

## **ЭКРАНИРОВАНИЕ ЗАЛЕЖЕЙ УГЛЕВОДОРОДОВ РАЗРЫВНЫМИ НАРУШЕНИЯМИ – ЧЕТВЕРТАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ EAGE В ИСПАНИИ**

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

Европейская ассоциация геочеленых и инженеров EAGE каждые три года проводит конференцию, посвященную оценке экранирующих свойств разломов и покрышек («Fault and Top Seals»). В конце сентября 2015 года в Альмерии (Испания) состоялась четвертая конференция «Fourth International Conference on Fault and Top Seals: Art or Science?» («Покрышки и экранирующие разломы: наука или искусство?») (Abstr., 2015).

Общее состояние проблемы экранирующих свойств разломов и прошлые конференции на эту тему были рассмотрены в статье (Риле, 2013), написанной после прошлой (третьей) конференции (в 2012 г. во Франции).

На четвертой конференции было представлено 57 докладов (35 устных и 22 стендовых) по следующим группам вопросов: 1. Карбонатные породы, нарушенные разломами; 2. Реактивация и экранирующие свойства разломов; 3. Детали строения зон разломов; 4. Просачивание флюидов сквозь зоны разломов; 5. Использование геофизических методов; 6. Важность исследования экранирующих свойств разломов и покрышек. Это разделение условно, так как в большинстве докладов освещались и вопросы моделирования, и конкретные покрышки и разломы, и новые разработки, и методики оценки рисков.

Российские геологи присутствовали на третьей конференции в 2012 г, но российских докладов тогда не было. На третьей конференции большая часть докладов была сделана норвежскими учеными, в 2 раза меньше – англичанами, а на четвертой, напротив, – треть докладов принадлежит английским ученым и в 2 раза меньше – норвежским. При этом два доклада сделаны российскими учеными (из Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука (ИНГГ СО РАН), г. Новосибирск, и из Института проблем нефти и газа Российской академии наук (ИПНГ РАН), г. Москва).

Большая часть выступлений посвящена разработке методологий, приемов, позволяющих прогнозировать экранирующие свойства разрывных нарушений (РН).

Главным подходом к исследованию заполнения ловушек среди зарубежных ученых является определение высоты столба углеводородов (УВ), который может выдержать

экран – покрывка или экранирующий сброс. Проблема существует в двух вариантах – современное недолговременное (десятки лет) экранирование разломами скоплений УВ (или углекислого газа) и экранирование залежей УВ в геологическом времени.

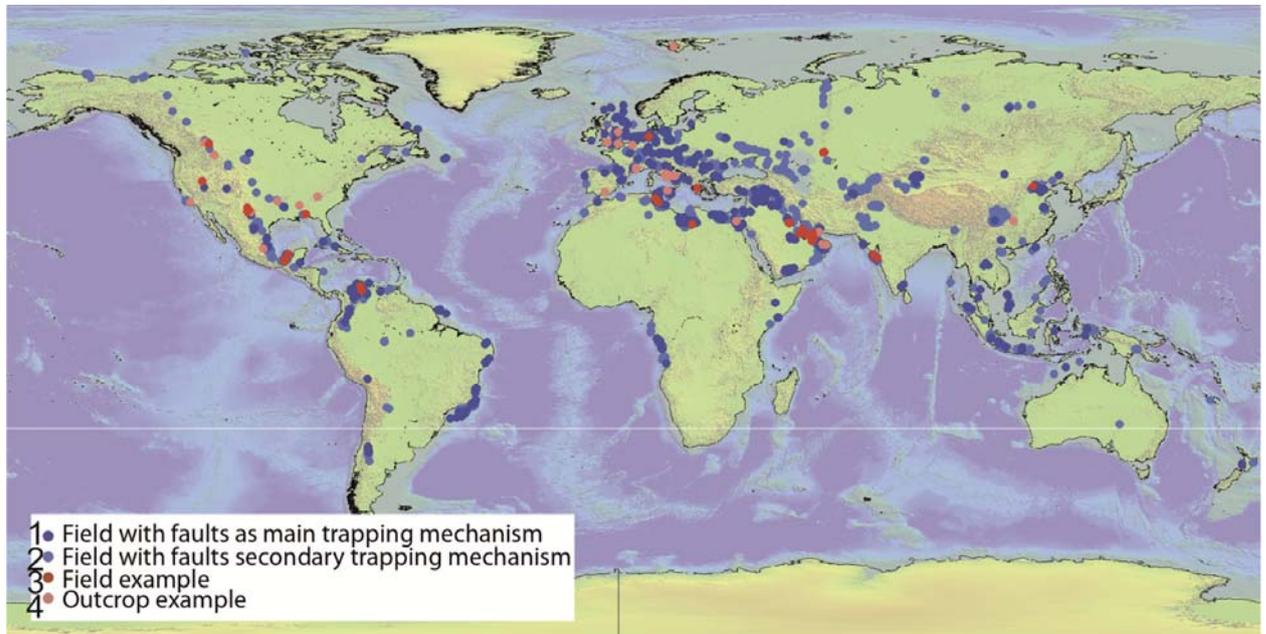
На третьей конференции по покрывкам и экранирующим сбросам, проведенной в 2012 г. (Риле, 2013), рассматривались основные механизмы формирования экранирующей способности разломов – пассивное экранирование (если через плоскость разлома в контакт с коллектором пришла глина, соль или другая покрывка) и активное (если в плоскости сместителя образовалась масса перетертого материала, достаточная для экранирования залежи УВ). Для выяснения первого параметра строится схема контактирующих пород вдоль всей поверхности РН. Вторым параметром определяется процентным содержанием глин в интервале, равном смещению по разлому (Shale Gouge Ratio): чем больше содержание глин, тем выше экранирующие свойства РН.

