

ТИПИЗАЦИЯ ОСНОВНЫХ МЕХАНИЗМОВ СОЛЯНОЙ ТЕКТОНИКИ МИРА: ВЕРХНЕКАМСКОЕ МЕСТОРОЖДЕНИЕ КАК ЭТАЛОН МНОГОЭТАПНОГО ГРАВИТАЦИОННОГО СКОЛЬЖЕНИЯ*



И.И. Чайковский,
Горный институт УрО РАН

Приведен обзор и типизация основных типов соляных структур, которые связываются с проявлением шести механизмов: 1) гравитационная адвекция (солянокупольная тектоника, галокинез Трусгейма, активный диапиризм Джексона); 2) гравитационная адвекция, спровоцированная поперечным изгибом и растяжением надсолевых толщ (солянокупольная тектоника, связанная с блоковыми подвижками в фундаменте, реактивный диапиризм Джексона); 3) продольное сжатие (диапиризм Мразека, компрессионная соляная тектоника); 4) послыйный сдвиг со складчатостью срыва (тектоника срыва юрского типа); 5) гравитационное течение и скольжение (тектоника гравитационного скольжения); 6) растворение солей (тектоника деградации соляных структур).

Сопоставление механизмов основных тектонических событий, проявленных на Верхнекамском месторождении, с выделенными тектонотипами позволяет говорить о том, что в конце березниковского времени произошло сползание соляной залежи к центру Соликамской впадины подобно иранским соляным ледникам, в шешминское время – формирование конседиментационных сбросо-сдвигов Дуринского и Боровицкого прогибов, а в предплиоценовое – соскальзывание надсолевой толщи по кровле соляного зеркала аналогично тектонике срыва юрского типа. Однако во всех случаях основным механизмом являлось гравитационное скольжение, которое во времени смещалось от подошвы соляной залежи к ее кровле.

Ключевые слова: диапиризм, тектоника срыва, гравитационное течение, деградации соляных структур, Верхнекамское месторождение.

Несмотря на тот факт, что каменная дочную скальную породу, она нередко соль в природе представляет собой ослабляет дискордантные по отношению к

* Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 10-05-96003-р_урал_а.

вмещающей раме тела со сложным складчатым внутренним строением, свидетельствующем о ее движении в пластичном состоянии. В качестве причин такого течения приводили либо проявление определенных внешних сил, либо особые свойства самой соли. Изучение и анализ истории исследования соляных структур позволили выделить и проследить эволюцию шести основных гипотез.

Первая концепция – концепция солянокупольной тектоники (она же «галокинез» Трусгейма или «активный диапиризм» Джексона), согласно которой основной причиной движения соляных масс является гравитационная адвекция. С. Аррениус (1912) был первым, кто предположил, что основной причиной формирования куполов является сила тяжести, которая обеспечивает изостатический подъем солей, характеризующихся пониженной плотностью. Совместно с Лахманном он связал высокую подвижность («автопластичность») солей с дегидратацией сульфатов и хлоридов калия при термометаморфизме. Лахманн (1912) полагал, что для проявления гравитационных сил нужны благоприятные предпосылки, в частности эрозионные врезы и тектонические нарушения со смещением слоев. Дальнейшее развитие гравитационная гипотеза получила в США, при изучении месторождений Техаса и Луизианы, где к началу сороковых годов было известно около 140 соляных куполов (рис. 1). Дональд К. Бартон [Barton, 1933] полагал, что энергия, необходимая для подъема соли, связана с нагрузкой вышеле-

жащих более тяжелых пород и в меньшей мере – с тангенциальным сжатием. Течение, вызванное пластичностью солей, начинается после превышения некоторого критического предела, зависящего от характера соленосных слоев, температуры, давления и влажности.

Л.Л. Неттлтон [Nettleton, 1934], американский геофизик, работавший в Мексиканском заливе, первым сравнил поведение соли и вышележащих пород в течение геологического времени как высоковязких жидкостей и первым провел физическое моделирование процесса образования соляных куполов, используя кукурузный сироп и менее плотную нефть для визуализации диапира. Он показал, что ведущую роль в всплывании соляных куполов играет гравитационная неустойчивость (открытая в 1900 г. и известная в настоящее время как неустойчивость Рэлея-Тейлора), обусловленная разностью плотностей: неизменностью плотности соли с глубиной, в то время как плотность окружающих осадков увеличивается. Неттлтон полагал, что разница в плотности создает силу достаточную, чтобы вызвать течение соли. Ритц [Ritz, 1936] показал, что соляные купола окружены кольцевой синклиналью округлой формы (rim syncline), которая образуется в результате оттока соли от подошвы диапира при его подъеме. Позднее, в Германии [Behrman, 1949] и Соединенных штатах [Nevin, Merrick, 1949], было показано, что над соляным куполом формируются концентрические и радиальные сбросы (рис. 2). В экспериментальной модели



Рис. 1. Соляные диапиры в Луизиане (Avery Island, Weeks Island) и последовательность (A–D) формирования соляного купола по Бартону (1933)

[Carrie, 1956] было показано, что формирующаяся система нормальных сбросов состоит из субпараллельных разрывов аналогичного или противоположного падения, придающих грабену ступенчатое строение. Обычно они ориентированы параллельно длинной оси купола.

Разработка калийных солей в Германии и изучение внутреннего строения месторождений показали, что в основании соляных куполов осевые плоскости складок наклонены вниз по склону, отражая трение с породами кровли, а в сводовой части купола – субвертикально, что говорит о проявлении продольного сжатия (рис. 3). Субвертикальное течение солей по сужающе-

муся каналу обусловило формирование простых и изоклиальных колчановидных складок, характерных для высокометаморфизованных пород (рис. 4). В плане эти купола (рис. 5) имеют сложную структуру, схожую со складками платка, пропущенного через кольцо [Kupfer, 1968].

Для обозначения процессов, связанных с автономным перемещением соли под влиянием силы тяжести, Ф. Грусхейм (1957, 1960) ввел термин «галокинез». Он показал активную структурообразующую роль соли и проследил зависимость типов соляных структур от глубины их залегания (рис. 6). Схожий механизм был предложен Хана [Hanna, 1959] для реконструкции

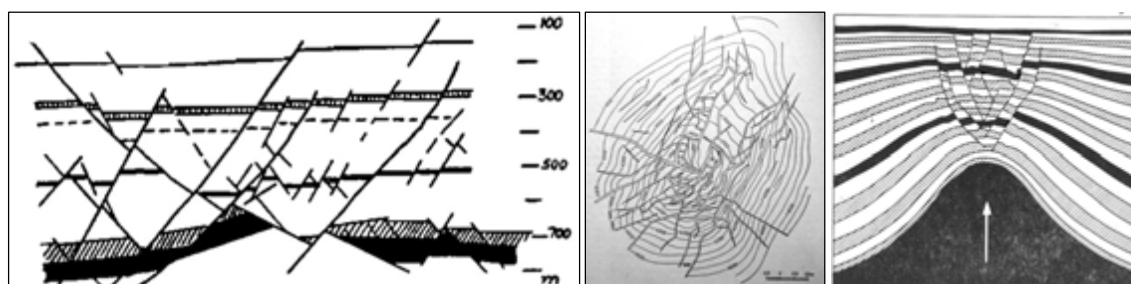


Рис. 2. Концентрические сбросы и радиальные разломы над кровлей диапира: купол Рейтбрук, Германия (Behrman, 1949); купол Хавкинс, Мексиканский залив (по Г.Е. Муррей, 1959); экспериментальная модель (Carrie, 1956)

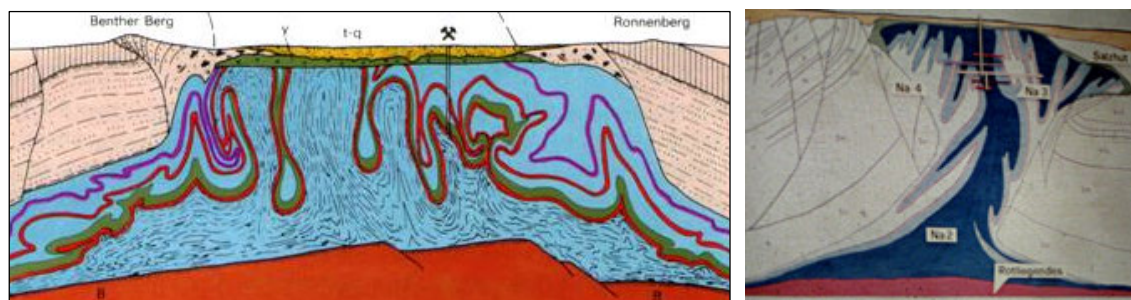


Рис. 3. Строение куполов Бенгле (Richter-Bernburg, 1953) и Ватлинген



Рис. 4. Складчатость пластического течения в центральной части диапира Салина Турда (Румыния), обусловленная движением по сужающемуся каналу (слева – фото кровли, в центре и справа – стен)

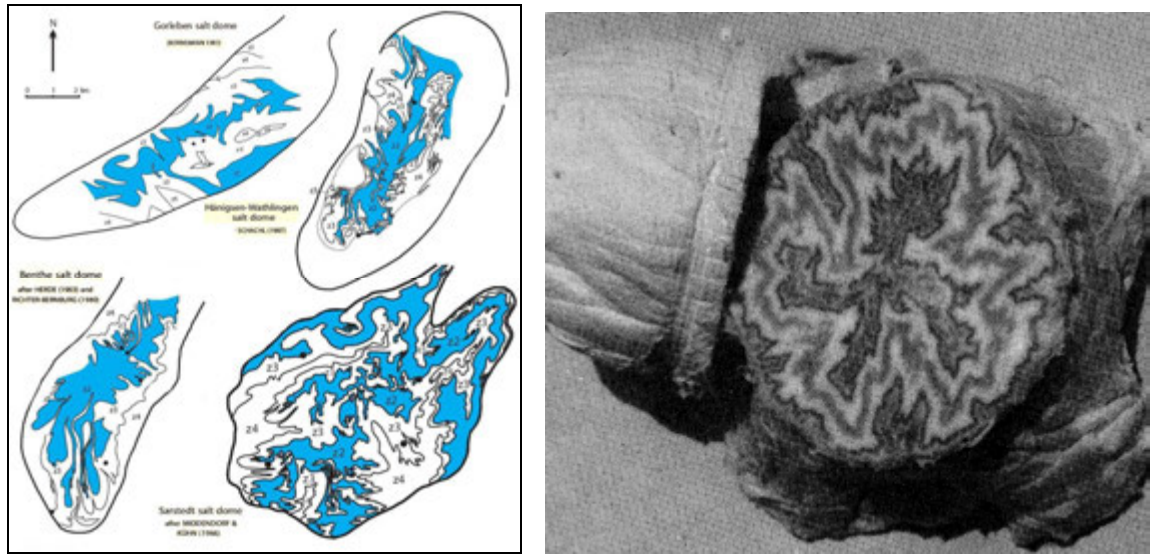


Рис. 5. Поперечное сечение соляных куполов Германии (слева) и в экспериментальной модели (Kipfer, 1968), напоминающее складки платка, пропущенного через кольцо

предполагаемой эволюции формирования куполов в Мексиканском заливе (рис. 7).

