СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ ЭКРАНИРОВАНИЯ ЗАЛЕЖЕЙ УГЛЕВОДОРОДОВ РАЗРЫВНЫМИ НАРУШЕНИЯМИ

E.Б. Риле ИПНГ РАН, e-mail: Rile@ipng.ru

Проблема экранирования залежей углеводородов разрывными нарушениями (PH) чрезвычайно актуальна: такие залежи (в России принято называть их «тектонически экранированными») широко распространены во всех бассейнах мира.

Термин «тектонически экранированные» залежи неудачен, так как в строгом смысле тектонически экранированными являются все структурные залежи — они экранируются либо пликативными (замыкание антиклинали), либо дизъюнктивными образованиями.

Как правило, в России никаких специальных исследований по выявлению экранирующей способности РН, даже при подсчете запасов месторождений, не проводится, — залежь, контактирующая с РН, автоматически классифицируется как тектонически экранированная (рис. 1); при этом вопросы о том, какая часть РН является экранирующей и почему, где прекращается экранирование, что определяет высоту залежи и т.д., даже не ставятся. Известно лишь несколько работ, приближающихся к решению этих вопросов. Тщательно изучены тектонофизические параметры разломов, связанные с разломами рудные месторождения, процессы, происходящие с материалом внутри разломов, но все это практически не имеет отношения к экранированию залежей. Строение залежей, нарушенных разломами, подробно рассматривается теорией трехслойного строения природных резервуаров [1,4,6,7]. Ее положения будут рассмотрены ниже.

Зарубежные исследователи, как правило, более внимательно относятся к оценке экранирующей способности РН; методика оценки экранирующих свойств РН разрабатывается с 80-х годов прошлого столетия (G. Yielding, B. Freeman, J.D. Bouvier, D.T. Needham, J.R. Fulljames и другие исследрватели). В декабре 2002 г. Американская ассоциация геологов-нефтяников (ААРG) провела конференцию «Оценка экранирующего потенциала разломов и покрышек для углеводородов» в Австралии. Три конференции были проведены Европейской ассоциацией ученых-геологов и инженеров (EAGE) во Франции: «Покрышки и экранирующие разломы: что мы знаем и куда шагаем?» (2003); «Покрышки и экранирующие разломы: от масштаба пор до масштаба бассейна» (2009); «Покрышки и экранирующие разломы: от изучения к моделированию» (2012).

На последней конференции было представлено 69 докладов по следующим группам вопросов. 1. Исследование конкретных покрышек и экранирующих сбросов. 2. Геомеханичекое моделирование при оценке покрышек. 3. Выявление, контроль и моделирование просачивания флюидов сквозь разломы и покрышки. 4. Новые разработки в исследовании экранирующих разломов и покрышек. 5. Исследования свойств экранирующих разломов и покрышек в обнажениях и лабораториях. 6. Методики оценки рисков и неопределенностей. Это разделение условно, так как в большинстве докладов освещались и вопросы моделирования, и конкретные покрышки и разломы, и новые разработки, и методики оценки рисков. Многие выступления были посвящены разработке методологий, приемов, позволяющих прогнозировать экранирующие свойства РН.

Около трети докладов было сделано норвежскими учеными, примерно седьмая часть – учеными из Великобритании; российских докладов представлено не было.

Основой для определения экранирования залежей РН служат представления о том, что разлом будет экранирующим в двух случаях: если через его плоскость в контакт с коллектором пришла глина, соль или другая покрышка (пассивное экранирование) и если в плоскости сместителя образовалась глинистая слабопроницаемая масса, достаточная для экранирования залежи УВ.

Для выяснения первого параметра строится схема контактирующих пород вдоль всей поверхности РН (рис. 2).

Выделен участок контакта коллекторов друг с другом. Видно, что уровень ГВК совпадает с верхней частью этого участка. Вверху 3D проекция кровли красного лежня структур Физзи и Оук, южная часть Северного моря (по P.G. Bretan, «Integrity of Faulted Traps for CO₂ Storage»).