На четвертой конференции, посвященной данной проблеме, в большей части докладов также рассматривались вопросы развития существующих методик и разработки новых (доклады Н. Anderson & С. Reilly «Growth Juxtaposition Diagrams – A New Angle on an Old Technique» («Диаграммы контакта пород через плоскость разлома – старая методика под новым углом зрения»), S.A. Weihmann & D. Healy «Predicting Hydraulically Conductive Fractures – A Comparison of Methods» («Прогноз гидравлически проводящих трещин – сравнение методик»), P.G. Bretan «An Innovative Approach for the Prediction of Column Heights in Multi-fault Traps Using Deterministic Fault Seal Analysis Session: The Importance of Fault and Top Seals» («Инновационный подход к прогнозу высоты столба УВ в ловушках, нарушенных множеством разломов, с применением детерминистского анализа экранирующей способности разломов») и другие).

J.S. Davis & F.V. Corona сделали обобщающий доклад («The Importance of Fault and Top Seals») о важности исследований экранирующей способности сбросов и покрывок, о различных методах исследований, они предложили интересный способ прогноза фазового состояния флюидов по свойствам покрывок, основанный на предположении, что в областях развития залежей, содержащих нефть и газ, газ будет просачиваться через покрывки худшего качества и удерживаться высококачественными покрывками.

Строение разломных зон в карбонатах гораздо сложнее, чем в обломочных породах, это связано с большей химической активностью карбонатов. Подробнее всего особенности строения зон РН в карбонатах рассмотрены в статье J.G. Solum «Static and

Dynamic Fault Seal Potential in Carbonates» («Потенциал статической и динамической экранирующей способности разломов в карбонатах»). Он приводит схему распространения месторождений и обнажений, на которых проводились исследования экранирующих свойств РН в карбонатах (рис. 1).



1. Месторождения УВ, которые экранируются главным образом разломами;
2. Месторождения УВ, которые частично экранируются разломами;
3. Примеры месторождений; 4. Примеры в обнажениях

Рис. 1. Распространение месторождений УВ, частично или полностью экранированных разрывными нарушениями, в карбонатах (по J.G. Solum, 2015)

J.G. Solum отмечает, что обнаруживается все больше залежей УВ, экранированных хотя бы частично РН при контакте через плоскость разлома коллектор-коллектор. В связи с этим он разделяет разломные экраны на статические и динамические. Статические экраны способны удерживать колонну УВ в течение геологического времени, их качество оценивалось высотой колонны УВ. РН, представляющие собой динамические барьеры, способны поддерживать разницу в величинах давления в разделенных ими блоках лишь в течение периода, сравнимого по длительности с временем разработки месторождения.

