

ТРЕЩИНОВАТОСТЬ БАЖЕНОВСКОЙ СВИТЫ ЮГО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ЗАПАДНО-СИБИРСКОЙ ПЛИТЫ И ПРОБЛЕМЫ РАЗРАБОТКИ СЛАНЦЕВЫХ ТОЛЩ

В.Б. Белозеров, Л.А. Краснощекова, В.П. Меркулов

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
634050, Томск, просп. Ленина, 30, Россия*

Разработка «сланцевых» толщ – одно из перспективных направлений наращивания добычи углеводородного сырья в пределах Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции. Отсутствие четкого понимания механизма трещинообразования, являющегося определяющим фактором устойчивой работы скважин при проведении гидроразрыва пласта или бурения горизонтальных скважин, существенно ограничивает выбор технологических возможностей для эффективной разработки этих толщ. В настоящей статье рассмотрен анализ трещиноватости отложений баженовской свиты по данным кернового материала. Охарактеризована роль открытых и минерализованных трещин (углы наклона трещин, их плотность и удельная поверхность) в строении битуминозных аргиллитов. Выполнена палеомагнитная ориентировка образцов керна с открытой трещиноватостью с литолого-петрографическим описанием анализируемых отложений. Полученные результаты свидетельствуют, что формирование открытой трещиноватости в отложениях баженовской свиты контролируется планетарной системой палеонапряженности пород, что позволяет использовать известные свойства планетарной трещиноватости, связанные с их пространственной ориентировкой и способностью к автогенерации в процессах разработки битуминозных аргиллитов.

Трещиноватость, палеомагнитная ориентировка, баженовская свита, поровое давление, гидроразрыв.

SHALE STRATA DEVELOPMENT PROBLEMS AND ORIGIN OF THE BAZHENOV FORMATION FRACTURES IN THE SOUTHEAST OF THE WEST SIBERIAN PLATE

V.B. Belozеров, L.A. Krasnoshchekova, and V.P. Merkulov

Shale strata development is one of the most promising trends for the hydrocarbon production increase within the West Siberian petroliferous province. The lack of understanding of fracturing mechanism, which is crucial for steady well production during hydraulic fracturing or drilling of horizontal wells, substantially restricts the choice of process capabilities for effective development of such horizons. This paper considers the Bazhenov Formation fractures based on the core data. The role of open and mineralized fractures (their slope angles, density, and specific surface) in the structure of bituminous shales is considered. Paleomagnetic orientation of the core samples with open fractures is implemented, and litho-petrographical description of the strata is made. The obtained results indicate that the planetary paleotension system of rocks controls the origin of open fractures in the Bazhenov Formation. Therefore, their spatial orientation and autogeneration capability can be used during the development of the bituminous shale strata.

Fractures, palaeomagnetic orientation, Bazhenov Formation, pore pressure, hydraulic fracturing

ВВЕДЕНИЕ

Проблемы сланцевой нефти обусловлены индивидуальностью в понимании литологических особенностей строения битуминозных сланцевых толщ и технологических мероприятий, связанных с процессом бурения скважин и их дальнейшим освоением. Как показывает практика, универсальных приемов не существует. В каждом конкретном случае наблюдаемая литологическая неоднородность разреза требует своего учета в освоении углеводородного потенциала. В современных экономических условиях, когда деятельность нефтедобывающих предприятий территориально и информационно ограничена, эти «понимания» и «подходы» решаются на конкретном, фактическом материале и по разным территориям приводят к различным, иногда противоречивым выводам.

Наиболее важным вопросом в эффективности разработки сланцевых формаций является представление о формировании трещиноватых зон битуминозных аргиллитов при бурении в них горизонтальных скважин, проведении гидроразрыва и последующих режимах эксплуатации.

В наиболее экономически рентабельных для разработки сланцевых толщах Бакен, проведенные в карбонатно-кремнистой пачке Средний Бакен гидроразрывы пласта позволяют сформировать обширную зону техногенной трещиноватости. Сформированная зона трещиноватости является нефтесборной системой притока углеводородов из битуминозных глин, перекрывающих и подстилающих пачку Средний Бакен [Glaser et al., 2013].

В отличие от «Бакена», где величина карбонатно-кремнистого слоя достигает 30 м, в отложениях баженовской свиты эти литологические разности, имея незначительную толщину, «рассеяны» по разрезу. Количество выделяемых прослоев значительно снижается от центральной части бассейна к его периферии, что связано с палеогеографическими условиями формирования свиты [Предтеченская и др., 2006]. Все это требует выработки индивидуальных критериев освоения скважин в различных фациальных зонах.

В условиях ограниченных возможностей формирования зон техногенной трещиноватости в отложениях баженовской свиты юго-восточной части Западно-Сибирской плиты (ЗСП) особое внимание, вероятно, необходимо уделить проблеме изучения открытой трещиноватости, связанной с особенностями пространственного распределения в рассматриваемых отложениях естественного поля горизонтальных напряжений. Наиболее интересны напряжения растяжения. В естественных условиях эти напряжения не могут формировать систему открытых трещин, так как нет свободного пространства для их реализации. Однако в случае формирования пустотных объемов, появляются предпосылки для их образования. Условия для проявления такого процесса в сланцевых толщах существуют. Прежде всего, для рассматриваемых отложений характерно наличие огромного количества изолированных микропор, заполненных нефтью, в которых поровое давление значительно превосходит гидростатическое.

В случае формирования техногенной трещины происходит миграция нефти из близлежащих микропор за счет разницы значений порового давления и давления в трещине, что способствует образованию в микропорах пустотного пространства. При проявлении этого эффекта в зоне напряженного состояния (растяжения) в сланцевой толще начнет формироваться вертикальная трещина отрыва. Вновь сформированная трещина, в свою очередь, может также пересекать зону напряженного состояния пород. В результате этого запускается процесс автогенерации вертикальной трещиноватости, продолжительность и масштабы которого будут зависеть от интенсивности оттока углеводородов из микропорового пространства и плотности поля растягивающих напряжений.