Шведский геолог Кристофер Дж. Талбот и американец М.П.А. Джексон (1987) с помощью физической модели надлежащего масштаба, использовав глину и силиконовую замазку, помещенные в центрифугу для моделирования реальных процессов, проследили эволюцию морфологии соляных структур в процессе их подъема и выделили 4 стадии (рис. 8). Было установлено, что форма образовавшегося пузыря зависит главным образом от отношения вязкостей соли и покрова. Если покров более пластичный, чем соль, диапир легко продвигается через него, при этом возникает только слабая внут-

ренняя циркуляция и диапир принимает форму большого пальца с небольшим пузырьком. Если покров плотный и слабо поддающийся деформации, поднимающаяся соль вовлекается в интенсивное тороидальное движение, благодаря которому поддерживается пузырь шарообразной формы. Когда покров и соль имеют приблизительно одинаковую вязкость, также устанавливается тороидальная циркуляция, но при этом в движение вовлечены оба слоя. Опускающийся покров давит на периферию диапира, соль поднимается здесь медленнее, чем ядро, и диапир принимает грибообразную форму. Первые грибообразные диапиры были встречены в США (Хай Айленд, Техас) и Европе, но

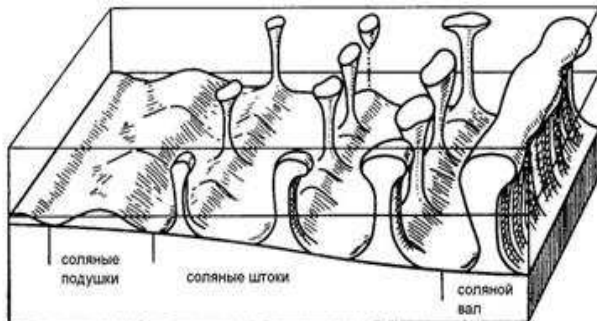


Рис. 6. Изменение морфологии соляных структур (подушки, штоки, валы) в зависимости от мощности надсолевых толщ (Трусхейм, 1957)

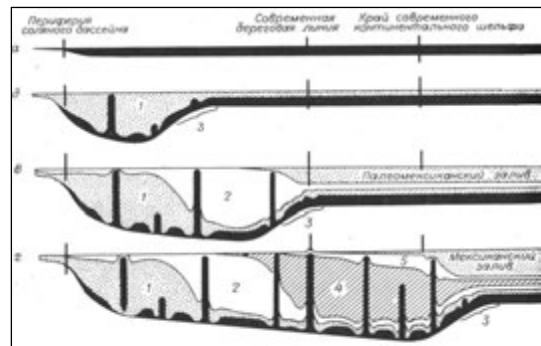


Рис. 7. Предполагаемая миграция формирующихся соляных куполов во времени в процессе отложения осадков на континентальном склоне Мексиканского залива (Hanna, 1959)

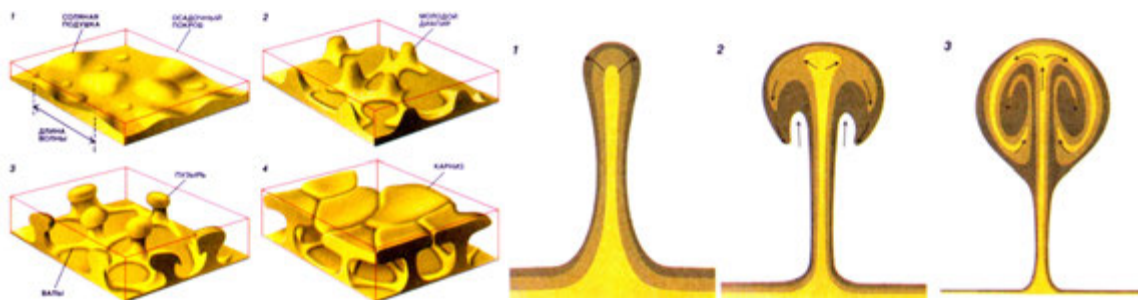


Рис. 8. Эволюция морфологии соляных структур (соляные подушки – молодые диапиры – пузыри – карнизы) слева и справа – зависимость формы диапира от отношения вязкостей соли и покрова (1 – более пластичен покров, 2 – вязкость одинакова, 3 – более пластична соль)

наиболее обнаженными и изученными являются диапиры Большой соляной пустыни Кавир в Центральном Иране (рис. 9).

Вторая концепция, о ведущей роли блоковых подвижек в фундаменте платформ при формировании соляных структур, была выдвинута в 50-х годах, в противовес концепции гравитационной адвекции. Согласно этим представлениям [Авров, 1950; Айзенштадт, 1958; Китык, 1963; Конищев, 1970], при относительном перемещении блоков фундамента происходит разрыв надсоляной толщи и последующий подъем соляных масс. В настоящее время подвижки в фундаменте связываются главным образом с рифтогенным растяжением, сопровождающимся прогибанием земной коры. Для Днепровско-Донецкой впадины приуроченность соляных структур, вытянутых вдоль глубинных разломов, была показана еще в 1958 г. [Косыгин, Бланк, 1958], в дальнейшем подтвердилась детальными геофизическими работами М.В. Чирвинской (1966,

1980) и другими исследованиями (рис. 10, 11). Образование куполов-гигантов Прикаспийской впадины (Челкарского, Индерского, Чингизского и др.) также связывалось со значительными (ступенчатыми) неровностями в подсолевом ложе [Неволин, 1961]. Одним из главных аргументов о влиянии разломов на подъем и локализацию солей является линейная в плане форма тел.

Наибольший масштаб проявления линейных соляных структур характерен для Центрально-Европейского бассейна. Многочисленными работами было показано, что основная часть соляных подушек и, в меньшей мере, диапиров ориентирована параллельно бортам бассейна. Однако наибольшая часть диапиров ориентирована субмеридионально параллельно бортам более глубоких грабенов (рифтов), осложняющих структуру Центрально-Европейского бассейна (рис. 12). Выяснение взаимосвязи между разломами и соляными структурами, а также экс-

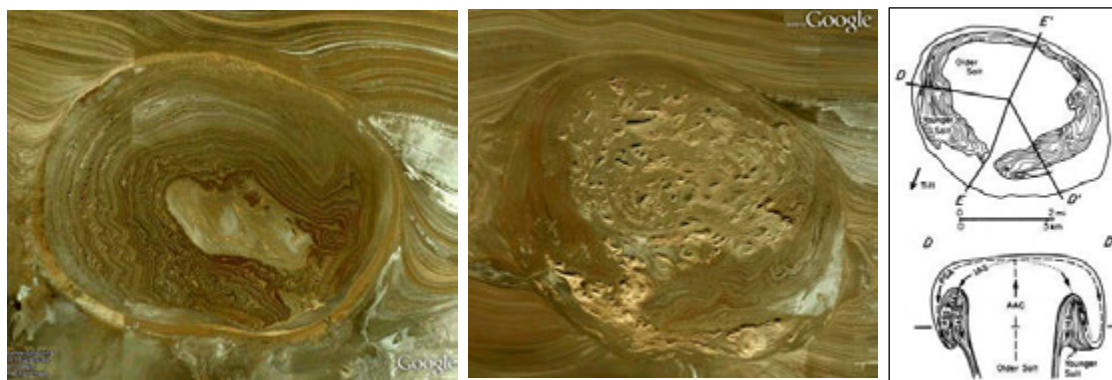


Рис. 9. Вид из космоса на соляные купола пустыни Кавир и результаты структурной интерпретации одного из них (Jackson et al., 1990)

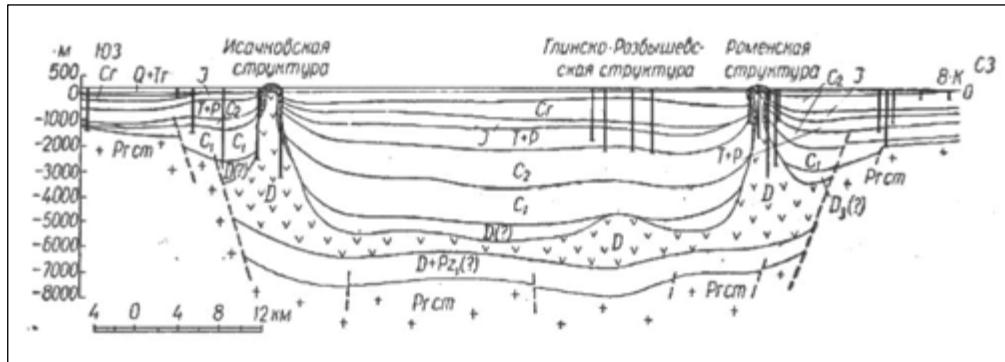


Рис. 10. Приуроченность Исачковского и Роменского соляных куполов к уступам фундамента в Днепровско-Донецком авлакогене (по мат. Ф.О. Лысенко, 1932, и др.)

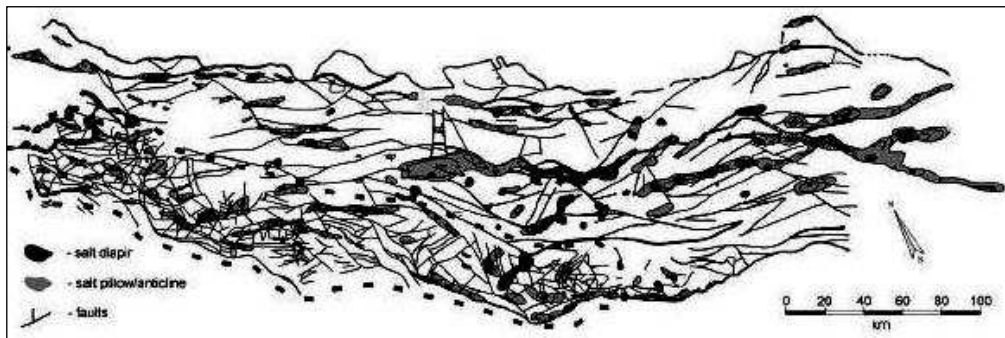


Рис. 11. Пространственная взаимосвязь соляных диапиров и подушек с разломами в Днепровско-Донецком авлакогене (Stovba, Stephenson, 2003)

периментальное моделирование позволили предложить несколько моделей (рис. 13, 14). По одной из них, в частности «реактивного диапиризма» [Vendeville, Jackson, 1992], соль всплывает за счет раздвига надсолевых толщ. По другой модели [Stewart, 2007], пространственная взаимосвязь надсолевых и подсолевых нарушений ослабевает с увеличением мощности соляной толщи.

Третья концепция объясняет образование соляных структур в складчатых поясах, где пространственное перемещение солей происходит только за счет их высокой пластичности. Впервые такие структуры – складки с проткнутым ядром – выделены румынским геологом Л. Мразеком [Mrazec, 1905], изучавшим нефтеносные антиклинали Карпат, и названы диапирами (от греч. *diapirein* – протыкать). Термин предложен для характеристики структур, образующихся в результате регионального (продольного) сжатия, связанного с течением твердых пластичных пород, таких как соли, гипс и глина (рис. 15).

Диапировые складки не имеют правильной формы и резко меняют свою форму в различных сечениях (пластообразная, эллиптическая, округлая).