J.G. Solum также подробно описывает механизмы формирования экранирующих свойств разломов в карбонатах и сравнивает их по значимости (рис. 2). Он делает вывод, что прогноз экранирующей способности РН, основанный на процентном содержании глин, хорошо работающий в областях развития обломочных пород, в случае карбонатов

также возможен, однако другие параметры могут быть важнее. Вероятно, наиболее важным является процесс залечивания зоны РН минеральными новообразованиями. Конечно, при последующей реактивации разломов в будущие тектонически активные эпохи они вновь станут проводящими, но возможна циклическая смена свойств разлома (временами он будет экранирующим, временами – пропускающим).

Это предположение о циклическом изменении свойств РН представляется очень интересным.

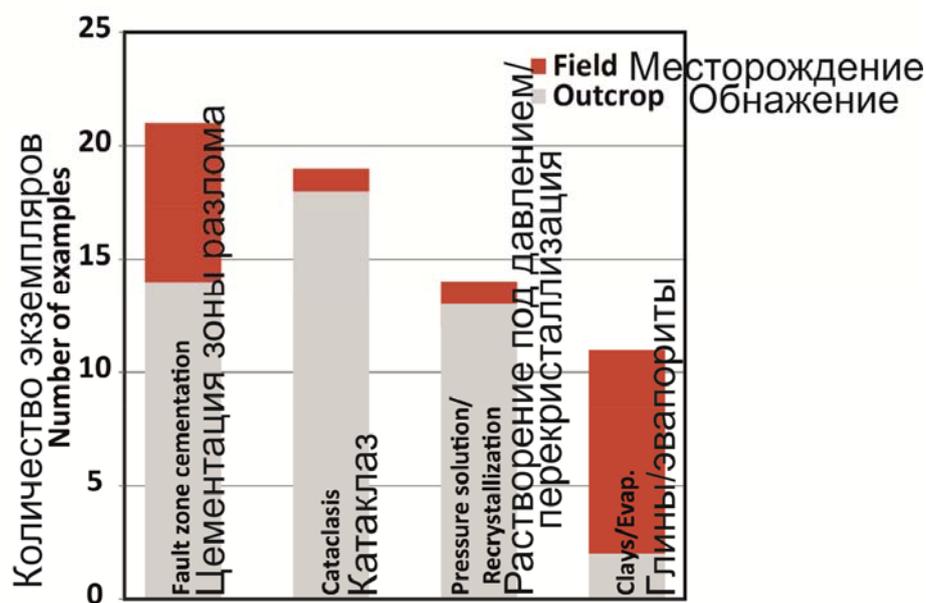


Рис. 2. Механизмы, обеспечивающие экранирующие свойства разрывных нарушений, на примерах месторождений и обнажений (по J.G. Solum, 2015)

Данному явлению – периодическому изменению свойств РН («Fault valving») – посвящен доклад J. Underschultz «Hydrodynamic Constraints on Fault Seal Analysis – Linking Capillary and Fault Reactivation Processes» («Гидродинамические ограничения анализа экранирующей способности разломов – процессы связывания капилляров и реактивации разломов»). Автором предложено определять риск просачивания флюидов сквозь РН при помощи анализа ключевых слабых участков, характеризующихся, как правило, аномальными величинами давления, температуры, или необычным составом вод.

Риск реактивации РН определяется ориентировкой его в существующем поле напряжений, при этом надо учитывать и увеличение давления всплывания при заполнении ловушки УВ – оно также может способствовать реактивации разлома.

Исследованию изменений свойств разломов во времени посвятили свой доклад «Changes in Reservoir Fault Seal Behaviour through Time, Offshore Congo» («Изменения во времени экранирующей способности разломов на шельфе Конго») ученые из Конго С.А.Ж. Wibberley, J. Gonzalez & O. Billon.