Возможности развития этого процесса в отложениях баженовской свиты юго-восточной части Западно-Сибирской плиты можно оценить по результатам изучения трещин в керне скважин.

Наиболее масштабное изучение трещин на рассматриваемой территории проводилось в 60-х и 70-х годах прошлого столетия сотрудниками Сибирского научно-исследовательского Института геологии, геофизики и минерального сырья (СНИИГГиМС) [Микуленко и др., 1972].

При общем изучении разрывных нарушений в осадочном разрезе ими был проведен анализ трещиноватости баженовской и георгиевской свит на 111 структурах, расположенных в пределах обширной территории юго-восточной части Западно-Сибирской плиты (рис. 1).

По результатам обобщения полученного материала можно сделать следующие выводы:

1. Из 111 проанализированных локальных поднятий трещиноватость пород баженовской и георгиевской свит зафиксирована на 88, что составляет 80 % от выборки.

2. Из всего объема анализируемых трещин трещины растяжения составляют 95 %. В незначительном количестве присутствуют тектонические трещины сжатия со следами скольжения и еще менее значимы другие типы трещин.

3. Из выделенных трещин свободно открытые трещины растяжения составляют 55 %, а открытые трещины растяжения, выполненные минеральными образованиями – 45 %.

4. Анализ распределения углов падения трещин показывает, что 80 % свободно открытых трещин растяжений имеют вертикальную ориентировку и 18 %, близкую к ней (80—90°). Аналогичную ориентировку имеют 20 % трещин растяжения, выполненных минеральными образованиями. Для остальных минерализованных трещин отмечается их равномерная ориентировка в диапазоне углов падения 20—60°. Различная ориентировка свободно открытых и минерализованных трещин может свидетельствовать о различном генезисе их формирования.

5. Плотность трещиноватости, оцененная по 38 структурам и отражающая отношение числа трещин к размеру поднятой керновой колонки в метрах, изменяется от 1.50 до 0.25 трещ./м.

6. Удельную поверхность трещин (отношение длины трещины к произведению размера поднятой колонки керна и радиуса столбика керна в метрах), изученную по 88 площадям, можно описать степенной функцией $y = 107.47x^{1.39}$ с квадратичным коэффициентом корреляции 0.9331, где x – количество анализируемых площадей. Основной интервал изменения удельной поверхности трещин по анализируемым площадям составляет от 10 до 0.1 м/м².

