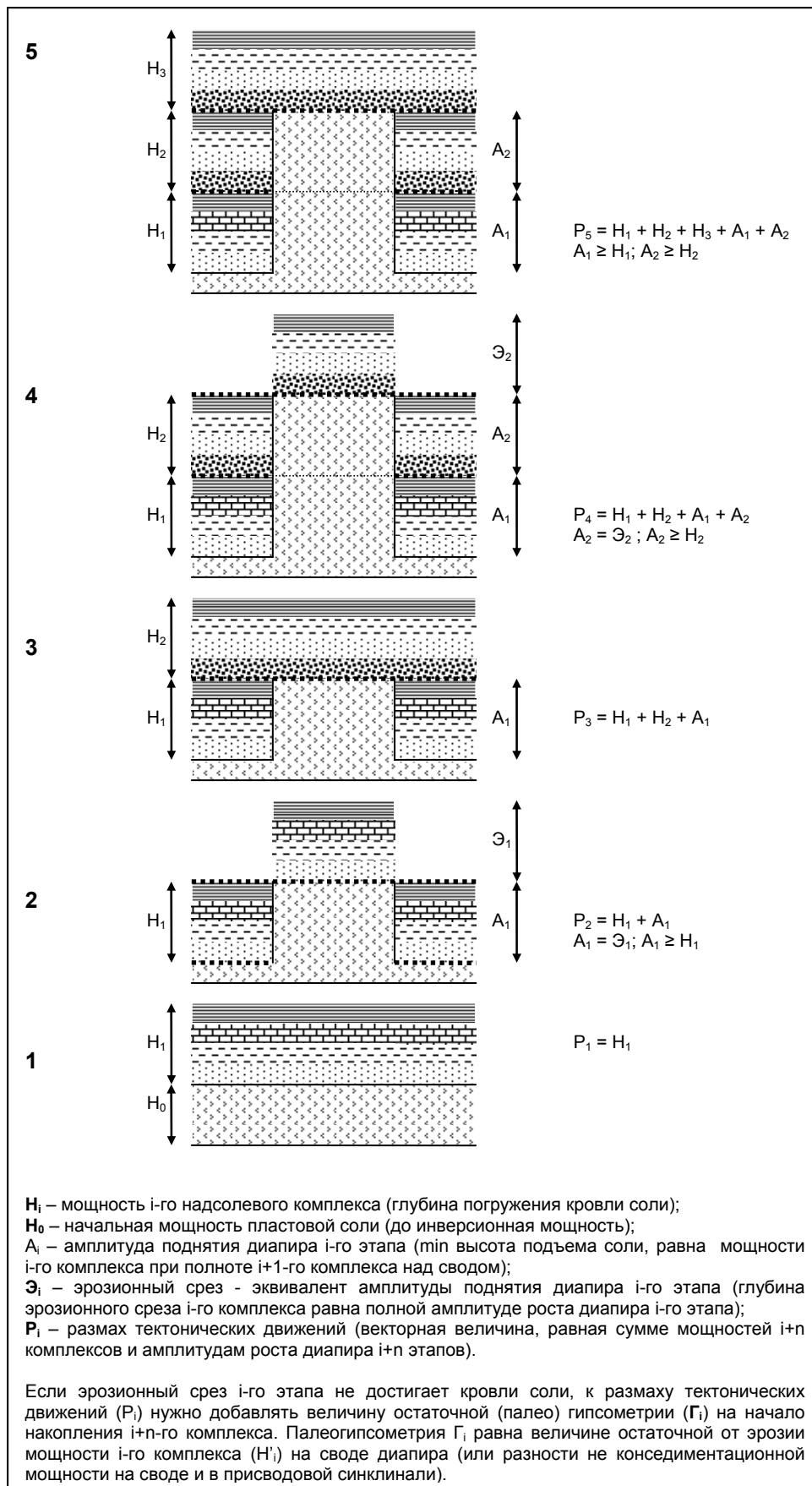


Рис.8. Моделирование во временной последовательности (1-5) роста соляного диапира по схеме многоактного инъекционного процесса. Принято допущение пластового залегания первичной соли