Большое внимание было уделено изучению возможности использования сейсмических методов для выяснения строения и развития зон РН в докладах Н. Joergensen & В. Alaei «Application of Seismic Attribute Volumes for Detailed Interpretation of Fault Interactions and Growth» («Применение значений сейсмических атрибутов для детальной интерпретации роста и взаимоотношений разломов»), Д. Колюхина с соавторами «Seismic Imaging of Fault Facies Models – A Pilot Study» («Сейсмическое изображение фаций зон разломов – экспериментальное исследование»), В. Yven, M.G. Garcia & A.C. Chabiron «Geometry and Rock Properties Modelling of the Callovo-Oxfordian Claystone from a 3D High Resolution Seismic Cube» («Моделирование геометрии и свойств пород каллово-оксфордских аргиллитов на основании 3D сейсмического куба высокого разрешения»).

Достаточно крупным был блок докладов о результатах экспериментальных исследований, среди них С. Delle Piane et al. «Frictional and Hydraulic Behaviour of Carbonate Fault Gouge During Fault Reactivation – An Experimental Study» («Фрикционное и гидравлическое поведение карбонатного выполнения зоны разлома во время реактивации разлома – экспериментальные исследования»), Е.А.Н. Michie «Using Field and Lab Data to Improve the Simulation of Faulted Carbonate Reservoirs» («Использование полевых и лабораторных исследований для усовершенствования моделирования карбонатных резервуаров, нарушенных разломами»), R.J. Cuss «Experimental Observations of the Flow of Water and Gas along Fractures in Shales and Clay Gouge» («Экспериментальные наблюдения над потоками воды и газа вдоль трещин в глинистой смазке»).

Большое количество докладов было посвящено влиянию деформационных полос («Deformation Bands») на проницаемость пород в зоне РН и вокруг нее, исследованному на примерах из разных стран (I. Kaminskaite, Q.J. Fishe & С.А. Grattoni «Deformation Bands in Chalk and Their Impact on Fluid Flow – An Example from Pegwell Bay, Kent» («Деформационные полосы в мелу и их влияние на поток флюидов на примере залива Пегуэлл, Кент»), Р. Edwards, D.J. Sanderson & Y.S. Kim «Permeability Heterogeneity in Fault Damage Zones and Its Relationship to Deformation Band Connectivity» («Гетерогенность

проницаемости в зонах разрушения РН и их отношение к связанности деформационных полос»), Z.D Liu, Y.H. Sun, X.F. Fu & L.D. Meng «Geological Condition and Characteristics for Formation of Deformation Bands – Example from Jizhong Depression, China» («Геологические условия формирования деформационных полос на примере Джизонгской депрессии, Китай») и другие).

Сейчас актуален вопрос о подготовке хранилищ для углекислого газа. В связи с этим в разных регионах мира проводятся исследования, направленные на поиски локальных структур, пригодных для хранения газа, и, соответственно, на оценку экранирующих свойств разломов, нарушающих эти структуры. При исследованиях суббассейна Петрел в северо-западной Австралии выяснилось, что наиболее погруженная западная часть бассейна имеет более благоприятные условия для размещения хранилищ для углекислого газа, были оконтурены площади, в высокой степени пригодные для создания газохранилищ, пригодные, возможно пригодные и вероятно непригодные. Это было рассмотрено в докладе G. Yielding et al. «Fault-seal Risk Analysis for CO<sub>2</sub> Storage in the Petrel Sub-basin, NW Australia» («Анализ рисков создания хранилищ для углекислого газа в суббассейне Петрел на основании оценки экранирующей способности разломов»).