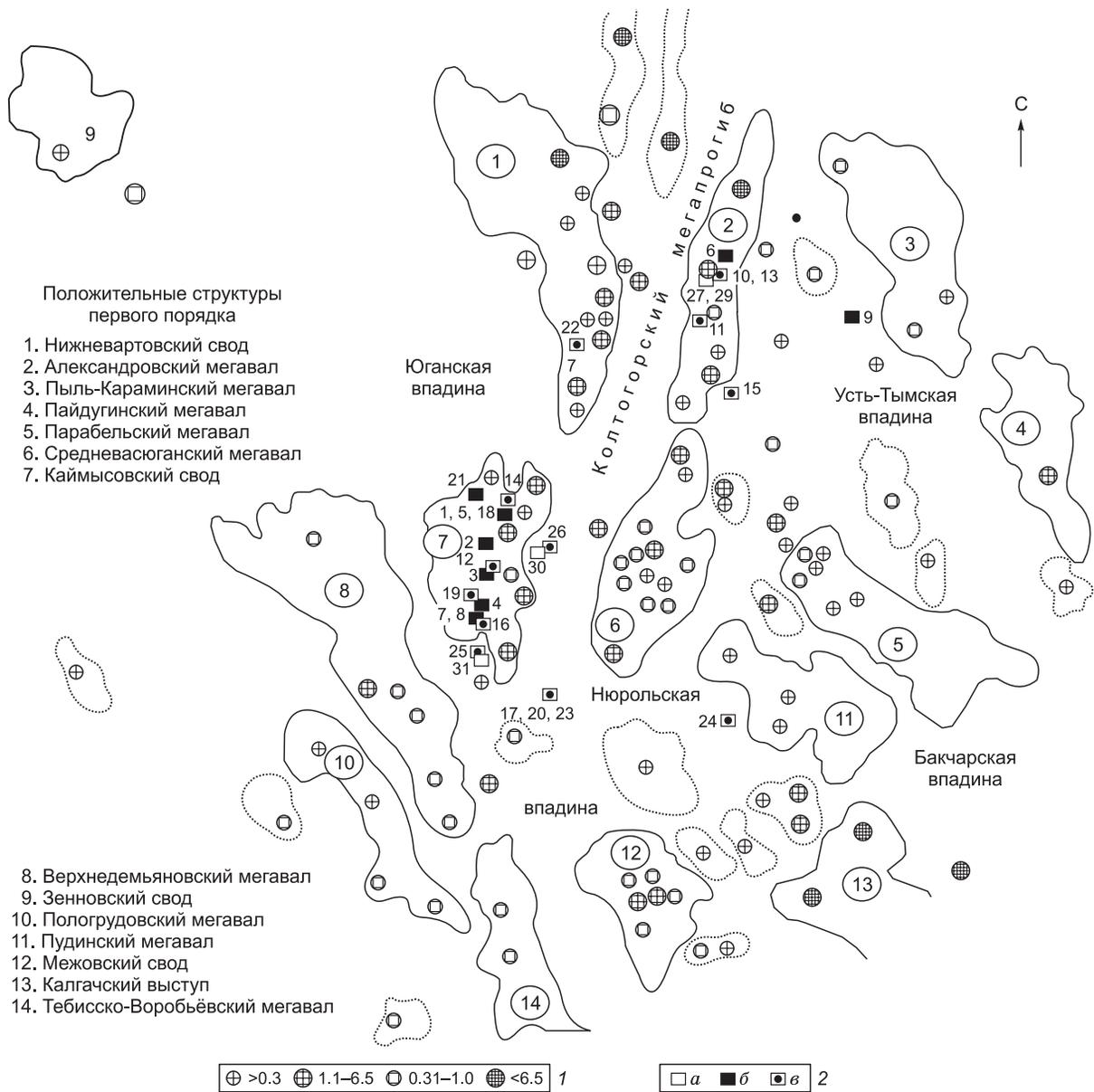


Рис. 1. Характеристика трещин отложений верхней юры (vasюганская, георгиевская, баженовская свиты) и нижнего мела в пределах локальных поднятий юго-восточной части Западно-Сибирской плиты [Микуленко и др., 1972].

1 — плотность трещиноватости отложений баженовской свиты (m^2/m^3); 2 — площади и скважины (см. таблицу) с отбором керна на ориентировку трещин в отложениях нижнего мела (а), баженовской, георгиевской свит (б) и горизонта Ю₁ (в).

Как следует из вышеизложенного, вертикальные свободно открытые трещины растяжения в отложениях баженовской и георгиевской свит получили широкое развитие в пределах юго-восточной части Западно-Сибирской плиты (см. пункт 1,2,3). Отмечается неравномерность их проявления как по площади (см. пункт 4), так и по разрезу (см. пункт 5), что свидетельствует о различных территориальных перспективах разработки рассматриваемых отложений. Неоднородность продуктивности аналогичных сланцевых толщ отмечаются и при их промышленной эксплуатации [Glaser et al., 2013]. Так, накопленная добыча нефти на сланцевом месторождении Бакен по различным скважинам за первые 90 дней устойчивой добычи изменяется от 10 000 до 80 000 баррелей.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

С целью изучения закономерностей пространственного развития свободно открытых трещин растяжения в пределах рассматриваемого района были отобраны образцы керна из отложений нижнего мела, баженовской, георгиевской, васюганской свит.

Всего на 18 структурах из 25 скважин (таблица) было отобрано и проанализировано 37 образцов керна по верхнеюрским песчаникам горизонта Ю₁ (18 образцов), аргиллитам и карбонатам баженовской и георгиевской свит (13 образцов), песчаникам и аргиллитам нижнего мела (6 образцов). Все изученные свободно открытые трещины растяжения имеют вертикальную ориентировку, а по ряду образцов отмечаются две системы трещин (пл. Катильгинская, скв. 105, пл. Игольская, скв. 508 и др.).

Палеомагнитная ориентировка образцов трещиноватого керна юго-востока ЗСП

№ п/п	Площадь	Скв.	Место отбора, м	Азимут трещин, град	Литология
<i>Отложения баженовской свиты (верхняя юра, нижний мел)</i>					
1	Катильгинская	105	2560.8	302—33	Аргиллит битуминозный
2	Волковская	2	2472.7	315—345	»
3	Зап.-Карасевская	74	2652.5 2663.9	318 322	Аргиллит битуминозный кремнисто-гидроslюдистый
4	Двуреченская	430	2673.3	322	Радиолярит глинисто-кремнистый
5	Катильгинская	339	3311.5 3312.1	326 328—351	Аргиллит битуминозный глинисто-гидроslюдистый
6	Вахская	8301	2596.7 2596.8	336 327	Аргиллит битуминозный кремнисто-гидроslюдистый
7	Зап.-Моисеевская	589	2671.1 2671.4	336 334	Аргиллит битуминозный глинисто-гидроslюдистый
8	»	637	2738.4	343	Глинистый известняк
9	Кулеевская	1	2641.4	345	Битуминозный известняк
<i>Верхнеюрские отложения горизонта Ю₁</i>					
10	Северная	428	2167.4	281	Среднезернистый песчаник
11	Кондаковская	7	2184.4	311	Мелкозернистый песчаник
12	Зап.-Карасевская	74	2663.9	322	Среднезернистый песчаник
13	Северная	411	2188.8 2202.5	320 2326	»
14	Оленья	135	2618.5	311	»
15	Пойменная	30	2326.2	337	Мелкозернистый песчаник
16	Двуреченская	430	2697.5	346	»
17	Игольская	1306	2802.3	12	Среднезернистый песчаник
18	Катильгинская	339	3322.9	18	»
19	Зап.-Моисеевская	637	2757.5	10	»
20	Игольская	508	2873.6	16—59	Мелкозернистый песчаник
21	Первомайская	2281	2525.1	18	»
22	Комсомольская	113	2553.0	18	»
23	Игольская	506	2822.2	24	»
24	Зап.-Останинская	452	2586.8	37	»
25	Крапивинская	735	2738.7	36	»
26	Южно-Черемшанская	348	3051.9	46	Среднезернистый песчаник
<i>Отложения нижнего мела</i>					
27	Северная	428	1770.8	317—354	Мелкозернистый песчаник
28	Волковская	2	2370.5 2371.3	317 320	Переслаивание алевролита и аргиллита
29	Северная	429	1900.5	322	Мелкозернистый песчаник
30	Южно-Черемшанская	728	1923.7	325	Среднезернистый песчаник
31	Крапивинская	223	2632.7	16	»

По отобранной коллекции выполнена палеомагнитная ориентировка образцов, определено простираемые выделяемых в них систем трещин, проведены литолого-петрографические исследования ориентированных шлифов.

Использование палеомагнитного метода для целей пространственного ориентирования зерна обусловлено особенностями формирования естественной остаточной намагниченности пород, в составе которой обычно присутствуют два компонента:

1) первичная остаточная намагниченность, образовавшаяся одновременно с породой (для осадочных горных пород имеет ориентационную природу);

2) вязкая намагниченность, обусловленная и совпадающая по направлению с современным магнитным полем Земли.