Ганс Штилле [Stille, 1917; 1926] вместе с многими немецкими геологами [Зейдль, 1913; Рине, 1920; Шух, 1922; Вольдштедт, 1927; Ромейнс, 1933] на примере отложений немецкого цехштейна связали формирование соляных диапиров с боковой нагрузкой саксонских горообразовательных движений. Это аргументировалось пространственной согласованностью глыбовых деформаций в подсолевом ложе и пластичных – в солевой и надсолевой толщах. Он определил три основных типа геометрии складок над пермской цехштейновой солью и отвел соли пассивную структурообразующую роль (рис. 16). Штилле предложил называть такую складчатость эжективной (*style ejectif*), для которой узкие и крутые антиклинали разделены пологими и широкими синклиналями, а дежективной (*stille dejectif*) – противоположный случай, когда широкие

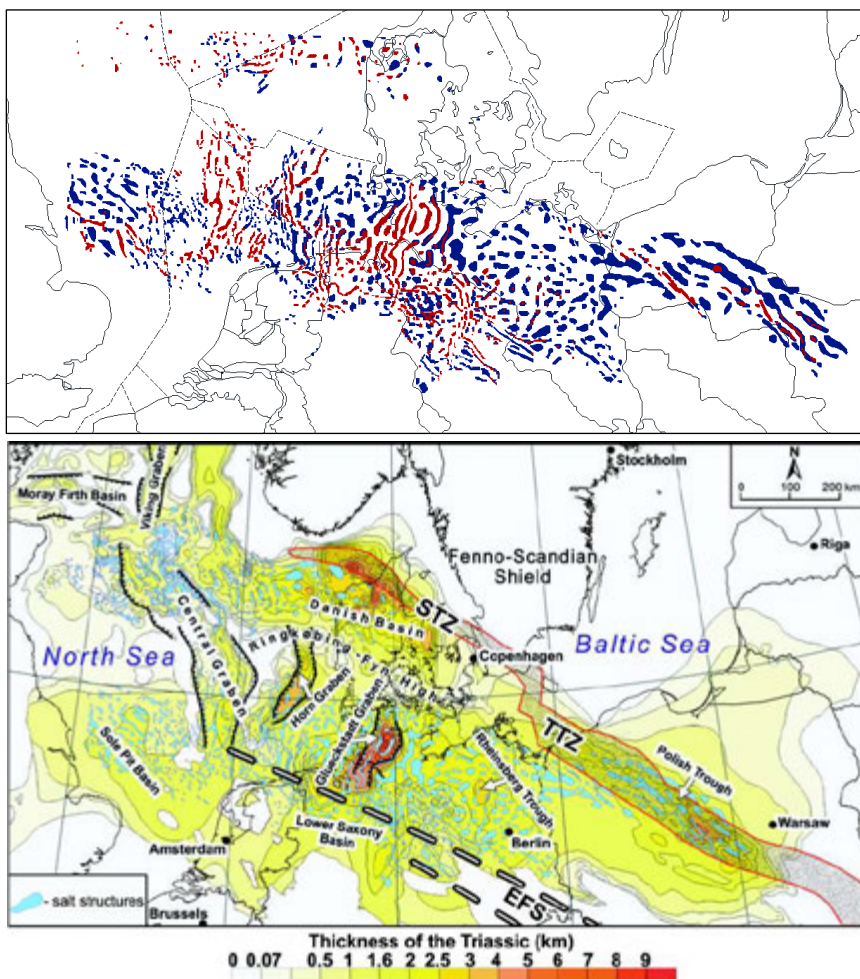


Рис. 12. Солевые структуры Центрально-Европейского бассейна (синие – подушки, красные – диапиры) (Lokhorst et al., 1998), внизу тектоническая схема с положением прогибов и грабенов (Майстренко, 2006)

плосковершинные антиклинали разделены узкими сжатыми синклиналями. Конгруэнтной (*congruent*) складчатостью он предложил называть такую, при которой синклинальные и антиклинальные складки имеют сходные размеры. Классификация этих типов в значительной мере зависит от выбора в качестве репера того или иного горизонта. В отечественной геологии для эжективной и дежективной складчатости используются термины «гребневидная» и «коробчатая». Штиле (1925) показал, что в процессе складчатости соль может себя вести гармонично, согласно с вмещающими толщами, а может и дисгармонично, формируя диапировые «стебли». Образование соляных структур в Актюбинском Приуралье также связывалось В.Е. Руженцевым (1930) с

тангенциальным сжатием. Основанием для данных представлений послужили развитые антиклинали уральского простириания. Структура месторождений Величка и Калуш также определяется продольным сжатием (рис. 17).

Четвертая концепция рассматривает образование тектонических структур за счет срыва осадочных толщ по поверхности солей при воздействии на них тангенциального сжатия. Август Баксторф [Buxtorf, 1907] первым предположил, что Юрские горы представляют собой покров, выдвинутый Альпами и сорванный со своего основания по поверхности эвапоритовой толщи триасового возраста (Keuper), сложенной гипсом, ангидритом и галитом. Юрский массив в плане имеет форму полумесяца размером 390×65 км и

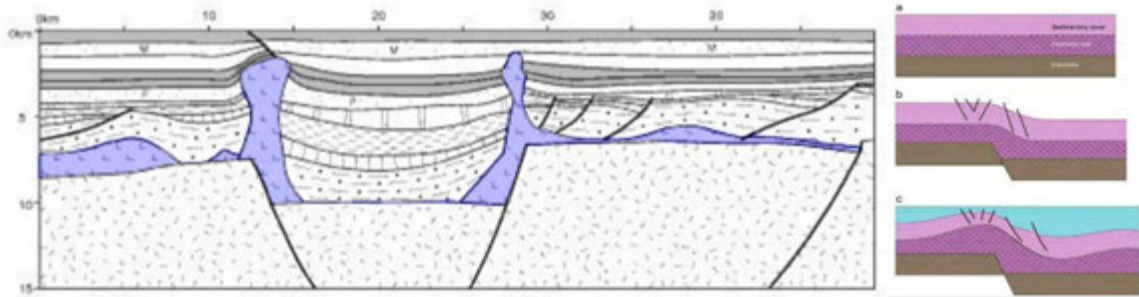


Рис. 13. Диapiroны Машар и Медан в Центральном грабене Северного моря (Foster, Rattey, 1993) и предполагаемая модель их формирования над сбросом в фундаменте (Remmelts, 1996)

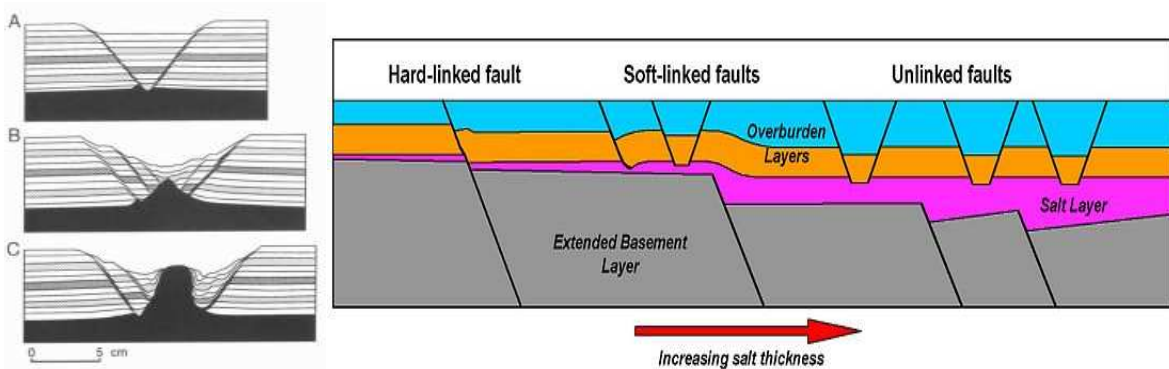


Рис. 14. Слева модель реактивного соляного диапиризма, реализующегося в результате растяжения (Vendeville, Jackson, 1992), справа – модель уменьшения взаимосвязи между разломами надсолевых и подсолевых толщ по мере увеличения мощности солей (Stewart, 2007)

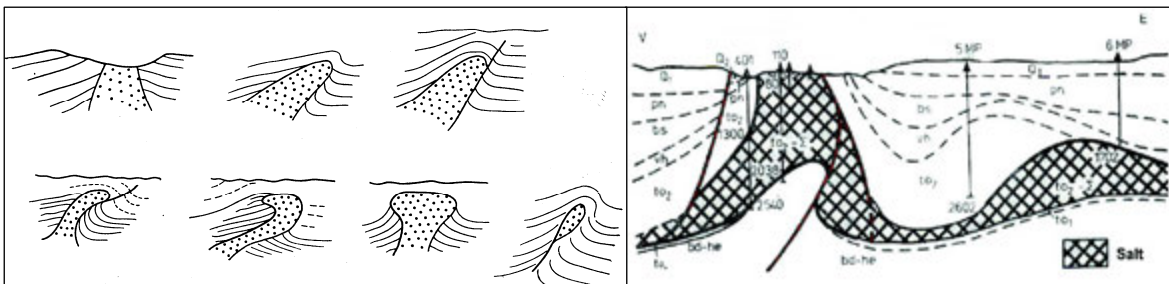


Рис. 15. Различные формы диапировых складок (Mrazec, 1915) и диапир Прайд в Трансильванском бассейне, Румыния (Miron, Marton, 2006)

расположен на некотором удалении от дуги Западных Альп. Мощность осадочного чехла, состоящего из чередующихся известняков и мраморов, составляет 0,8–2 км. Эвапориты залегают на полого падающей в юго-восточном направлении поверхности жесткого фундамента, сложенного гранитами и гнейсами. Структурный облик массива определяется в целом субгоризонтальной слоистостью, осложненной складками, надвигами и поперечными левыми сдвигами. Складки имеют коробчатую и гребневидную (шеврон-

ную) форму, чаще всего симметричные, но могут быть и наклонены как во внешнюю, так и внутреннюю стороны массива. Амплитуда складок возрастает вместе с мощностью чехла в юго-западном направлении. Юрские горы (рис. 18–20) были приняты за эталон деформации пород чехла и формирования складок срыва. Кроме Центральной Европы, структуры срыва, проявленные в связи с соляными толщами известны в Канаде, Иране и на юге Сибирской платформы (рис. 20–22). Наличие в разрезе пластов солей приво-

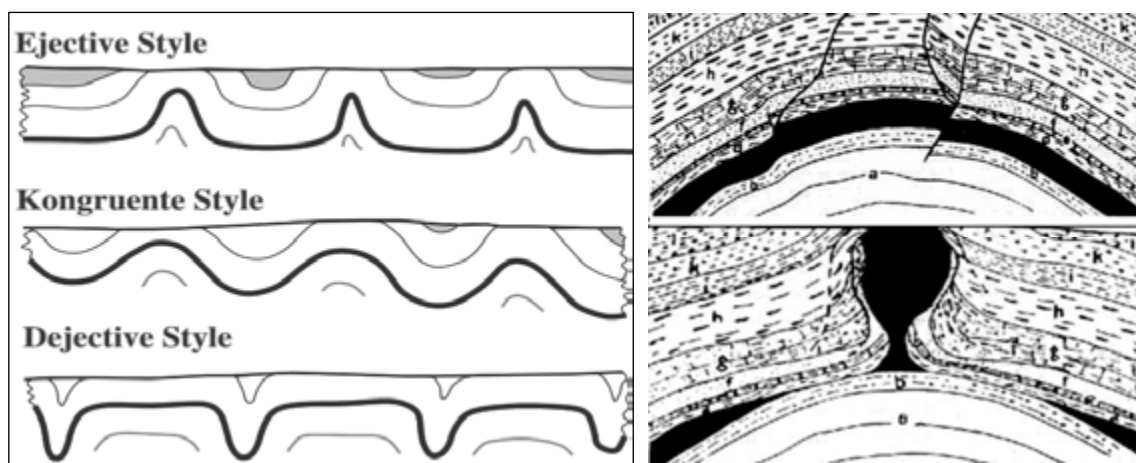


Рис. 16. Три вида складчатости (эжективная, дежективная и конгруэнтная) в надсолевых породах и два (гармоничная и дисгармоничная) в соляных по Г. Штиле (1917, 1926)