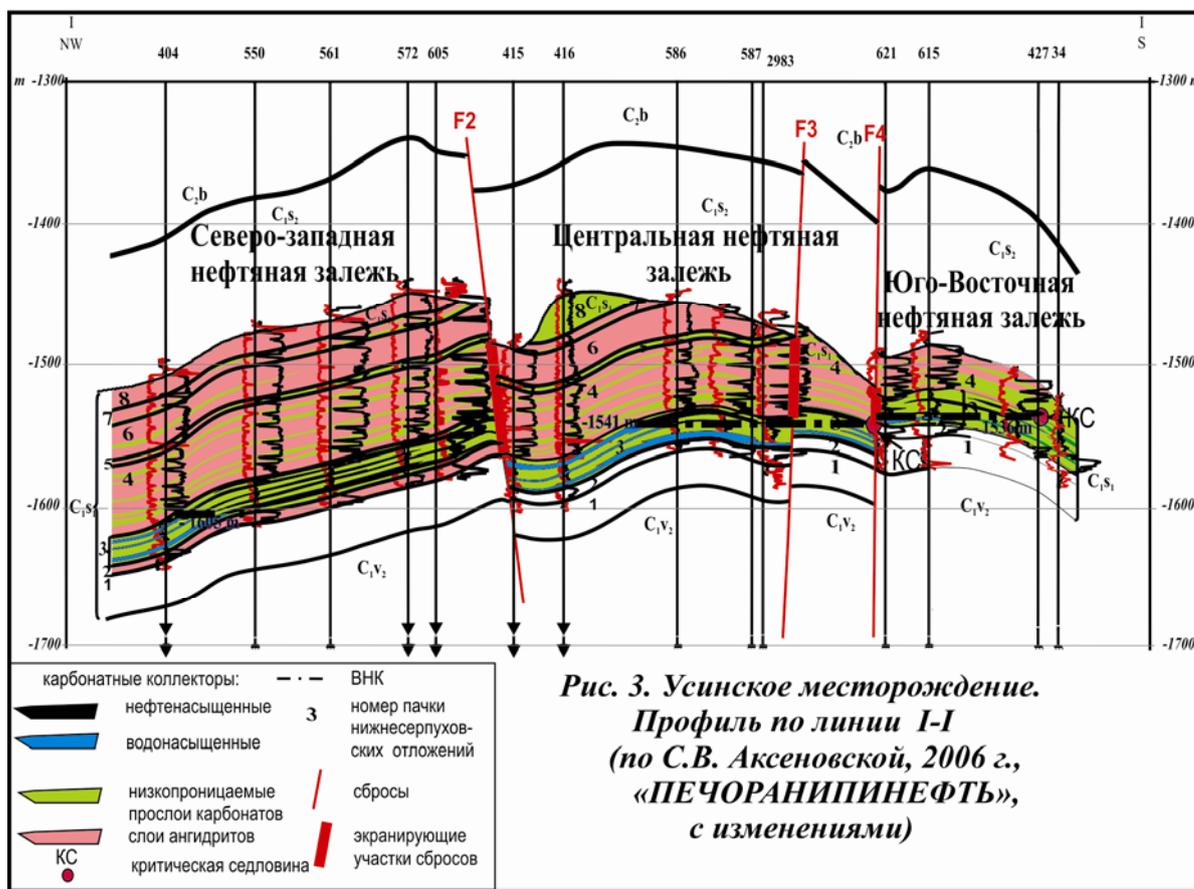
Результаты исследований уже используемых хранилищ углекислого газа приведены в докладе J.C. Choi et al. «Geomechanical Assessment of Flow Barriers Observed from 4D Time-lapse Survey for CO<sub>2</sub> Storage in Snøhvit Field» («Геомеханическая оценка барьеров для флюидов в хранилище углекислого газа на месторождении Сноувит на основании наблюдений покадровой съемки 4D»). Отмечено, что давление при закачке углекислого газа в газохранилище повышалось быстрее, чем ожидалось. Выяснилось, что при закачке газа нарушается равновесие и увеличивается вероятность активизации разломов.

Аналогичный геодинамический анализ, проведенный на плато Колорадо, был представлен в докладе J. Miosic et al. «Fault Seal Analysis of a Natural CO<sub>2</sub> Reservoir». Этот анализ показал, что утечка углекислого газа из газохранилища происходила от того, что нарушающий структуру сброс имеет ориентировку в существующем поле напряжений, благоприятную для его активизации.

Оценка экранирующей способности разломов необходима и для определения емкости хранилищ природного газа. L.D. Meng сделал доклад «Assessment of Fault-seal Integrity for Underground Storage of Natural Gas in Porous Sandstone» («Оценка надежности

экранирующего разлома для создания хранилища природного газа в пористом песчанике») об определении количества газа, которое можно безопасно закачать в газохранилище. В газохранилище Банжонгбей (Banzhongbei), ограниченном сбросами, с 2003 по 2013 гг. хранились излишки природного газа объемом  $7,7 \times 10^8 \text{ м}^3$ . Исследования экранирующей способности сбросов, основанные на измерении разницы давлений в разделенных ими блоках, показали, что максимальный объем газа, который можно безопасно закачать в газохранилище, составляет  $13,7 \times 10^8 \text{ м}^3$ .