Второй параметр определяется процентным содержанием глин в интервале, равном смещению по разлому (Shale Gouge Ratio): чем больше содержание глин в смещенном интервале, тем выше экранирующие свойства РН [8].

Главная задача большинства предложенных методологий – рассчитать содержание глин в интервале, равном амплитуде смещения, и сравнить его с месторождениями, для которых установлено экранирование разломом.

Учитываются также и другие параметры – разница давления в крыльях разлома, тектоническая история.

В качестве конкретных примеров рассматривались месторождения Северного моря, Северогерманского газового бассейна, Западно-Хаммерфестского бассейна, Дэнишского центрального грабена и других регионов.

Доклад, представленный норвежскими учеными О.П. Веннбергом, Дж.И. Логстеном и Н. Хашеми, был посвящен российскому Харьягинскому месторождению (Тимано-Печорская НГП).

Харьягинское месторождение имеет сложное строение. Над тектонической субмеридиональной брахиантиклиналью в среднем девоне сформировался субширотный риф, южное крыло которого интенсивно нарушено нормальными сбросами с амплитудой смещения до 50 м. Верхнедевонский карбонатный интервал месторождения весьма неоднороден, разбит трещинами, затронут карстовыми процессами. Авторы изучали строение зон разломов и их экранирующие свойства в карбонатной верхнедевонской части разреза, для того чтобы избежать прорывов воды в эксплуатационных скважинах. Для исследования быстрого потока флюидов в трещинах и медленного – в породах было выполнено моделирование двойного непрерывного потока. Высокое соответствие смоделированных и реальных условий удалось достичь, сделав на модели непроницаемыми для перпендикулярного проникновения все разломы (рис. 3).

Было установлено, что зоны разломов имеют следующее строение: плоскость сместителя, по которой происходит максимальное смещение (на рис. 4 обозначен цифрой 2), центральная зона (fault core), сложенная главным образом слабопроницаемыми катакластическими породами без какой-либо седиментационной структуры (3), переходная зона (4) и зона разрушения с высокой трещиноватостью и прослеживающимися седиментационными структурами, обладающая высокой проницаемостью (1 и 5). Центральная зона в карбонатах характеризуется очень низкой проницаемостью, связанной с уменьшением размеров зерен во время формирования сброса, кальцитовой цементацией и, по мнению авторов, может служить барьером для миграции флюидов.

Зоны разрушения, наоборот, характеризуются высокой концентрацией трещин, часто открытых, и образуют каналы для движения флюидов. Таким образом, сбросы оказывают двойственное влияние на миграцию флюидов в карбонатных коллекторах — как каналы для параллельного потока (зоны дробления) и как барьеры для перпендикулярного потока (центральные зоны).

Внимание многих исследователей привлекают экранирующие свойства разломов в связи с устройством газохранилищ (Ф.В. Корона и др. «Падение давления в блоках по разные стороны сброса, цехштейн, карбонатный коллектор, территория Везер-Эмс, Северогерманский газовый бассейн»).

В докладе П. Бретана «Целостность приразломных ловушек для хранения СО2» ставится вопрос, не вызовет ли закачка газа активизации разломов и, соответственно, утечку газа. Созданы методология построения трехмерных моделей разлома и его обрамления и алгоритмы прогноза экранирующих свойств разлома при возрастании давления. Эта методология, включающая исследование различных характеристик РН, подробно рассмотрена на примере месторождения Тролль (северная часть Северного моря) (рис. 5).

Вопросам геомеханического моделирования при оценке покрышек и разломов посвящены доклады С. Боттера и др. «Механическое моделирование и сейсмическое изображение зон сбросов», М. Велча и др. «Значение геомеханического моделирования свойств сбросов для анализа ловушек», М. Лейри и др. «Сплошность покрышки – новые достижения в геомеханическом моделировании».

В разделе «Выявление, контроль и моделирование просачивания флюидов сквозь разломы и покрышки» представлены доклады Г. Тейджа и др. «Просачивание сквозь мембранную нетрещиноватую покрышку путем образования проходов нефть—вода», К.Д. Куртева и др. «Протекающие покрышки — доказательства, скорости и механизмы», О.И. Фретта «К более реалистичной модели процессов просачивания сквозь покрышку».