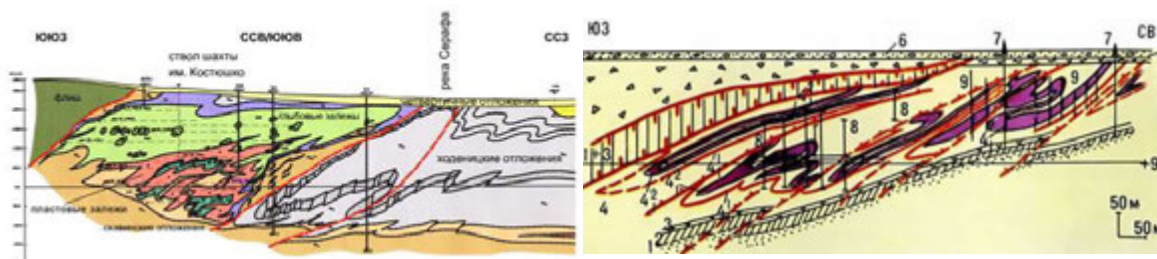


Рис. 17. Геологические разрезы месторождений Величка (Польша) и Калуш (Украина)

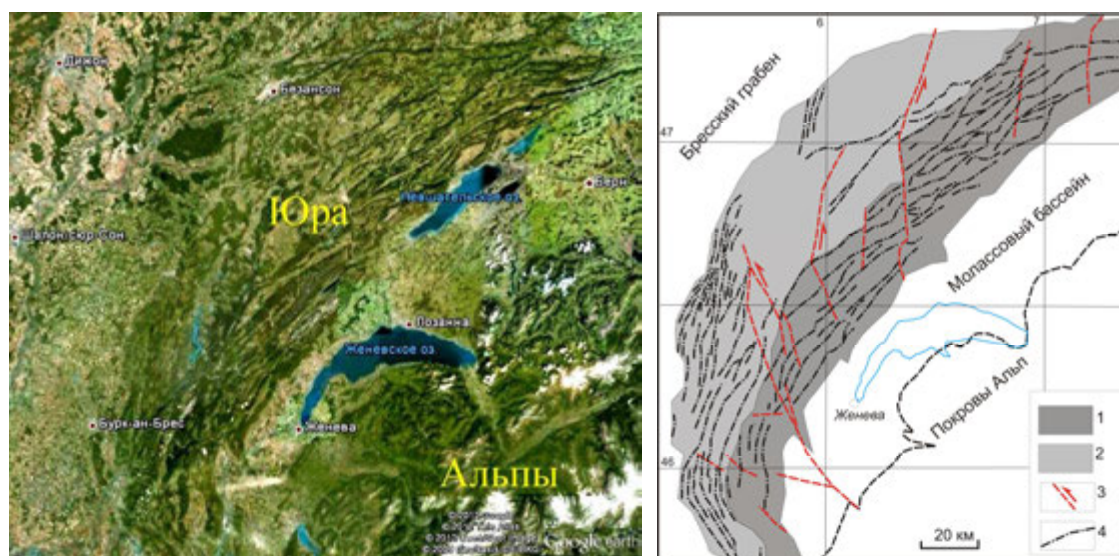


Рис. 18. Юрские горы: вид из космоса и тектоническая схема; 1, 2 – внутренняя и внешняя зоны; 3 – сдвиги и направление смещения; 4 – оси антиклинальных складок

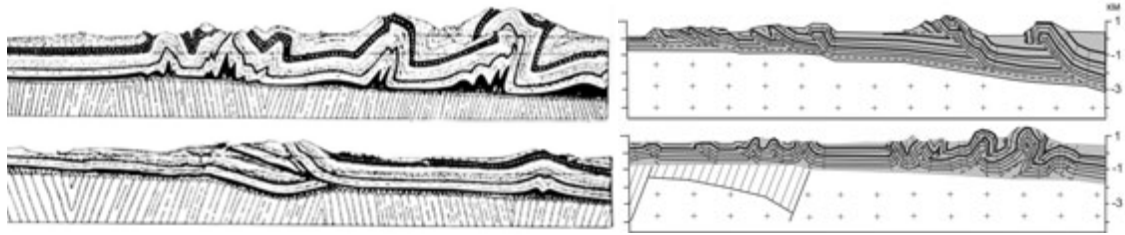


Рис. 19. Разрез через Юрские горы, составленный по наблюдениям в туннеле Гранж-Мутье (Vuxtorf, 1907) и современные сбалансированные разрезы (Philippe et al., 1996)

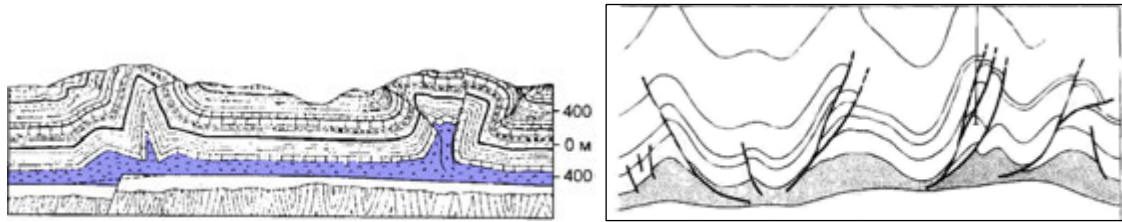


Рис. 20. Шевронные и коробчатые складки в Юрских горах (Woodward et al., 1985) и компрессионные структуры Пари Исланд в Канаде, представленные коническими складками и разрывами со смещением по простиранию (Fox, 1984)

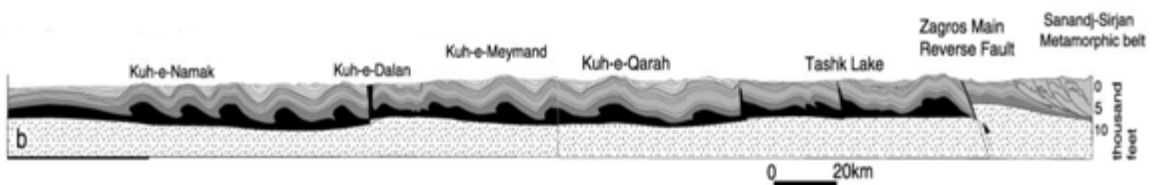


Рис. 21. Разрез через Загросские горы, Иран (Bahroudi, Koyi, 2003)

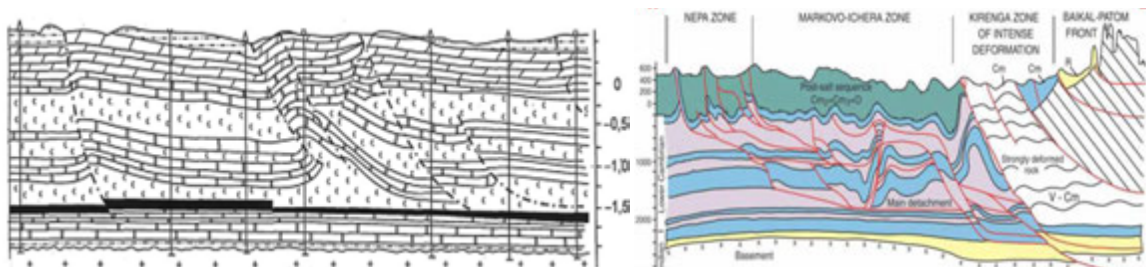


Рис. 22. Разрезы через Иркутский амфитеатр Сибирской платформы (Шемин, 1982; Сметанин, 2000)

дит к формированию специфического комплекса дизъюнктивно-пликативных нарушений (дизплекатов): складок срыва, взбрососкладок, рамповых складок, прямых и обратных надвигов (рис. 23).

Пятая концепция, известная как гравитационная тектоника или тектоника гравитационного скольжения, является одной из старейших геологических гипотез, разработкой которой занимались Скроп [Scrope, 1825] и Науман [Naumann, 1849]. Гравитационная тектоника –

процесс и результат деформации горной породы под действием сил гравитации, движение (течение и скольжение) больших масс горных пород под влиянием собственного веса вниз по склону, сопровождаемое формированием складок и разрывов. Первые указания на образование складчатости путем гравитационного скольжения принадлежат швейцарским геологам Шардту [Schardt, 1898] и Люжону [Lugeon, 1901; 1903], использовавшим термин «*glissement*» (скольжение). Рейер

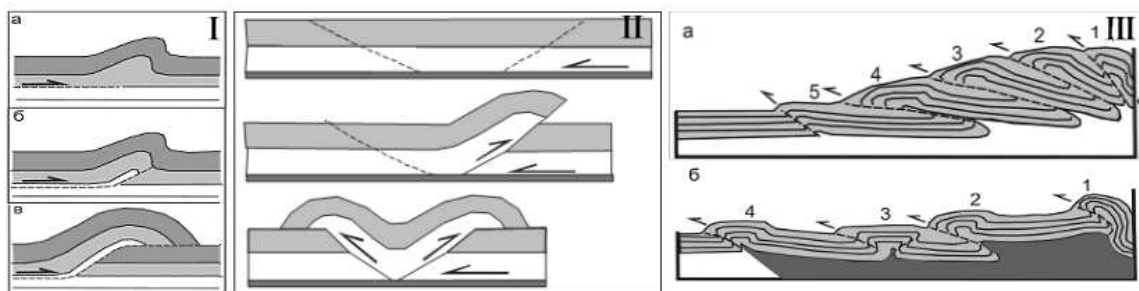


Рис. 23. Различные модели: I – эволюция дизъюнктивно-пликативных форм, связанных с тектоникой срыва (по Jameson, 1987) (а – складка срыва; б – взбрососкладка; в – рамповая складка); II – эволюция формирования прямых и обратных надвигов при сжатии толщ на соляном ложе (Letouzeu, Colletta, Vially, Chermette, 1995); III – эволюция надвиговых систем, сформировавшихся на вязком (а) и пластичном (б) основаниях (Koyi et al., 2000)

[Reyer, 1888; 1892] первым экспериментально получил складки гравитационного скольжения (рис. 24). Дели [Daly, 1925] назвал ее «гипотезой оползания» и применил английский эквивалент «сползание» (*sliding*). Р.В. ван Беммелен [van Bemmelen, 1949] назвал данный процесс гравитационным тектогенезом. Жинью [Gignoux, 1948] четко различал процессы скольжения и процессы течения под влиянием сил гравитации. Харрисон и

Фалькон (1934, 1936) назвали коллапс-структурами складчатые сооружения, образовавшиеся при оседании пластов известняка по глинистым прослоям западного Ирана (рис. 25).

Необходимым условием проявления гравитационного скольжения являются наличие в основании перемещающейся толщи пород повышенной пластичности (глины, гипс и др.), достаточный вес вышележащих осадков и уклон рельефа.