Вязкая и первичная намагниченности создают естественную остаточную намагниченность, которая измеряется по отдельным образцам зерна с необходимой точностью. Вязкая и первичная намагниченности существенно отличаются по степени устойчивости к внешним воздействиям – нагревам и переменным магнитным полям [Меркулов, Краснощекова, 2002; Краснощекова, Меркулов, 2014].

На основе результатов обработки проведенных экспериментов по размагничиванию вычисляются векторные разности, характеризующие направление вязкой намагниченности, обусловленной влиянием геомагнитного поля и совпадающей с ним по направлению. Вязкая намагниченность в исследуемых образцах формируется в течение современной геомагнитной эпохи Брунес, поэтому ее направление (азимут и наклонение) в среднем соответствует географической системе координат [Краснощекова, Меркулов, 2014].

Контроль полученных направлений осуществляется по соответствию наклонения вектора вязкой намагниченности наклонению современного геомагнитного поля в точке отбора образцов, сопоставлением элементов залегания слоистости по ориентированным образцам. Угловая погрешность определений составляет 3–8°. По отношению к этой системе координат определено и простираемые трещин, зафиксированных в образцах (рис. 2).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Литолого-петрографическое изучение трещиноватых образцов баженовской свиты проведено по 13 образцам из девяти скважин. Породы исследовали макроскопически и в ориентированных шлифах, которые изготавливали параллельно оси зерна в двух взаимно перпендикулярных направлениях, согласно трещинам отрыва и скола штупов (30 шлифов). Анализируемые образцы представлены преимущественно плотными, крепкими, битуминозными аргиллитами (12 образцов) темно-серыми с буроватым оттенком до черных. В породах встречаются тонкие прослои радиоляритов, частично пиритизированных либо наблюдается контакт последних с аргиллитами. Отложения в различной степени обогащены фосфатизированной и кальцитизированной фауной, детритом, проявлениями пирита.

В результате литолого-петрографического анализа сводного разреза баженовской свиты по изученным образцам выделены основные литологические разновидности сланцевой толщи в зависимости от содержания породообразующих компонентов (глинистого, кремнистого, карбонатного вещества, пирита).

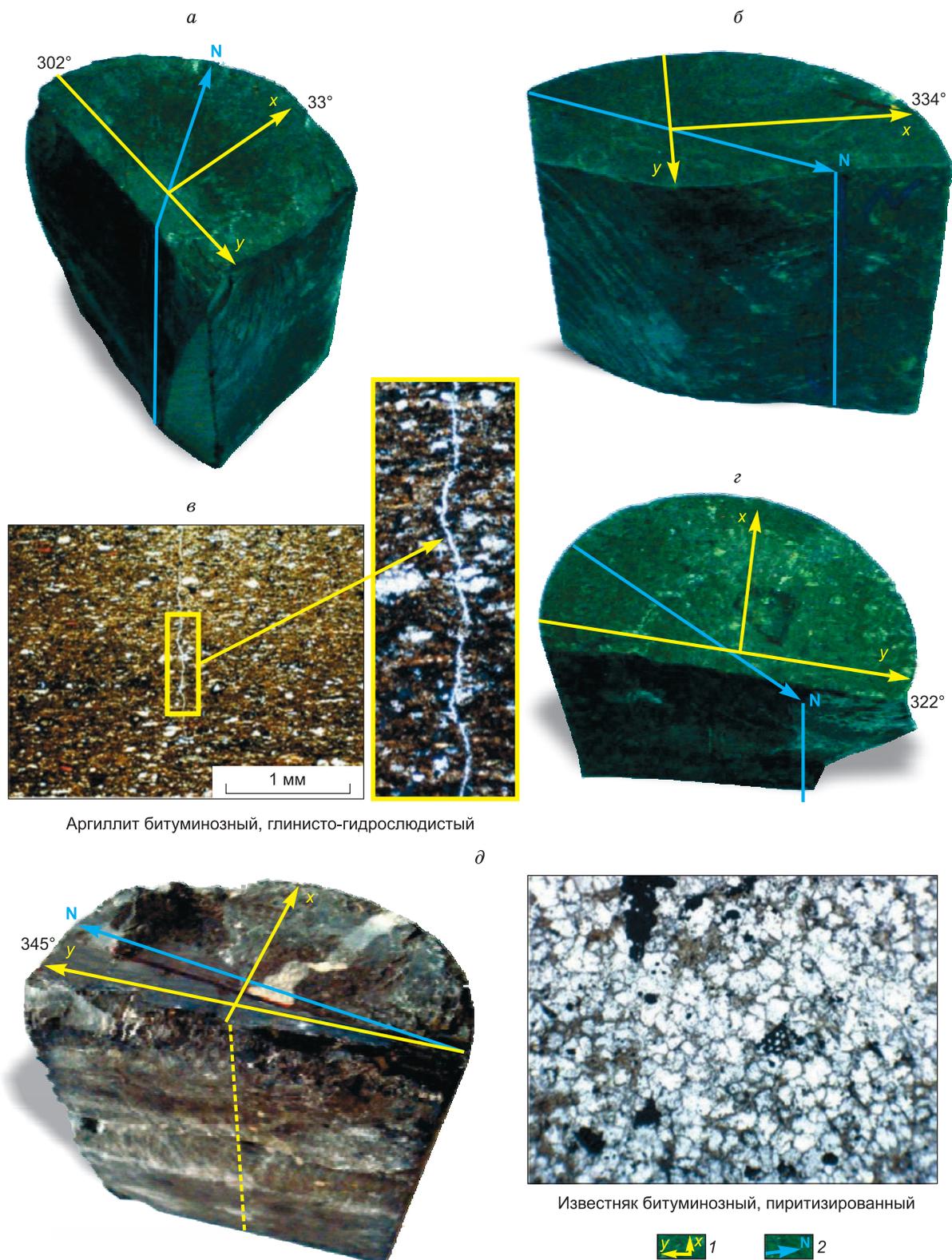
Преобладающими породами являются аргиллиты, которые подразделяются на: глинисто-гидро-слоистые, кремнисто-гидро-слоистые и переслаивающиеся глинисто-кремнистые аргиллиты с радиоляритами. Практически во всех образцах аргиллитов фиксируется содержание алевроитового материала, не превышающее 10-15 %.