В докладе Е.Б. Риле «Usinskoye Field (Timan-Pechora Province) – Lower Serpukhovian Oil Pools Sealing and Scattering» («Экранирование и рассеивание нижнесерпуховских нефтяных залежей Усинского месторождения») отражены механизмы экранирования залежей нефти – каждая из трех исследованных залежей экранируется отличным от других способом (рис. 3, 4).



Нижнесерпуховские отложения представляют собой толщу переслаивания карбонатов и ангидритов. Продуктивные карбонатные коллекторы сосредоточены в пачке

3, а истинной покрывшей для залежей УВ в пачке 3 являются перекрывающие их ангидриты пачки 4. Все три залежи сверху экранируются этой истинной покрывшей.

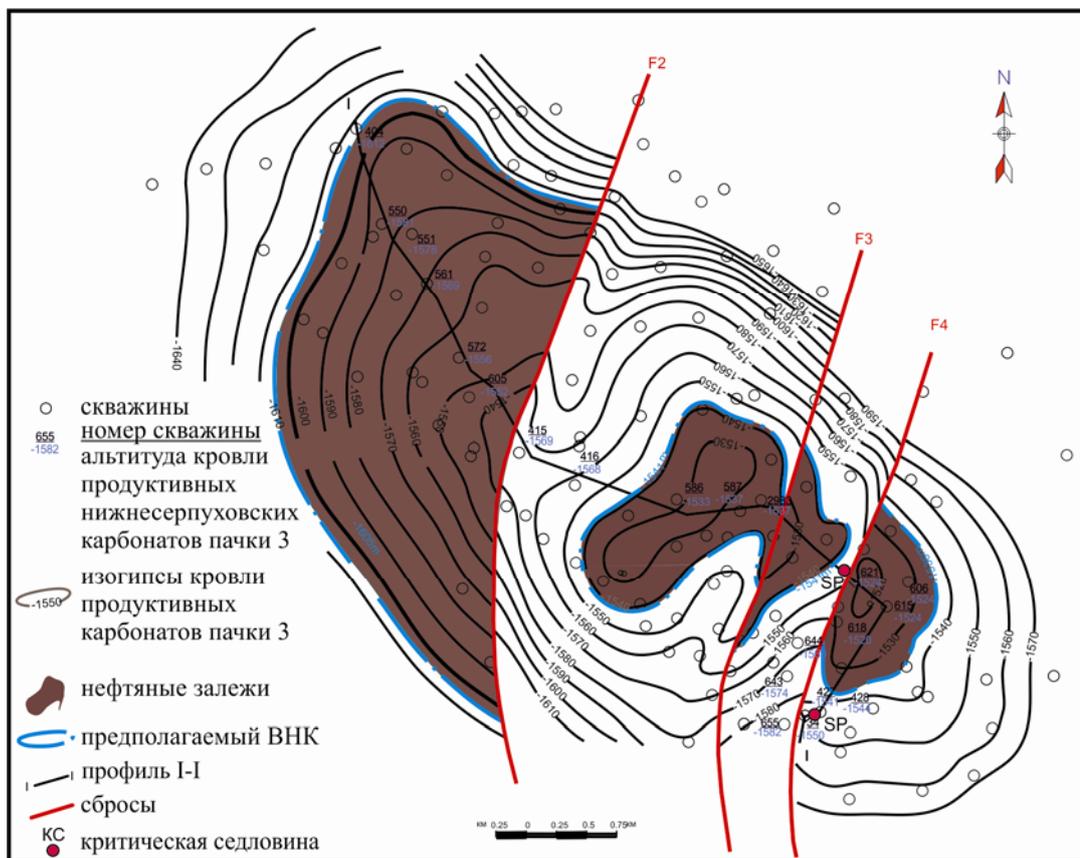


Рис. 4. Усинское месторождение.