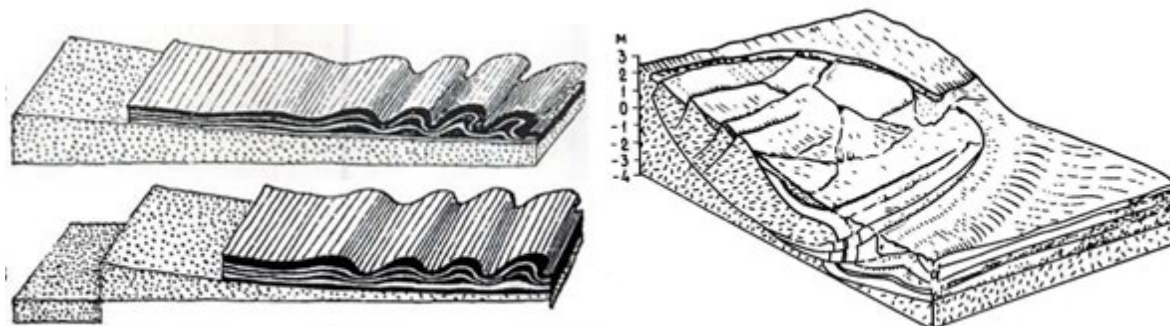


Рис. 24. Складки гравитационного скольжения (Reyer, 1888) и разрез через оползневую структуру (van Bemmelen, 1949), вскрывающий зону растяжения с системой сбросов, зону транзита, а также сжатия со складками и надвигами

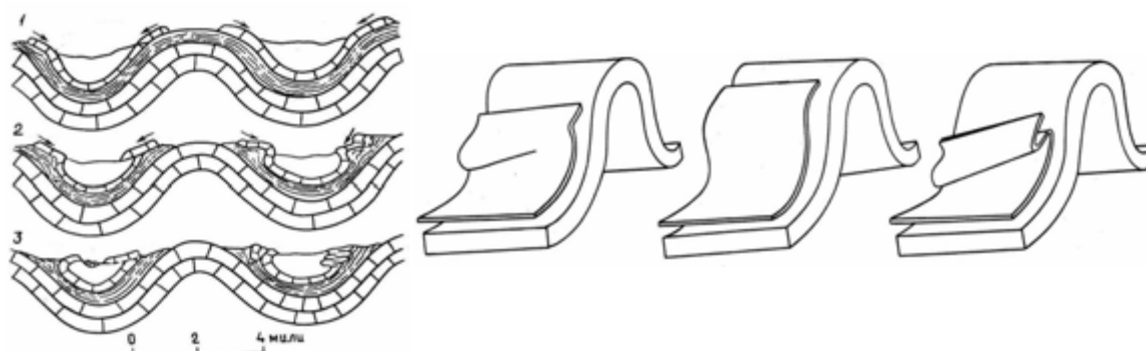


Рис. 25. Гравитационные коллапс-структуры юго-западного Ирана, сформировавшиеся при оседании пластов известняка по глинистым прослоям (Harrison, Falcon, 1934; 1936)

Особенно ярко тектоника гравитационного скольжения проявляется при наличии в разрезе соляных пород. Так, довольно масштабным проявлением гравитационного скольжения является формирование системы грабен в национальном парке Каньонленд, штат Юта (рис. 26, 27). Ранее предполагалось [Harrison, 1927], что значительный эрозионный врез реки Колорадо обеспечивает изостатическое всплывание солей формации Парадокс под ее руслом. Однако в настоящее время доказано, что пологое падение в западном направлении кровли соляной толщи обеспечивает за счет эрозии долины реки Колорадо гравитационное скольжение и растяжение надсолевых пород восточного берега с образованием системы субпараллельных грабен и реактивного подъема соли над ними [Trudgill, 2002; Schultz-Ela, Walsh, 2002; Walsh, Schultz-Ela, 2003].

Значительно раньше идею о проявлении гравитационного оползания на побережье Мексиканского залива высказал Ганс Клоос [Cloos, 1968]. Он показал, что

в надсолевых осадках по периферической части залива формируется краевой грабен, ограниченный падающими навстречу (антитетическими) сбросами (рис. 28). Тем самым был нанесен первый удар по представлениям о Мексиканском заливе только как об эталоне соляно-купольной тектоники. В дальнейшем свидетельства проявления гравитационного скольжения были зафиксированы на континентальных склонах пассивных окраин Бразилии и Анголы [Jackson, Cramez, 1989; Duval, Cramez, 1991 et al.]. Было установлено, что в связи с уменьшением нагрузки вышележащих осадков и действием силы тяжести происходит выдавливание соли и ее стекание вниз по склону с образованием не только грабен и конседиментационных сбросов, но и сложной складчатости (рис. 29–31). Масштаб сочетания галокинеза и гравитации в северном обрамлении глубоководной части Мексиканского залива настолько значителен, что созданная им зона дислокаций сравнима с альпийским поясом Западной Европы.

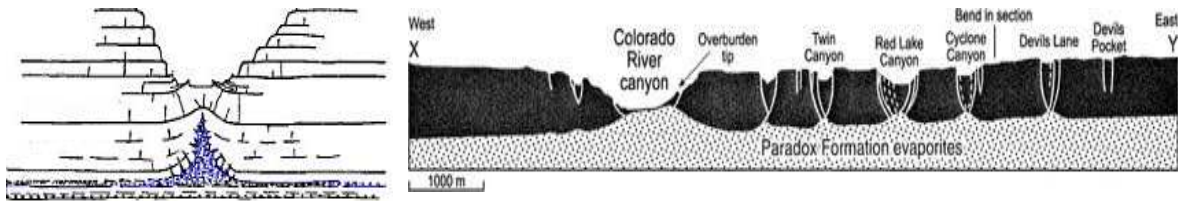


Рис. 26. Геологические разрезы через каньон реки Колорадо (Harrison, 1927; Walsh, Schultz-Ela, 2003)

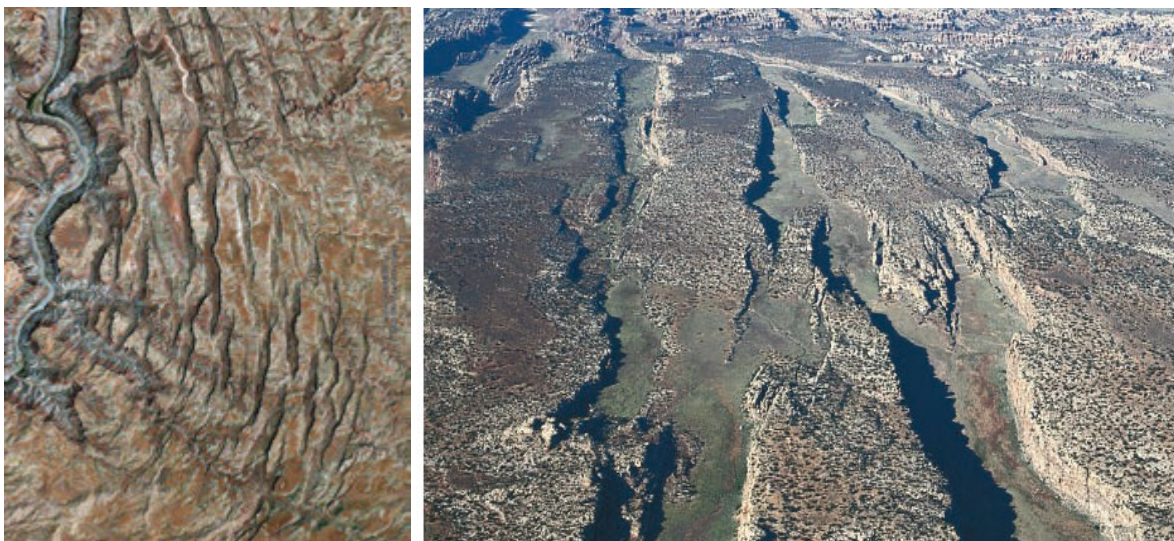


Рис. 27. Вид на долину и восточный берег р. Колорадо

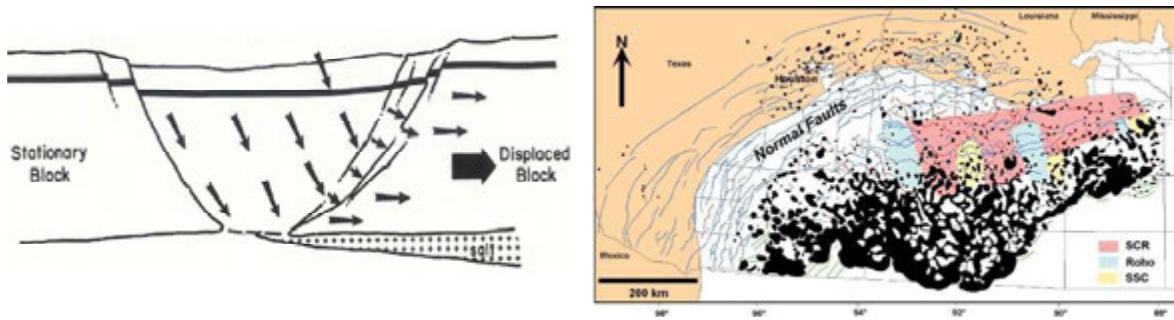


Рис. 28. Строение краевого грабена (Cloos, 1968) и генерализованная карта сбросов и аллохтонных соляных тел Мексиканского залива (Deigel et al., 1995)

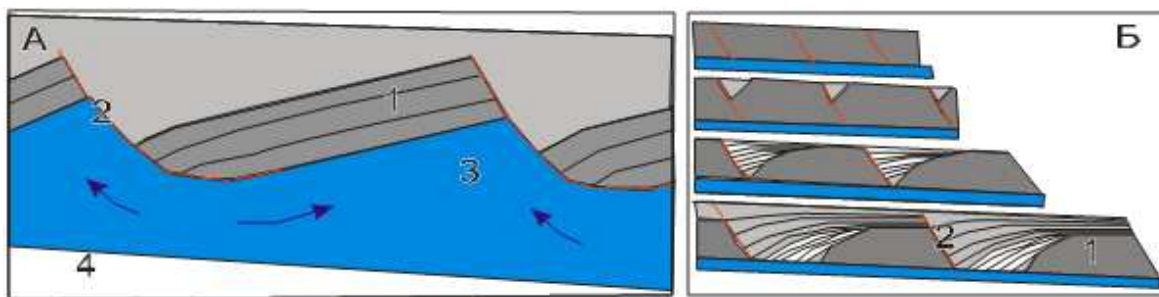


Рис. 29. Модели проявления тектоники гравитационного скольжения на поверхности мощных (А – Jackson, Galloway, 1984) и маломощных (Б – Burollet, 1975; Jackson, Cramez, 1989) соляных залежей: 1 – плотобразные блоки (raft); 2 – конседиментационные сбросы (rollover); 3 – соляные валы (roller); 4 – подсолевое ложе