Среди изученных глинистых пород преобладают аргиллиты битуминозные, глинисто-гидро-слоистые с кремнистыми (халцедон-кварцевыми) прослоями, остатками радиолярий и макрофауны, пиритизированные. Указанные породы определены на Катильгинской (скв. 105, 339) и Западно-Моисеевской (скв. 589) площадях.

Текстура породы тонкослоистая, в отдельных участках до неясно-слоистой, что обусловлено количеством органического материала, пирита и обломков алевроитовой размерности, располагающихся субпараллельно слоистости (рис. 3, а). Биогенный кремнистый материал достигает 7–10 % и слагает в породе сгустки и тонкие (до 0.01–0.03 мм) линзовидные прослои радиоляритов кремнистого состава (см. рис. 3, б).

Уменьшение глинистого компонента при возрастающей роли кремнистого вещества в основной матрице при одновременном развитии карбонатов (кальцита и сидерита) позволили выделить еще одну разновидность глинистых пород. Аргиллиты битуминозные, кремнисто-гидро-слоистые с линзами сидерита и гидрослюд, с остатками радиолярий и макрофауны, карбонатизированные, пиритизированные отмечены в скважинах на Вахской (скв. 8301), Западно-Карасевской (скв. 74) и Волковской (скв. 135) площадях.

В шлифах породы представлены переслаиванием чешуйчато-волокнистого гидрослюдистого агрегата (≈50 %), промежутки между индивидами которого заполнены плохо раскристаллизованным кремнистым



Аргиллит битуминозный, глинисто-гидрослюдистый

Известняк битуминозный, пиритизированный

Рис. 2. Примеры открытых трещин скола (а—г) и отрыва (д) в отложениях баженовской свиты.

а — пл. Катальгинская, скв. 105; б — пл. Западно-Моисеевская, скв. 589; в — пл. Катальгинская, скв. 339; г — пл. Западно-Карасевская, скв. 74; д — пл. Кулеевская, скв. 1.

1 — система координат для выполнения палеомагнитных измерений; 2 — направление на географический север (направление вязкой намагниченности).

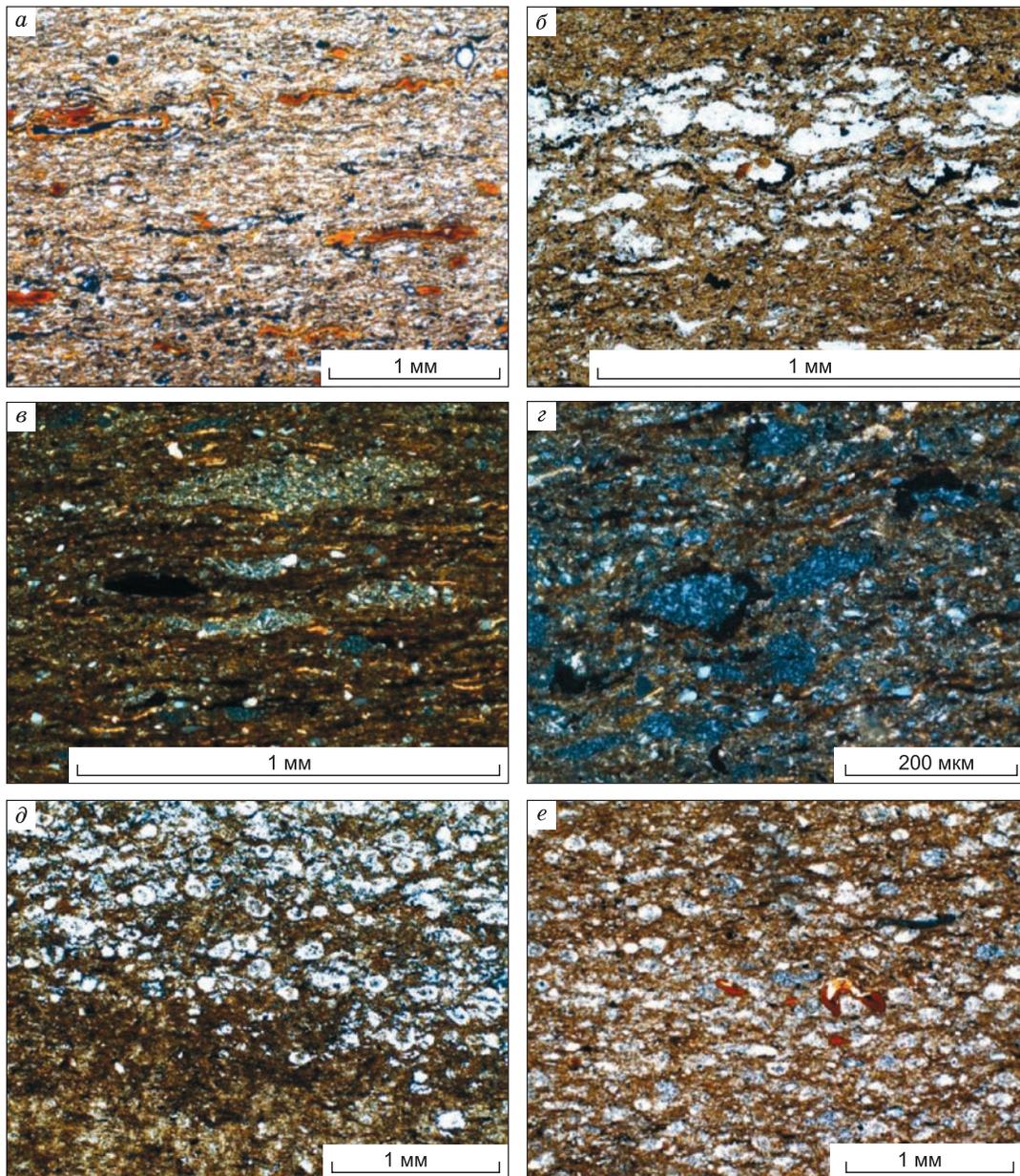


Рис. 3. Литолого-петрографические разновидности баженовской свиты в зависимости от содержания породообразующих компонентов.