В докладе Т. Манзоччи и С.Дж. Чилдса «Как часто встречается прорыв экранирующего сброса за счет капиллярных сил в результате добычи?» приводятся причины, по которым экранирующие ранее разломы перестают быть экранами в результате добычи УВ.

Случай современного активного поступления УВ в ловушки с активными разломами описан на примере месторождений Нансен и Бумванг в Мексиканском заливе в докладе С. Уилкинса и др. «Экранирующие свойства разломов и покрышек на месторождениях Нансен-Бумванг, Восточные Разломы, Мексиканский залив». При использовании 3D сейсмики, 20 скважин и результатов петрофизических анализов создана кинематически жизнеспособная структурная и стратиграфическая модель, с помощью которой в дальнейшем выполнялись оценки рисков в аналогичных ситуациях.

В докладе Р. Рое и др. «Создание нового алгоритма для расчетов экранирующих сбросов внутри структурной модели» предлагается все параметры рассчитать на двухмерной модели плоскости разлома, а затем привести ее в реальное положение с учетом смещения и ширины зоны разлома.

В раздел «Исследования свойств экранирующих разломов и покрышек в обнажениях и лабораториях» вошли доклады К.Дж. Фишера и др. «Проницаемость сбросов и глинистых покрышек – где мы находимся», в котором поднимается вопрос о соответствии условий проведения экспериментов в лаборатории реальным условиям, Ф. Бальзамо и др. «Связанные с разломами адвективное и диффузионное течения флюидов, изученные по железистых конкрециям и кольцам Лизеганга в слабо литифицированных песках» и «История палеопотоков флюидов протяженной системы сбросов, изученная по карбонатным конкрециям в мелководных морских осадках Италии», где приводятся результаты исследований палеоперетоков, свидетельствующие о том, что зоны разломов имеют сложное строение и сложную неоднозначную историю, служат то проводящими путями, то барьерами, то одновременно барьерами и проводящими путями.

На конференции предлагалось несколько вариантов программного обеспечения, например в докладе П.С. Д'Онфро и др. «Интегрированные анализы герметичности – Вики – доступные методологии и приемы для анализа покрышек и экранирующих сбросов во время эксплуатации».

Параметры разлома, которые должны быть изучены для оценки его экранирующих свойств, обобщены С. Гаутом в докладе «Разлом как объект – шаг вперед к генерализованной модели разломов».

Описанная малая часть огромного объема исследований, проводимых за рубежом, демонстрирует важность, сложность и неоднозначность проблемы экранирования залежей УВ разрывными нарушениями.

Развиваемая в России с 80-х годов прошлого столетия теория трехслойного строения природных резервуаров [1, 4, 6, 7], выделяющая между коллектором и истинной покрышкой промежуточный слой – ложную покрышку и устанавливающая четкие соотношения между параметрами залежи УВ, с одной стороны, и параметрами антиклинали и природного резервуара, с другой стороны, утверждает, что РН не экранируют залежи УВ и нарушенные разломами залежи сохраняются только в том случае, если в контакт через

плоскость разлома приходят две истинные покрышки. В противном случае залежь ниже уровня пересечения РН подошвы истинной покрышки разрушается (рис. 6).

Чаще всего тектонически экранированная модель залежи создается в том случае, если наблюдается несоответствие между незначительной амплитудой нарушенной РН антиклинали и намного превышающей ее высотой насыщенного УВ столба пород (рис. 7, слева). На основании разностороннего и разномасштабного (детального, локального, зонального) изучения подобных залежей теория трехслойного строения природных резервуаров предлагает альтернативные модели (рис. 7, справа) [5].