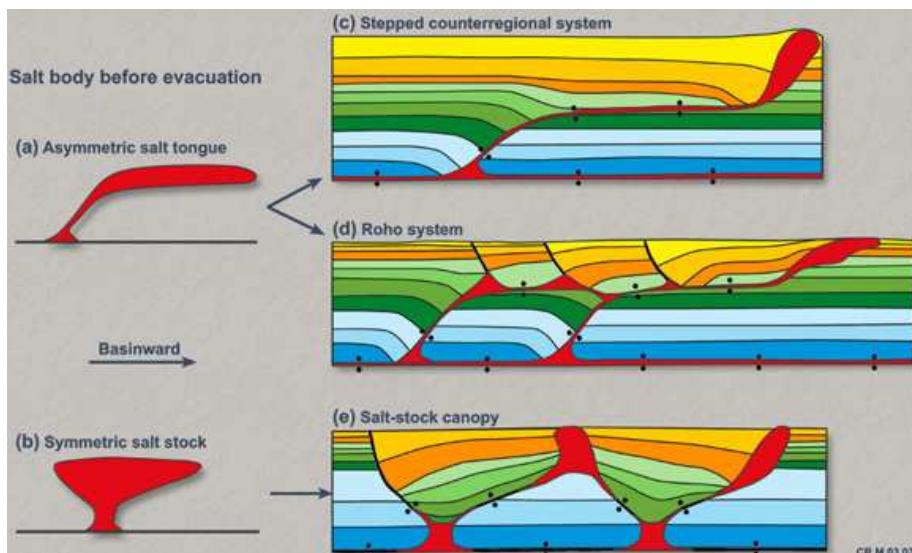


Рис. 30. Механизм формирования аллохтонных соляных тел в передовой (компрессионной) части структуры гравитационного скольжения Мексиканского залива (Rowan et al., 1999): а – соляные языки; б – симметричные штоки; с – листрический конседиментационный разрыв, наклоненный в сторону суши (stepped counter-regional system); д – система листрических конседиментационных сбросов, падающих в сторону бассейна (roho system); е – мини-бассейны над эвакуированными штоками

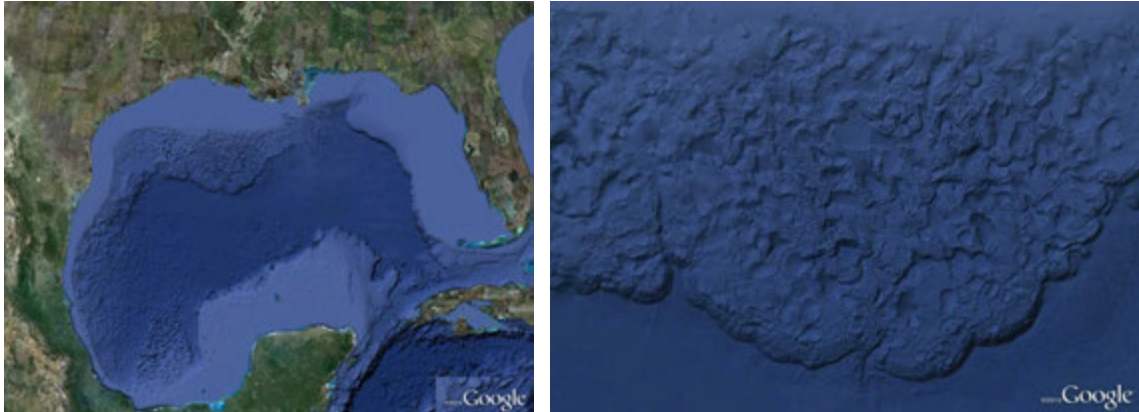


Рис. 31. Вид из космоса на Мексиканский залив и одну из крупнейших структур гравитационного скольжения Мира, ограниченную с юга уступом (эскарпом) Сигсби

Еще одним ярким примером тектоники гравитационного скольжения является течение экструдированных соляных потоков на склонах гор Загрос в Южном Иране [Талбот, Джексон, 1987]. За счет столкновения Аравийской и Евразийской литосферных плит произошла экструзия около 20 диапиров. Часть из них формирует на поверхности Персидского залива маленькие соляные острова. Соль растекается под собственной тяжестью и сползает со склонов гор. Такой поток называют соляным глетчером; английское название «*namakier*» составлено из двух слов: *namak* – соль (фарси) и *glacier* – ледник (англ.). Установлено, что средняя скорость течения соляного глетчера составляет несколько метров в год, т.е. меньше, чем у большинства ледников, но тем не менее она достаточно высока для кристаллической породы. Зафиксировано, что уменьшение вязкости соли может вызываться не только увеличением температуры, но и повышением содержания в ней воды. Измерения с использованием реперов на одном соляном глетчере показали, что большую часть года он неподвижен. Однако после сезонных проливных дождей он может течь со скоростью полметра в сутки. Соль, сползающая вниз в соляном глетчере, имеет определенную структуру, обусловленную динамикой течения. Наличие препятствий на пути замедляет поток и приводит к образованию раздувов со складчатым строением. Ускорение течения приводит к

утонению слоев и вытягиванию внутренних складок (рис. 32).

Шестая концепция формирования тектонических структур обусловлена высокой растворимостью солей и постепенной деградацией соляных тел при взаимодействии с грунтовыми водами. Значительные масштабы растворения солей апикальной части соляных структур были показаны на соляном куполе Честнет (Chestnut Dome), где глубина прогиба составляет 760 м [Lahee, 1931]. Глубина депрессионной структуры над Нежинским соляным куполом в Днепровско-Донецкой впадине составляет около 650 м (рис. 33). Первым упоминанием о структурах деградации в отечественных работах являются «дизъюнктивные мульды» В.Е. Руженцева (1930, 1936), изучавшего соляные структуры Прикаспия. Он связывал эти структуры с оседанием соляного или гипсового ядра пермских складок вследствие ослабления тангенциального сжатия. В отличие от него П.И. Климов (1935) считал, что они обусловлены исключительно карстовыми процессами, протекавшими в этих солегипсовых отложениях. Специфические структуры, названные «кажущимися курганами» (Apparent Mound), выявлены [Jackson, Cramez, 1989] при анализе разрезов, где были установлены признаки былого существования соляных тел типа «подушек» (рис. 34). Еще более сложные, оказавшиеся нефтеносными, структуры вы-

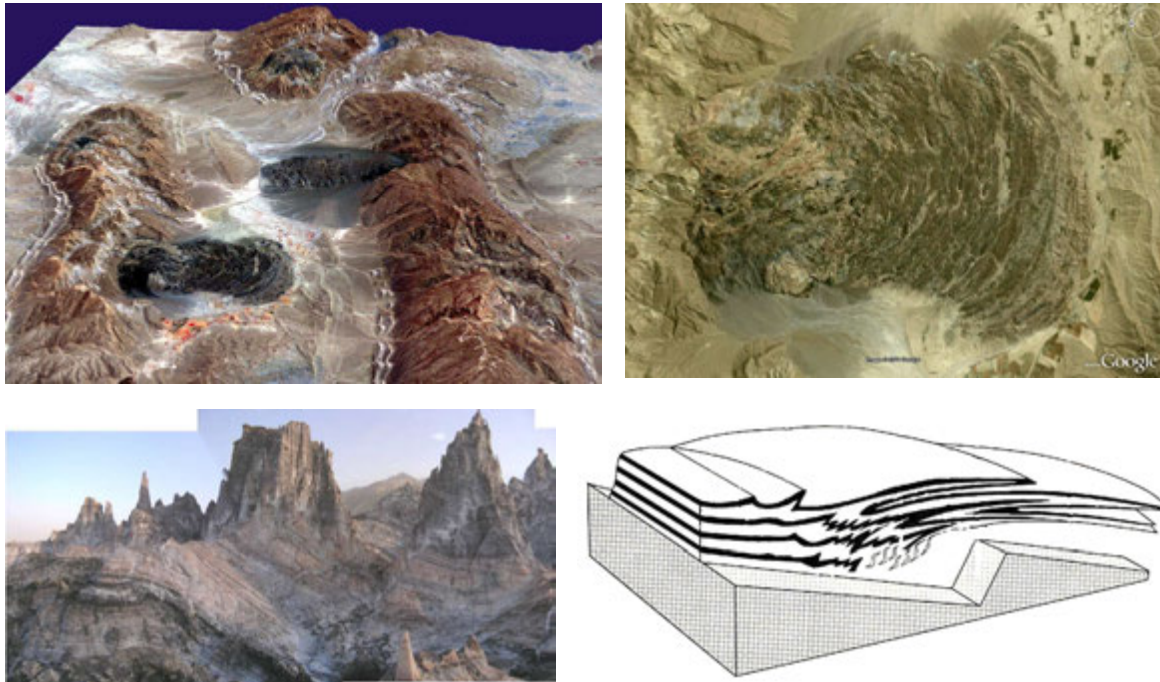


Рис. 32. Фотографии соляных глетчеров в горах Загрос, Южный Иран (фото Google и F.G. Santolalla) и модель внутреннего строения в потоке кембрийской соли (Талбот, 1981)

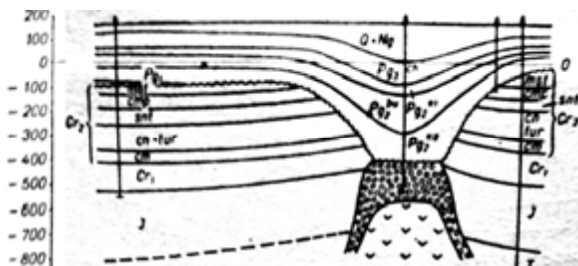


Рис. 33. Геологический разрез через Нежинский купол Днепровско-Донецкой впадины (Китык, 1963)

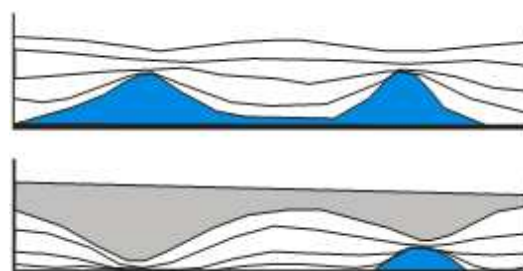


Рис. 34. Модель формирования «кажущихся курганов» в процессе деградации соляных подушек (Jackson, Cramez, 1989)

явлены на шельфе Анголы. Деградация соляных диапиров обусловлена растяжением надсолевой толщи за счет гравитационного скольжения. При этом антиклинальные структуры, напоминающие панцирь черепахи, формируются как в надкупольном, так и межкупольном пространстве (рис. 35).

Заключение

Приведенный обзор показывает, что многообразие тектонических структур, связанных с каменной солью, обусловлено ее пониженной плотностью, высокой пластичностью, растворимостью, а также

характером оказанных на нее нагрузок. Основные типы соляной тектоники и оп-

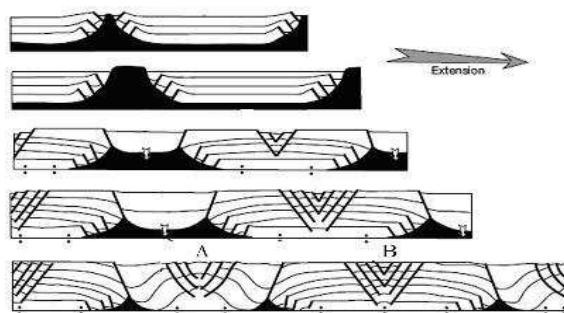


Рис. 35. Модель деградации соляных диапиров в условиях растяжения (Duval et al., 1991; Vendeville, Jackson, 1992): А – структуры оседания типа «черепахи»; В – межкупольные поднятия типа «черепахи»

ределяющие ее механизмы приведены ниже (табл.).

Сопоставление механизмов реализации основных тектонических событий (рис. 36), проявленных на Верхнекамском

месторождении [Чайковский, 2008], с выделенными тектонотипами позволяет отметить следующее.