a — слоистая текстура аргиллита; Катъльгинская пл., скв. 339, гл. 3311.45 м. Без анализатора. *б* — линзовидное обособление кремнистых радиолярий в аргиллите; Катъльгинская пл., скв. 105, гл. 2560.73 м. Без анализатора. *в* — линзовидные выделения гидрослюды; Вахская пл., скв. 8301, гл. 2596.82. С анализатором. *г* — кремнистые линзы и раковины радиолярий с частичным развитием пирита; Вахская пл., скв. 8301, гл. 2596.75. С анализатором. *д* — контакт аргиллита с радиоляритом; Волковская пл., скв. 135, гл. 2472.76 м. С анализатором. *е* — радиолярит. Двуреченская пл., скв. 430, гл. 2673.2 м. С анализатором.

материалом (до 20—25 %), линзовидными прослоями сидерита (до 7—10 %) и гидрослюды (см. рис. 3, *в*). Алевритовый материал в отдельных образцах (пл. Западно-Карасевская, скв. 74) может достигать 15 %, образуя обогащенные терригенной составляющей прослойки мощностью до 0.1—0.3 мм. Фрагментарно сидеритовые линзы достигают размеров до 0.10—0.15 мм, а с примесью алевритового материала и до 0.4 мм. Пирит образует сыпь и реже небольшие стяжения (не более 3—5 %).

Раковины радиолярий кремнистого состава часто перекристаллизованы и локально пиритизированы (см. рис. 3, *г*). Макрофауна (обломки раковин, фрагменты стеблей и чашек морских лилий ячеистого и членистого строения) иногда полностью кальцитизирована. Суммарно карбонаты (кальцит и сидерит) могут достигать 15—17 %.

Переслаивание радиоляритов гидрослюдисто-кремнистых, карбонатизированных с аргиллитами битуминозными, глинисто-гидрослюдисто-кремнистыми, с раковинами радиолярий и макрофауны (см. рис. 3, *д*, *е*) отмечено на Двуреченской (скв. 430), Волковской (скв. 2) и Западно-Моисеевской (скв. 589) площадях.

Для этих пород характерно высокое содержание кремнистого вещества (до 50—70 % в радиоляритах и до 40—50 % в переслаивающихся с аргиллитами разновидностях), которое присутствует в породах в виде нераскристаллизованной или плохо раскристаллизованной массы, а также в виде агрегатов остатков радиолярий кварц-халцедонового состава.

Основная матрица породы представлена агрегатом гидрослюдисто-кремнистого вещества с раковинами кремнистых радиолярий. Их концентрическое строение подчеркивается кварц-халцедоновым составом по периферии раковин с фрагментарным замещением кальцитом. Единично отмечается прослой раковин радиолярий толщиной до 0.8—1.0 мм (пл. Западно-Моисеевская, скв. 589) с практически полным образованием псевдоморфоз пирита по раковинам, где его содержание составляет до 10 %.

Макрофауна частично фосфатизирована, пиритизирована, карбонатизирована. Рассеянное органическое вещество насыщает глинисто-кремнистую матрицу пород, заполняет полости в раковинах радиолярий и образует стустки, часто ориентированные по наслоению. Среднее содержание в породах кальцита составляет до 8 % и пирита до 5—7 %.

В изученных ориентированных шлифах особое внимание обращалось на трещины пород. Повсеместно фиксировались послойные субпараллельные напластованию трещины, приуроченные к изначально ослабленным зонам — границам раздела пород различного минералогического состава и послойное распределение органического вещества. Единично фиксировались трещины (пл. Катильгинская, скв. 339), проходящие вертикально оси керна и, соответственно, субнормально к слоистости, которые оставались открытыми и не заполнены минеральным веществом (см. рис. 2).

На рис. 4, *А* приведена диаграмма пространственной ориентировки свободных трещин по рассматриваемым стратиграфическим комплексам. При этом в случае анализа двух или трех образцов из одного интервала (пл. Волковская, скв. 2, пл. Вахская, скв. 8301; и др.) результаты палеомагнитной ориентировки трещины усреднялись.