Поскольку теория трехслойного строения ПР устанавливает четкие количественные соотношения между элементами структуры, литологией и параметрами залежей, становится возможным в сложнопостроенных месторождениях УВ, разбитых на блоки, выяснить, чем именно контролируется каждая залежь, и доказать, что залежи, считающиеся тектонически экранированными, являются обычными пластовыми сводовыми или массивными залежами. Для этого необходимо сравнить смещение по каждому конкретному РН с толщиной ИП и делать вывод о влиянии этого РН на сохранность залежи УВ.

Встречаются месторождения, имеющие блоковое строение, с большой разницей уровней контактов УВ-вода на соседних участках, разделенных РН (например, восточная часть Оренбургского месторождения), для которых не удается создать непротиворечивую альтернативную модель [3]. Это связано с тем, что на участках таких месторождений и в настоящее время происходит поступление УВ и их геофлюидальные системы еще не достигли равновесия.

Разрывные нарушения, как правило, не экранируют залежи УВ. Разломы, нарушающие истинные покрышки, имеющие амплитуды смещения меньше толщин истинных покрышек, не влияют на параметры залежей. РН с амплитудой смещения, превышающей толщину истинной покрышки, разрушает часть залежи. Критическая седловина сохранившейся части залежи находится на уровне пересечения этим РН подошвы истинной покрышки.

Залежи, классифицируемые как тектонически экранированные, в большинстве случаев таковыми не являются.

Разломы могут только временно, в масштабе времени единиц-десятков лет, контролировать залежи УВ. Такие залежи эфемерны, они либо разрушаются во время разработки, либо существуют за счет современного непрерывного подтока УВ.

В каждом конкретном случае необходимо искать, чем именно контролируется каждая залежь УВ. Теория трехслойного строения природных резервуаров позволяет определить это наиболее достоверно, устанавливая количественные отношения между параметрами залежей, элементами природного резервуара и структурными построениями. От того, в какой степени созданная модель соответствует реальной картине, зависит и точность подсчета запасов, и оценка рисков, и выработка стратегии разработки месторождения.

Современное состояние проблемы экранирования залежей УВ разрывными нарушениями оставляет нерешенными вопросы: экранируют разломы залежи УВ в геологическом времени или только в масштабе времени разработки месторождения; и экранируют ли вообще; а если да — то почему. Для решения этих вопросов требуются дальнейшие детальные всесторонние исследования с созданием различных вариантов моделей конкретных месторождений.

ЛИТЕРАТУРА

- 1. Локальный прогноз нефтегазоносности на основе анализа строения ловушек в трехслойном резервуаре: Методические рекомендации / В.Д. Ильин и др. М.: ВНИГНИ, 1982.
- 2. Материалы 3-й междунар. конф. EAGE «Fault and Top Seals». October 1-3, 2012, Montpellier (France).
- 3. Подкорытов Н.Г., Риле Е.Б., Фугенфирова С.М., Левшунова С.П. Геологическое строение и современные процессы переформирования флюидальной системы крупной нефтяной залежи на востоке Оренбургского вала // Геология и направления поисков нефти и газа. М., 2003. С. 59-71.
- 4. Прогноз нефтегазоносности локальных объектов на основе выявления ловушек в трехчленном резервуаре: Методические указания / В.Д. Ильин и др., М.: ВНИГНИ, 1986.
- 5. *Риле Е.Б.* Альтернативные модели некоторых тектонически экранированных залежей УВ Тимано-Печорской НГП // Геология, геофизика и разраб. нефт. и газовых месторождений. 2012. № 6.
 - 6. Филиппов Б.В. Типы природных резервуаров нефти и газа. Л.: Недра, 1967.
- 7. *Хитров А.М., Ильин В.Д., Савинкин П.Т.* Выделение, картирование и прогноз нефтегазоносности ловушек в трехчленном резервуаре: Методическое руководство. М.: М-во природ. ресурсов РФ, М-во энергетики РФ, ВНИГНИ, 2002.