Сразу после отложения соляной залежи (переходной пачки) в конце березни-

Типизация основных механизмов соляной тектоники

№ п/п	Тип соляной тектоники	Механизм формирования геологических структур
1	Солянокупольная тектоника, галокинез Трусгейма, активный диапиризм Джексона	Гравитационная адвекция
2	Солянокупольная тектоника, связанная с блоковыми подвижками в фундаменте, реактивный диапиризм Джексона	Гравитационная адвекция, спровоцированная поперечным изгибом и растяжением надсолевых толщ
3	Диапиризм Мразека, компрессионная соляная тектоника	Продольное сжатие
4	Тектоника срыва юрского типа	Послойный сдвиг со складчатостью срыва
5	Тектоника гравитационного скольжения	Гравитационное течение и скольжение
6	Тектоника деградации соляных структур	Растворение солей

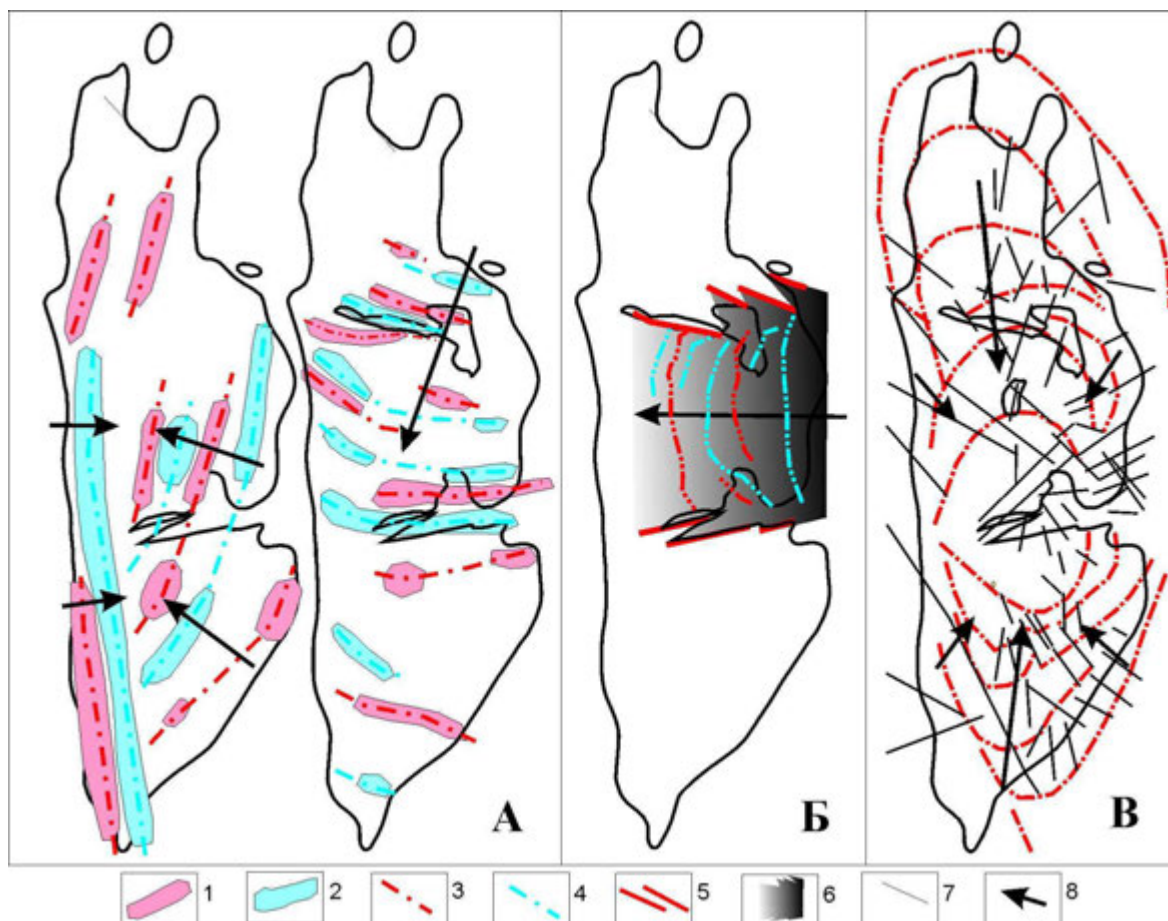


Рис. 36. Характер основных тектонических деформаций, проявленных на территории Верхнекамского месторождения: А – после отложения соляной залежи; Б – во время накопления отложений шеиминской свиты; В – в предплиоценовое время. Цифрами обозначены: 1, 2 – антиклинальные и синклиналильные складки; 3, 4 – оси линейных положительных и отрицательных структур; 5 – кулисообразная система сдвигобросов; 6 – аллохтонный блок, включающий терригенно-карбонатную, соляно-мергельную и часть соляной толщ; 7 – радиальная система разломов надсолевой толщ; 8 – направление перемещения соляных и надсоляных масс

ковского времени произошло сползание соляной залежи к центру Соликамской впадины подобно иранским соляным ледникам. Однако соскальзывание соляных масс с западного, северо-восточного и юго-восточного бортов впадины обусловило формирование специфической интерференционной картины с образованием пересекающейся складчатости.

В шешминское время закладываются две кулисообразные системы разломов Дуринского и Боровицкого прогибов, вдоль которых происходит оползание центральной части месторождения в западном направлении. В отличие от краевых грабенов Мексиканского залива эти разрывы представляют собой конседиментационные сбрососдвиги.

В предплиоценовое время надсолевая толща проскальзывает по кровле соляного зеркала аналогично тектонике срыва

юрского типа. Однако в отличие от Юрских гор движение надсолевых масс происходило к центру Соликамской впадины с образованием концентрической складчатости и радиальных разломов, в том числе сдвигов.

Во всех трех случаях основным механизмом являлось гравитационное скольжение, которое во времени смещалось от подошвы соляной залежи к ее кровле. Таким образом, проявленные в структуре месторождения разновозрастные разрывные и складчатые нарушения позволяют не только реконструировать характер тектонических событий, проявленных на окраине Восточно-Европейской платформы, прогнозировать степень их опасности для подземной разработки солей, но и рассматривать Соликамскую впадину как эталон проявления тектоники гравитационного скольжения.

Библиографический список

1. Авров В.Я. О генезисе солянокупольных структур Урало-Эмбенской области // Докл. АН СССР. – 1950. – Т. 73. – № 3. – С. 545–548.
2. Айзенштадт Г.Е.-А. Типы соляных куполов и нефтяных залежей Прикаспийской впадины // Тр. Нижне-Волжск. науч.-исслед. ин-та геол. и геофиз., вып.2. – Саратов, 1964.
3. Китык В.И. Дисгармоничные складки осадочных толщ. – Киев: Наукова думка, 1979. – 128 с.
4. Климов П.И. Дизъюнктивные мульды восточной части междуречья Урала и Илека // Бюлл. Моск. общества испыт. природы, нов. сер. – Отд. геол. – 1935. – Т. 13 (2). – С. 175–192.
5. Конищев В.С. Соляная тектоника Припятского прогиба. – Минск: Наука и техника, 1975. – 150 с.
6. Косыгин Ю.А. Соляная тектоника платформенных областей. – М.; Л.: Гостоптехиздат, 1950. – 247 с.
7. Косыгин Ю.А. Типы соляных структур платформенных и геосинклинальных областей. – М.: изд-во АН СССР, 1960. – 91 с.
8. Косыгин Ю.А., Бланк М.И. Типы соляных структур Днепровско-Донецкой впадины // Бюлл. Моск. общества испыт. природы. – Отд. геол. – 1958. – Т. 33. – № 6.
9. Мигурский А.В., Старосельцев В.В. Шарьяжное строение зоны сочленения Сибирской платформы с Байкало-Патомским нагорьем // Советская геология. – 1989. – № 7. – С. 9–15.
10. Неволин Н.В. Нефтегазоносность Западного Казахстана. – М.: Госгеолтехиздат, 1961. – 316 с.
11. Руженцев В.Е. Основы тектоники Урало-Эмбенского района // Бюлл. Моск. общества испыт. природы, нов. сер. – Отд. геол. – 1930. – Т. XXXVIII, ч. VIII. – № 1–2.
12. Сметанин А.В. Конструкция Ажиткано-Непского сектора Предбайкало-Патомского надвигового пояса. // Геофизические исследования в Восточной Сибири на рубеже XXI века. – Новосибирск: Наука, 1996.
13. Талбот К.Дж., Джексон М.П.А. Соляная тектоника // В мире науки. – М.: Мир. – 1987. – № 10. – С. 40–50.
14. Чайковский И.И. Основные этапы формирования тектонических нарушений в водозащитной толще Верхнекамского калийного месторождения // Горный журнал. – 2008. – № 10. – С. 41–44.
15. Чирвинская М.В., Сологуб В.Б. Глубинная структура Днепровско-Донецкого авлакогена по геофизическим данным. – Киев: Наукова думка, 1980. – 177 с.
16. Шемин Г.Г. Надвиги на юго-востоке Сибирской платформы // Геология и геофизика. – 1989. – № 11. – С. 32–38.
17. Arrhenius S. Über die physikalischen Bedingungen bei den Salzablagerungen zur Zeit ihrer Bildung und Entwicklung // Kali. – 1912. – № 6.
18. Arrhenius S., Lachmann R. Die physikalisch chemischen Bedingungen bei Bildung der Salzlagerstätten und ihre Anwendung auf geologische Probleme // Geol. Rundschau. – 1912. – № 3.