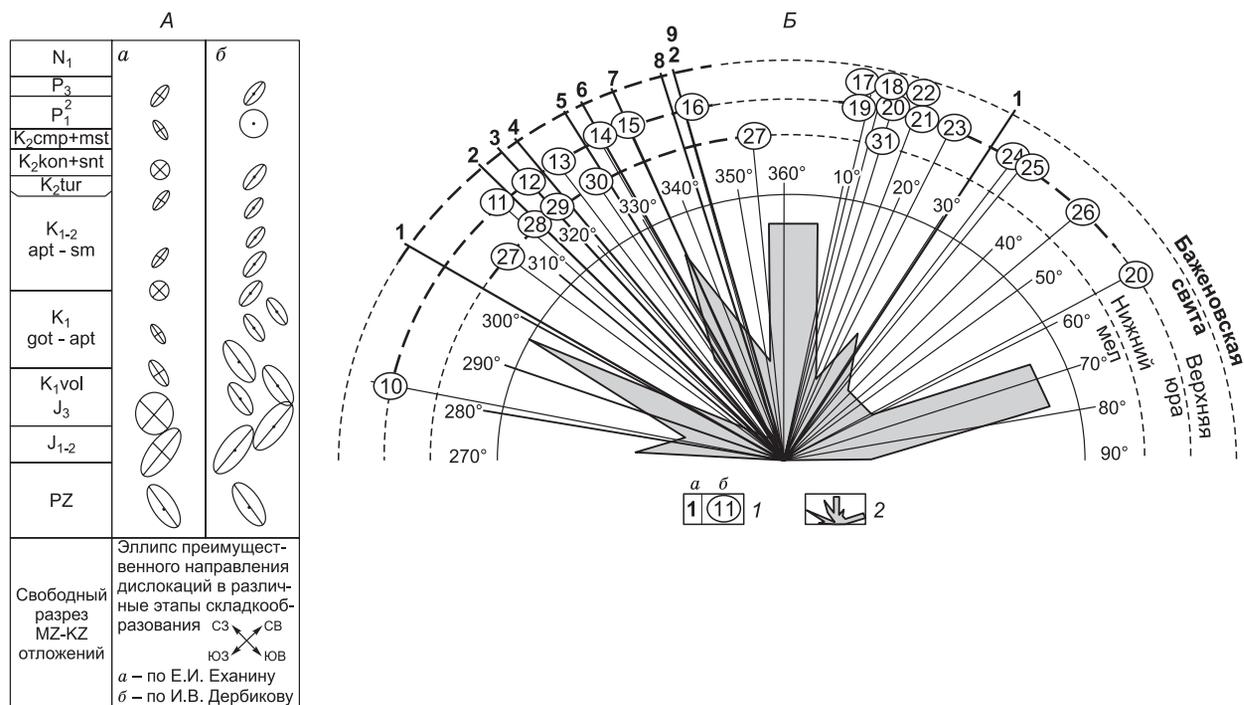


Рис. 4. Ориентировка открытых трещин в юрско-меловых отложениях юго-восточной части Западно-Сибирской плиты по палеомагнитным данным (*А*) и изменение положения эллипса тектонических дислокаций локальных поднятий (*Б*) в осадочном чехле Западной Сибири [Еханин, Бенько, 1959; Дербинов, 1960]

1 — номера: *а* — образца баженовской свиты, *б* — образца из отложений верхней юры и нижнего мела с замерами азимутов простираения вертикальных трещин палеомагнитным методом (см. таблицу); *2* — ориентировка трещин в породах юры и неокома Каймысовского свода [Миклуленко, Шемин, 1971].

Исходя из представленного рисунка, отложения юры имеют два диапазона пространственной ориентировки трещин — 280—345 и 10—60°. В отложениях баженовской свиты трещины локализованы в интервале 300—345°. Единичное значение образца ядра 1 (33°) обусловлено наличием ортогональной системы трещин (302—33°) в скв. 105 Катыльгинской площади. Анализируемые трещины нижнего мела выделяются в основном в диапазоне 280—355°.

В целевом интервале изучения (баженовская и георгиевская свиты) из девяти анализируемых образцов семь представлены аргиллитами и два (обр. 8, 9) карбонатными породами. Разный литологический состав пород предполагает различный механизм образования трещин. В аргиллитах эти нарушения рассматриваются как трещины отрыва, ориентированные перпендикулярно существующим напряжениям растяжения в породе. Более плотным и хрупким карбонатным отложениям в большей степени свойственны трещины скола, направленные к сжимающим и растягивающим напряжениям под углом 45°. В морфологическом отношении плоскость трещин скола ровная, а плоскость трещин отрыва волнистая (см. рис. 2), что соответствует существующим признакам различия трещин этих типов.

Если рассматривать изменение ориентировки азимута простирания выделяемой совокупности трещин, то отмечается постепенное его увеличение от подошвы к кровле баженовской свиты (см. рис. 4). Так, расположенным в подошве георгиевской (обр. 8) и баженовской (обр. 9) свит трещинам соответствуют азимуты простирания 343 и 345°. Однако, учитывая, что эти образцы представлены карбонатными породами, в которых направленность трещин скола и трещин отрыва отличаются на 45°, ориентировка последних может составлять 298 и 300°. Для образцов 1 и 2, отобранных в 3 метрах выше подошвы баженовской свиты, простирание трещин составляет 302 и 315°; для обр. 3, 4, 5, расположенных в 3.5 метрах, — 318, 322, 327°; для обр. 6, взятого в 4 метрах выше свиты, — 333°, а для обр. 7, отобранного в 6.5 метра — 335°. Представленная последовательность, даже с учетом несовершенства палеомагнитного метода измерения, наглядно указывает на закономерное изменение ориентировки интервалов проявления трещин во времени.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Сопоставляя пространственную ориентировку анализируемых трещин с розой-диаграммой ориентировки трещин в породах юры и неокома Каймысовского свода [Микуленко, Шеин, 1971], следует отметить, что для отложений юры она близка к 30 и 335°, а для отложений нижнего мела и баженовской свиты к 335°. Отмечается определенная связь пространственной ориентировки трещин с особенностями тектонического развития структур третьего порядка Западно-Сибирской плиты (см. рис. 4, Б).

Характерной особенностью мезозойско-кайнозойских структур третьего порядка является периодичность изменения во времени ориентировки эллипса тектонических дислокаций, отражающего величину и направление региональных движений [Еханин, Бенько, 1959; Дербинов, 1960]. Эти движения, формируя палеорельеф дна бассейна седиментации определенного стратиграфического диапазона, влияли на асимметрию распределения толщин осадочного покрова в пределах различных частей локального поднятия. Для юрско-мелового периода эллипс тектонических дислокации четырежды изменял свое направление, принимая северо-восточную ориентировку в юре и апт-сеномане и северо-западную в верхней юре—нижнем мелу и верхнем мелу.