8. Yielding G., Freeman B., Needham D.T. Quantitative Fault Seal Prediction // AAPG Bull. 1997. Vol. 81(6). P. 897-917.

ПРИЛОЖЕНИЕ

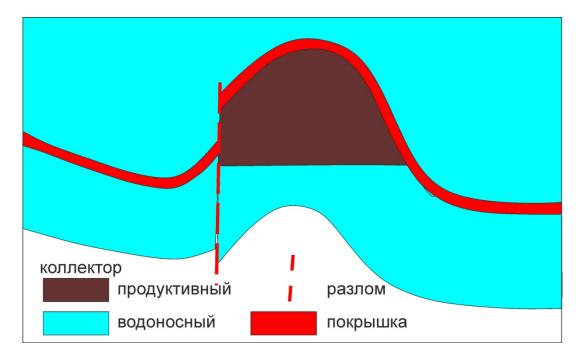


Рис. 1. Тектонически экранированная залежь УВ

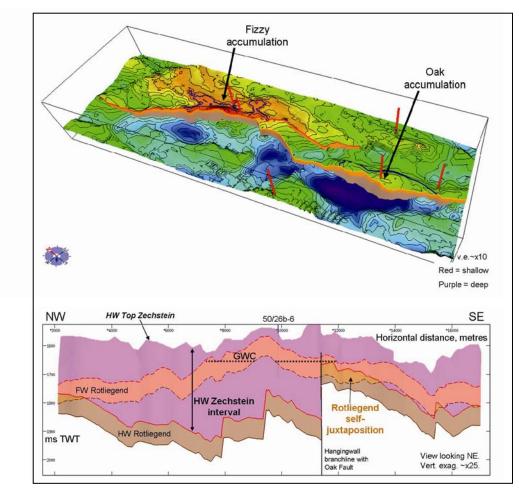


Рис. 2. Структуры Физзи и Оук, южная часть Северного моря.

Вверху 3D проекция кровли красного лежня, внизу схема контактирующих через плоскость разлома пород — газосодержащих коллекторов красного лежня в опущенном блоке и эвапоритов цехштейна в приподнятом блоке вдоль всей поверхности разрывного нарушения (по P.G. Bretan, «Integrity of Faulted Traps for CO₂ Storage»)

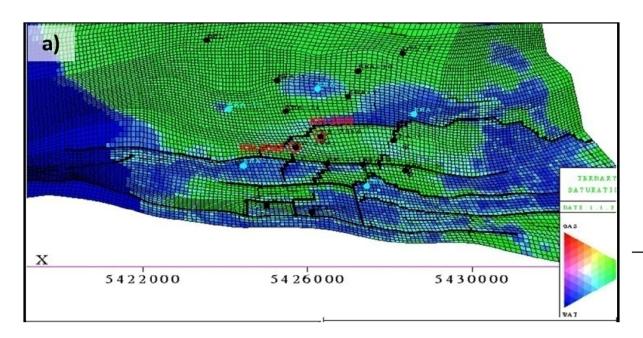


Рис. 3. Распределение нефти и воды в верхнедевонских карбонатах Харьгинского месторождения после 10 лет эксплуатации, согласно модели, представляющей разломы как барьеры (по О.Р. Wennberg, 2012, с изменениями)

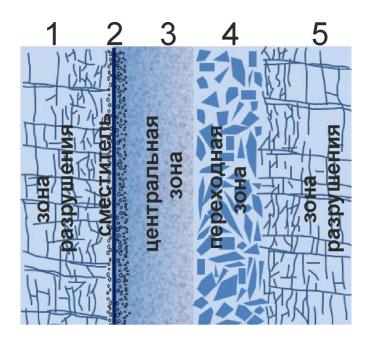


Рис. 4. Строение зоны разлома в карбонатах (по О.Р. Wennberg, 2012, с изменениями)