19. *Barton D.C.* Mechanics of formation of salt domes with special reference to Gulf Coast salt domes of Texas and Louisiana. // *Bull. AAPG.* – 1933. – Vol. 17. – № 9. – P. 1025–1083.
20. *Bahrudi A., Koyi, H.A.* Effect of spatial distribution of Hormuz salt on deformation style in the Zagros fold-thrust belt // *Journal of the Geological Society of London.* – 2003. – Vol. 160. – P. 719–733.
21. *Behrman R. B.* Geologic und Lagerstatte des Olfeldes Reitbrook bei Hamburg. *Erdol und Tektonik: Amt f. Bodenforschung Hannover-Celle.* – 1949. – P. 190–221.
22. *Burrollet P. F.* Tectonique en radeaux en Angola (Raft tectonics in Angola) // *Bull. Soc. Geol. Fr. XVII.* – 1975. – P. 503–504.
23. *Buxtorf A.* Theoretische Profil zur Erklarung der Tektonik des Grenchenbergs // *Entworfen Dez.* – 1915. – № 27.
24. *Buxtorf A.* Geologische Beschreibung des Weissenstein-Tunnels und seiner Umgebung // *Beitr. Geol. Kt. Schweiz.* – 1907. – № 21.
25. *Cloos E.* Experimental Analysis of Gulf Coast Fracture Patterns // *Bull. AAPG* – 1968. – Vol. 52, Is. 3. – P. 420–444.
26. *Currie J.B.* Concurrent deposition and deformation in development of salt-dome graben // *Bull. AAPG.* – 1956. – Vol. 40. – P. 1–16.
27. *Daly R.A.* The Geology of Ascension Island // *Proceedings of the American Academy of Arts and Sciences.* – 1925. – Vol. 60. – P. 3–80.
28. *Diegel F.A., Karlo J.F., Schuster D.C., Shoup R.C., Tauvers P.R.* Cenozoic structural evolution and tectono-stratigraphic framework of the northern Gulf Coast continental margin, Salt tectonics: A global perspective // *AAPG Memoir.* – 1995. – Vol. 65. – P. 109–151.
29. *Duval B., Cramez C., Jackson M.P.A.* Raft tectonics in the Kwanza Basin, Angola // *Marine and Petroleum Geology.* – 1992. – Vol. 9. – P. 389–404.
30. *Foster P.T., Rattey P.R.* The evolution of fractured chalk reservoir: Machar oil field, UK, North Sea // In *J. Parker* (Ed.), *Petroleum Geology of Northwest Europe*, Barbican Conference Proceedings, Geological Society of London. – 1993. – Vol. 2.
31. *Fox F.G.* Structure sections across Parry Islands fold belt, and Vesey Hamilton Salt Wall, Arctic Archipelago. Canada // In *A.W. Bally* (Ed.), *Seismic Expression of Structural Styles. A Picture and Work Atlas.* AAPG, *Stud. Geol.* – 1984. – Ser. 15. – Vol. 3. – P. 54–72.
32. *Gignoux M.* La tectonique d'e'coulement par gravite' et la structure des Alpes // *Bull. Soc. Geol. Fr.* – 1948. – Vol. 5. – P. 739–761.
33. *Hanna M.A.* Salt domes: favorite home for oil // *Oil Gas J.* – 1959. – Vol. 57. – P. 136–142.
34. *Harison J.V.* Colorado-Uta salt doms // *Bull. AAPG.* – 1927. – Vol. XI. – P.118.
35. *Harrison J.V., Falcon N.L.* Gravity collapse structure and mountain ranges, as exemplified in south-western Persia // *Quarterly Journal of the Geological Society.* – London. – 1936. – Vol. 92. – P. 91–102.
36. *Harrison J.V., Falcon N.L.* Collapse structure // *Geological Magazine.* – 1934. – Vol. 71. – P. 529–539.
37. *Letouzey J., Colletta B., Vially R., Chermette J.C.* Evolution of Salt-Related Structures in Compressional Settings // *AAPG Special Volumes № 65: Salt Tectonics: A Global Perspective*, 1995. – P. 41–60.
38. *Jackson M.P.A., Cramez C.* Seismic recognition of salt welds in salt tectonics regimes in Gulf of Mexico salt tectonics, associated processes and exploration potential: Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Gulf Coast Section // *10th Annual Research Conference Program and Extended and Illustrated Abstracts*, 1989. – P. 66–71.
39. *Jackson M.P.A., Galloway W.E.* Structural and depositional styles of Gulf Coast Tertiary continental margins: application to hydrocarbon exploration // *AAPG, Continuing Education Course Note Series No. 25*, 1984. – P. 226.
40. *Jackson M.P.A., Cornelius R.R., Craig C.H., Gansser A., Stöcklin J., Talbot C.J.* Some lessons in salt tectonics from the Great Kavir, Central Iran // *Geological Society of America Abstracts with Programs.* – 1990. – Vol. 22. – № 7. – P. 47.
41. *Jamison W.R.* Geometric analysis of fold development in overthrust terranes // *J. Struct. Geol.* – 1987. – Vol. 9. – P. 207–219.
42. *Koyi H.A.* Towards dynamic restoration of geologic profiles; some lessons from analogue models // In *Geology and Geophysics of continental margins.* American Geophysical Union, *Geophysical Monograph* 115. – 2000. – P. 317–329.
43. *Kupfer D.H.* Relationship of Internal to External Structure of Salt Domes // *Diapirism and Diapirs.* – 1968. – P. 79–89.
44. *Lahee F.H.* Chestnut dome, Matchitoches Parish, Louisiana // *Bull. AAPG.* – 1931. – Vol. 15. – № 3. – P. 277–278.
45. *Lokhorst A.* The Northwest European Gasatlas. Netherlands Institute of Applied Geoscience TNO (Haarlem), 1998.

46. *Lugeon M.* Les grandes nappes de recouvrement des Alpes du Chablais et de la Suisse // Societe geologique de France Bulletin. – 1901. – Ser. 4. – Vol. 1. – P. 723–825.
47. *Maystrenko Y., Bayer U, Scheck-Wenderoth M.* 3D reconstruction of salt movements within the deepest post-Permian structure of the Central European Basin System – the Glueckstadt Graben // Netherlands Journal of Geosciences - Geologie en Mijnbouw. – 2006. – Vol. 85. – № 3. – P. 181–196.
48. *Miron D., Marton I.* Praid salt mine: Miocene evaporates and diapir fold structures in the Transylvanian Basin. Romania Field Trip SEG Student Chapters Uni Geneva - ETH Zürich - Uni Budapest - Uni Cluj. – 2006. – Vol. VIII. – P. 1–8.
49. *Mrazec L.* Les plis diapirs // C.R. séances Inst. Geol. Roum. – 1915. – Vol. VI. – P. 226–270.
50. *Mrazec L.* Despre cute cu sambure de străpungere // Bull. Soc. St. Bucuresti. – 1907. – Vol. XVI. – P. 6–8.
51. *Mrazec L.* Les Plis diapirs et le diapirisme en général // C.R. séances Inst. Geol. Roum. – 1926. – Vol. 6.
52. *Murray G.E.* Salt structures of Gulf of Mexico basin a review // Bull. AAPG. – 1966. – Vol. 50. – № 3. – P. 439–478.
53. *Naumann K.* Lehrbuch der geognosie. Vol. 1. – Leipzig: W. Engelmann, 1849.
54. *Nettleton L.L.* Fluid mechanics of salt domes // Bull. AAPG. – 1934. – Vol. 18. – № 9. – P. 1175–1204.
55. *Nevin C.M.* Principles of structural geology: 4th ed. – New York, 1949 – 460 p.
56. *Philippe Y., Colletta B., Deville E., Masclé A.* The Jura fold-and-thrust belt: a kinematic model based on map-balancing // In *P.A. Ziegler, F. Horvath* (Eds.), Structure and Prospects of Alpine basins and forelands. Peri-Tethys Memoir 2, Edition du Muséum d’Histoire Naturelle, Paris. – 1996. – Vol. 170. – P. 235–261.
57. *Remmelts G.* Salt tectonics in the southern North Sea, the Netherlands // In *Rondeel H.E., Batjes D.A.J., Nieuwenhuijs W.H.* Geology of Gas and Oil under the Netherlands. – Kluwer (Dordrecht), 1996. – P. 143–158.
58. *Reyer E.* Theoretische Geologie. Vienna: Leipzig, 1888.
59. *Richter-Bernburg G.* Uber saline sedimentation // Z. deutsch. Geol. Ges. – 1955. – Bd. 105. – № 4. – P. 593–645.
60. *Ritz C.H.* Geomorphology of Gulf Coast salt structures and its economic application // Bull. AAPG – 1936. – Vol. 20. – № 11. – P. 1413–1438.
61. *Rowan M.G., Jackson M.P.A., Trudgill B.D.* Salt-related fault families and fault welds in the northern Gulf of Mexico // Bull. AAPG. – 1999– Vol. 83. – № 9. – P. 1454–1484.
62. *Schardt H.* Les regions exotiques du versant nord des Alpes suisses, leurs relations avec l’origine des blocs et bruches exotiques et la formation du Flysch // Societe Vaudoise sciences naturelles Bulletin. – 1898. – Vol. 34. – P. 114–219.
63. *Schultz-Ela D.D., Walsh P.* Modeling of grabens extending above evaporites in Canyonlands National Park, Utah // Journal of Structural Geology. – 2002. – Vol. 24. – № 2. – P. 247–275.
64. *Scrope G.P.* Considerations on Volcanos. – London: Printed and published by W. Phillips, 1825.
65. *Stewart S.A.* Salt tectonics in the North Sea Basin: a structural style template for seismic interpreters // Special Publication of the Geological Society. – London. – 2007. – Vol. 272. – P. 361–396.
66. *Stille H.* Injektivfaltung und damit zusammenhangende Erscheinungen // Geologische Rundschau. – 1917. – № VIII.
67. *Stille H.* The Uprthrust of the Salt Masses of Germany // AAPG Special Volumes. – 1926. – Vol. SP 1: Geology of Salt Dome Oil Fields. – P. 142–164.
68. *Stille H.* The upthrust of salt masses of Germany // Bull. AAPG. – 1925. – Vol. 9. – P. 417–441.
69. *Stovba S.M., Stephenson R.A.* Style and timing of salt tectonics in the Dniepr-Donets Basin (Ukraine): implications for triggering and driving mechanisms of salt movement in sedimentary basins // Mar. Petrol. Geol. – 2003. – Vol. 19. – P. 1160–1189.
70. *Talbot C.J.* Sliding and other deformation mechanisms in a glacier of salt, S Iran // In Thrust and Nappe Tectonics (eds. *K.R. McClay, N.J. Price*), Geological Society of London, Special Publication no. 9. 1981. – P. 173–183.
71. *Trudgill B.D.* Structural Controls on Drainage Development in the Canyonlands Grabens of Southeast Utah // Canyonlands Research Bibliography. Paper 285. – 2002.
72. *Trusheim F.* Uber Halakinese und ihre Bedeutung fur die strukturelle Entwicklung Norddeutschlands // Zeitschrift deutsch.geol. Ges. – 1957. – Bd. 109.
73. *Trusheim F.* Mechanism of salt migration in Northern Germany // Bull. AAPG. – 1960. – Vol. 44. – № 9.
74. *van Bemmelen R.W.* The Geology of Indonesia, 2 vols, The Hague: Goff. Printing Office, Lolage. 1949.
75. *van Bemmelen R.W.* Tectogenese par gravite // Bull. Soc. Geol. Belge – 1955. – № 64. – P. 95–123.
76. *Vendeville B.C., Jackson M.P.A.* The rise of diapirs during thin-skinned extension // Marine and Petroleum Geology. – 1992. – Vol. 9. – № 4. – P. 331–353.
77. *Walsh P., Schultz-Ela D.D.* Mechanics of graben evolution in Canyonlands National Park, Utah // GSA Bulletin March. – 2003. – Vol. 115. – № 3. – P. 259–270.

78. Woodward N.B., Boyer S.E., Suppe J. An outline of balanced cross-sections // University of Tennessee Department of Geological Sciences Studies in Geology. – 1985. – 170 p.

**MAIN MECHANISMS TYPIFICATION OF WORLD SALT TECTONICS:
VERKHNEKAMSKOE DEPOSIT AS STANDARD OF MULTI-STAGE
GRAVITATIONAL SLIDING**

I.I. Tchaikovski

We provided review and typification of the main types of salt structures, genesis of which are connected with action of six mechanisms: 1) gravity advection (salt dome tectonics, Trusheim' halokinesis, Jackson's active diapirism); 2) gravity advection provoked by a cross bending and upper-salt thickness expansion (salt dome tectonics connected with block motions in basement, Jackson's reactive diapirism); 3) longitudinal compression (Mrazek's diapirism, compression salt tectonics); 4) laminated strike-slip with shearing-off (shearing tectonic of the Jurassic type); 5) gravity current and gliding (gravity gliding tectonic); 6) salt dissolving (tectonic of salt structure degradation).

Comparison of mechanisms of the main tectonic events shown on the Verkhnekamskoe deposit with assigned tectonic types allows to suggest that at the end of the bereznikovskoe time there was a salt body slipping to the center of the Solikamskaya basin like the Iranian salt glaciers, during the sheshminsky time – formation of contemporaneous strike-slip faults of Durinsky and Borovitsky troughs, and in Pleistocene – slipping of upper-salt thickness along the salt table like shearing tectonic of the Jurassic type. However in all cases the main mechanism was gravity sliding which in time was displaced from a salt deposit bottom to its roof.

Keywords: diapirism, shearing tectonic, gravity gliding, structure degradation, Verkhnekamskoe deposit.

Сведения об авторах

Чайковский Илья Иванович, доктор геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией геологии месторождений полезных ископаемых, Горный институт УрО РАН (ГИ УрО РАН), 614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78А; e-mail: ilya@mi-perm.ru

Материал поступил в редакцию 05.02.2013 г.