Структурная карта по кровле продуктивных нижнесерпуховских карбонатов пачки 3 (по С.В. Аксеновской, 2006 г., «ПЕЧОРАНИПИНЕФТЬ», с изменениями)

Северо-западная залежь располагается на северо-западной периклинали Усинской брахиантиклинали, на приподнятом крыле, ограничена с юго-востока разломом F2, где в соприкосновение с залежами в карбонатах пачки 3 пришли ангидриты пачки 4 через плоскость разлома F2. Благодаря этому данная часть разлома является экранирующей.

Центральная залежь имеет сложное строение и состоит из 2-х частей, разделенных разломом F3. Оба блока имеют общий ВНК, уровень которого контролируется уровнем пересечения подошвы истинной покрывши разломом F4.

Северо-западная часть центральной залежи приподнята по разлому F3 и экранируется с северо-запада ангидритами пачки 4, контактирующими с проницаемыми карбонатами пачки 3 через плоскость разлома. Благодаря этому высота центральной залежи увеличена.

Юго-восточная залежь находится на юго-восточной периклинали Усинской структуры на приподнятом крыле, благодаря чему она экранируется с северо-запада частью разлома F4, так как в соприкосновение с залежами в карбонатах пачки 3 пришли ангидриты пачки 4 через плоскость разлома F4.

На крайнем юго-востоке Усинской структуры в скв. 34, 643, 644, 655 ангидриты пачки 4 замещаются карбонатами (рис. 5), здесь образуется гидродинамическое окно, подошва ангидритов до зоны замещения находится на абсолютной отметке (-1530)–(-1540) м. Соответственно, ВНК юго-восточной залежи, определенный на уровне -1536 м, контролируется уровнем подошвы ангидритов (истинной покрывки) перед зоной замещения.

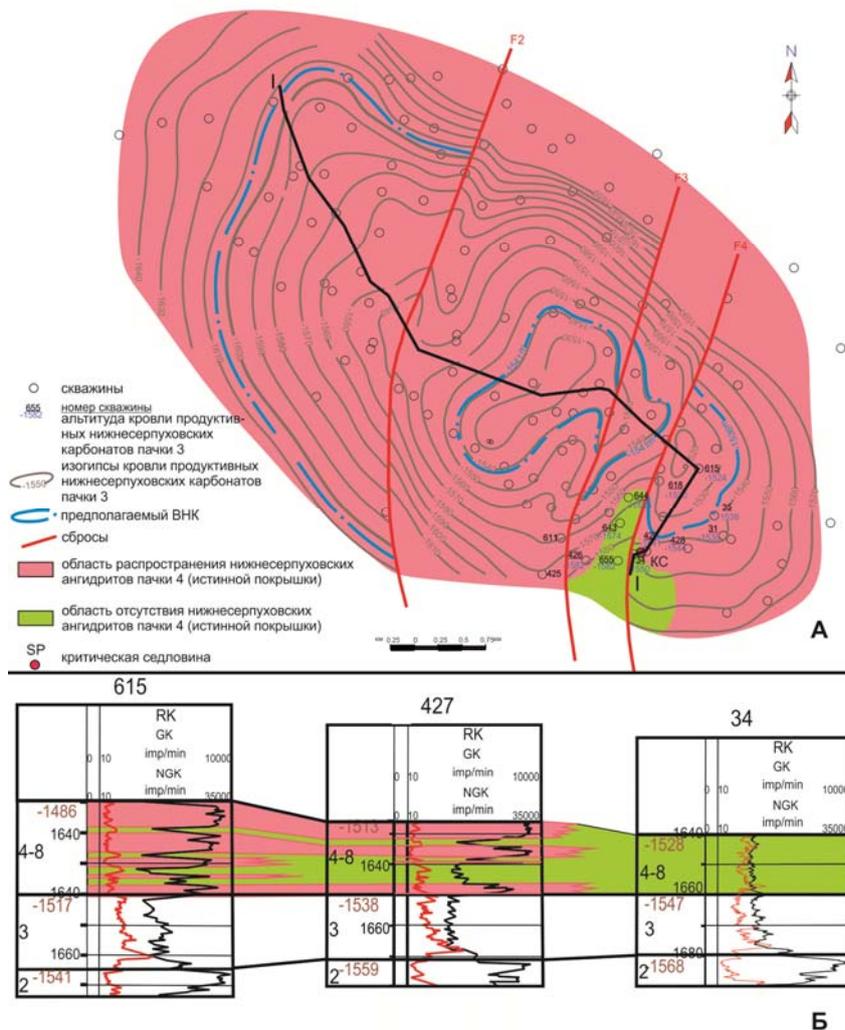


Рис. 5. Усинское месторождение:

А – области распространения и отсутствия нижнесерпуховских ангидритов пачки 4 (истинных покрывок для залежей в карбонатах пачки 3); Б – схема сопоставления данных

В случае нижнесерпуховских отложений Усинской структуры разломы играют, в основном, положительную роль в формировании залежей нефти. Для увеличения высоты залежи выгодно ее положение на приподнятом крыле разлома. Все три залежи заполнены до критической седловины, то есть на 100%.

### Дискуссия

На четвертой конференции EAGE был рассмотрен широкий круг вопросов, касающихся прогноза и определения экранирующей способности разломов и покрышек. Развиваются методики, совершенствуются сейсмические методы исследований, проводятся эксперименты. Очень важной представляется идея о циклическом изменении экранирующих свойств разломов, периодах реактивации и залечивания. Из этого следует вывод, что залежи УВ в ловушках, экранированных такими разломами, моложе, чем залежи, ненарушенные РН.

Однако ни в одном докладе, кроме российского, не было упомянуто трехслойное строение природных резервуаров – во всех примерах рассматривались только двуслойные природные резервуары и только в ответах на вопросы прозвучало признание более сложного строения толщ, перекрывающих коллектор, и существования ложных покрышек («waste zones»).

Согласно теории трехслойного строения природных резервуаров (Локальный..., 1982, Прогноз..., 1986, Хитров и др., 2002) РН, 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.

Наряду с этим, конференции, проводимые EAGE, показывают успешный прогноз экранирующих свойств разломов, проверяемый сохранностью запасов газа (в том числе и углекислого) в заполненных газохранилищах. Вероятно, это противоречие кажущееся – в теории трехслойного строения природных резервуаров предусматривается геологическое время, а прогноз экранирования производится, как правило, на гораздо более короткое время, сравнимое с временем жизни человека, разработки месторождения и т.д.

Возможно, что за это время система не успевает прийти в равновесие и разломы действуют как временные экраны.

В России тоже возникает проблема создания газохранилищ в структурах, нарушенных разломами, а значит, надо начинать использовать и развивать уже имеющиеся методики. Наша задача – распространять среди геологов других стран идею трехслойного строения природных нефтяных резервуаров и искать пути совместного с зарубежными учеными использования разных методических приемов для решения проблем оценки экранирующих свойств как покрышек, так и разрывных нарушений, как в геологическом времени, так и в более короткие промежутки времени для прикладных целей.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Abstr. of the EAGE Fourth International Conference on Fault and Top Seals: Art or Science? – Almeria (Spain). September 2015. – Режим доступа: <http://eage.org/>
2. *Риле Е.Б.* Современное состояние проблемы экранирования залежей углеводородов разрывными нарушениями // Электрон. науч. журн. «Георесурсы. Геоэнергетика. Геополитика». 2013. Вып. 1(7). – Режим доступа: <http://oilgasjournal.ru/>
3. Локальный прогноз нефтегазоносности на основе анализа строения ловушек в трехслойном резервуаре: Методические рекомендации / В.Д. Ильин и др. М.: ВНИГНИ, 1982. 52 с.
4. Прогноз нефтегазоносности локальных объектов на основе выявления ловушек в трехчленном резервуаре: Методические указания / В.Д. Ильин и др., М.: ВНИГНИ, 1986. 68 с.
5. *Хитров А.М., Ильин В.Д., Савинкин П.Т.* Выделение, картирование и прогноз нефтегазоносности ловушек в трехчленном резервуаре: Методическое руководство. М.: МПР РФ, МЭ РФ, ВНИГНИ, 2002. 63 с.