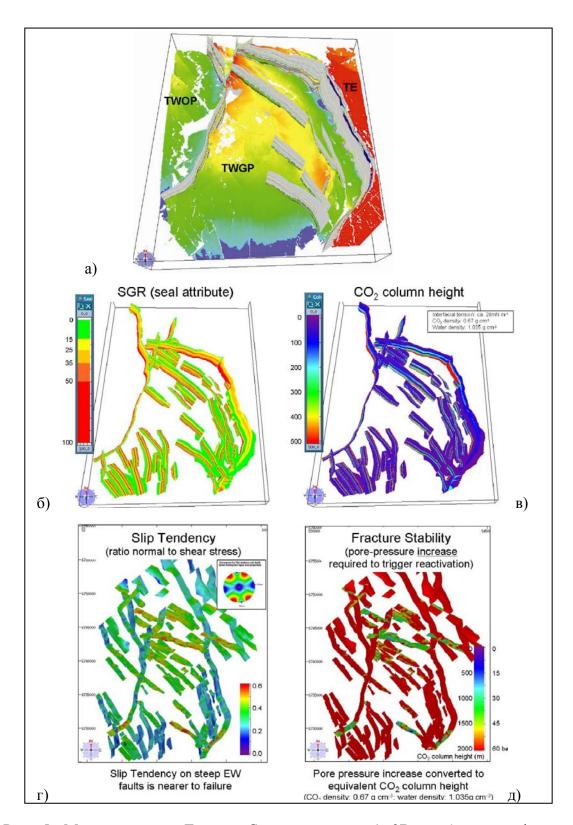


Рис. 5. Месторождение Тролль, Северное море: а) 3D изображение формации Йохансен; б) процентное содержание глин в разрезе; в) максимальная высота столба CO₂; г) тенденция к смещению по плоскости сместителя; д) стабильность (увеличение порового давления, способное вызвать активизацию) (по P.G. Bretan, 2012, с изменениями)

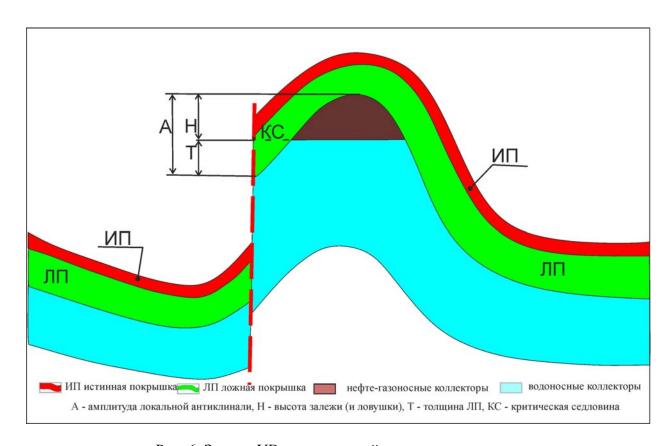


Рис. 6. Залежь УВ в нарушенной разломом структуре

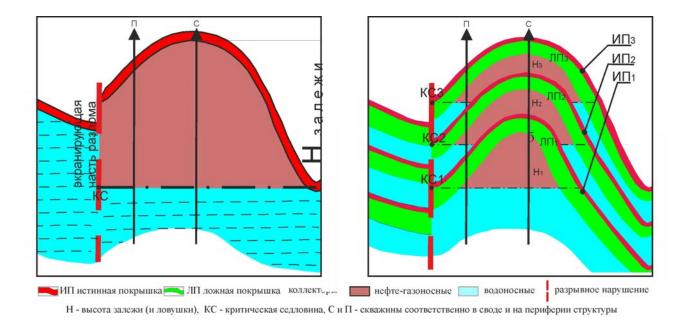


Рис. 7. Две модели месторождения УВ в структуре, осложненной разрывным нарушением а) традиционная модель: природный резервуар имеет двучленное строение; считается, что разлом играет роль экрана, структура содержит тектонически экранированную залежь, высота которой превышает амплитуду антиклинали по кровле коллектора;

б) модель, созданная на основании концепции трехслойного строения природных резервуаров: в пределах структуры существуют три самостоятельных локальных природных резервуара, экранированных тремя локальными истинными покрышками, критические седловины находятся в точках пересечения истинных покрышек разломом, разлом экраном не является. Месторождение содержит три залежи, высота каждой из которых равна разности амплитуды ненарушенной части антиклинали по подошве соответствующей истинной покрышки и толщины ложной покрышки