Как следует из рис. 4, Б, в верхней юре наблюдаемая перестройка с северо-восточной на северо-западную отмечается присутствием в отложениях горизонта Ю₁ трещин как северо-восточного, так и северо-западного направлений. Для отложений баженовской свиты и нижнего мела северо-западное простирание трещин соответствует аналогичной ориентировке эллипса.

Если периодичность изменения ориентировки эллипса тектонических дислокаций, обусловленную асимметрией распределения толщин осадочного покрова в пределах различных частей локального поднятия, связывать с проявлением волновых колебательных движений земной коры и ротационной геодинамикой [Белозеров, 2007], то рассматриваемые в статье типы трещин можно отнести к категории общих (планетарных) по следующим признакам [Рац, Чернышев, 1971]:

- все трещины имеют вертикальную ориентировку;
- свободные открытые трещины растяжения выделяются в основном в битуминозных аргиллитах;
- трещины приурочены к ограниченным в разрезе интервалам баженовской свиты;
- отмечается закономерное изменение азимута ориентировки трещин по разрезу;
- присутствует ортогональная система развития трещин, выявленная в образце ядра скв.105 Катыльгинской площади, а также три аналогичных системы открытых трещин (295—25, 335—65 и 0—90°), выделяемых в юрско-меловых отложениях юго-восточной части Западно-Сибирской плиты по палеомагнитным данным (см. рис. 4, А).

Анализируя вышеизложенное, можно отметить, что формирование открытых трещин растяжения в отложениях баженовской свиты юго-восточной части Западно-Сибирской плиты не следует рассматривать с позиции геомеханики. Их возникновение связано с планетарной системой растягивающих

напряжений. Эти напряжения могут быть реализованы в систему эндокинетических трещин в случае образования пустотного пространства в сланцевой толще при оттоке углеводородов из микропорового пространства в трещину гидроразрыва или при подъеме керна на поверхность [Белозеров, 2015]. Автогенерация свободных трещин растяжения при проведении гидроразрыва отложений баженовской свиты требует поддержания в процессе разработки максимально возможной депрессии между поровым давлением в битуминозных аргиллитах и давлением в трещине гидроразрыва. Это способствует наиболее значительному оттоку углеводородов из сланцевой толщи и образованию свободных трещин растяжения в зонах планетарной напряженности. Объемы мобилизации подвижной нефти будут зависеть от скорости и масштабов автогенерации ортогональной системы эндокинетических трещин.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные обобщения исследований открытых трещин в баженовской и георгиевской свитах по данным кернового материала в пределах юго-восточной части Западно-Сибирской плиты дают основание сделать вывод о планетарной природе их формирования. Это позволяет использовать имеющиеся закономерности по особенностям строения этого типа трещин в процессах разработки сланцевой толщи. Прогнозируемая ориентировка ортогональной системы трещин $300\text{--}30^\circ$ в подошве свиты и $330\text{--}60^\circ$ в ее кровле может оптимизировать направление проводки горизонтальных скважин, а представления о механизме формирования открытых трещин и возможности их автогенерации в процессе разработки сланцевой толщи позволяют смоделировать дизайн гидроразрыва и последующий режим эксплуатации скважины.

ЛИТЕРАТУРА

Белозеров В.Б. Палеогеографические особенности формирования нефтеносных пластов васюганской свиты Западной Сибири // Изв. Томск. политех. ун-та, 2007, т. 311, № 1, с. 67—72.

Белозеров В.Б. Особенности формирования зон трещиноватости при гидроразрыве сланцевых толщ // EAGE/SPE Joint Workshop on Shale Oil 2015, 2015, с.4, DOI : 10.3997/2214-4609.201412180.

Дербинов И.В. Элементы тектоники Западно-Сибирской низменности и вопросы методики ее исследования. Л., Гостоптехиздат, 1960, 178 с.

Еханин Е.В., Бенько Е.И. Мезозойские и кайнозойские тектонические движения Среднего Прииртышья по данным сейсморазведки // Научные труды СНИИГГиМС, Новосибирск, 1959, вып. 1, с. 152—160.

Краснощекова Л.А., Меркулов В.П. Петрофизическая неоднородность нефтеносных коллекторов Игольско-Талового месторождения // Нефтегазовая геология. Теория и практика, 2014, т. 9, № 2, с. 9, http://www.ngtp.ru/rub/4/26_2014.pdf

Меркулов В.П., Краснощекова Л.А. Исследование пространственной литолого-петрофизической неоднородности продуктивных коллекторов месторождений нефти и газа // Изв. Томск. политех. ун-та, 2002, т. 305, № 6, с. 296—303.

Микуленко К.И., Шемин Г.Г. Трещиноватость юрских и нижнемеловых пород Обь-Иртышского междуречья // Научные труды СНИИГГиМС, Новосибирск, 1971, вып. 132, с. 90—101.

Микуленко К.И., Зоткевич А.И., Пехтерева И.А., Умперович Н.В., Шемин Г.Г., Гурари И.Ф. Методика изучения трещиноватости пород закрытых платформенных территорий (на примере мезозойских отложений Западно-Сибирской плиты и Вилуйской гемисинеклизы): методические рекомендации // Научные труды СНИИГГиМС, Новосибирск, 1972, 99 с.

Предтеченская Е.А., Кроль Л.А., Гурари Ф.Г., Сапьяник В.В., Перозио Г.Н., Малюшко Л.Д. О генезисе карбонатов в составе баженовской свиты центральных и юго-восточных районов Западно-Сибирской плиты // Литосфера, 2006, № 4, с. 131—148.

Рац М.В., Чернышев С.Н. Трещиноватость и свойства трещинных коллекторов. М., Недра, 1971, 160 с.

Glaser K.S., Miller C.K., Johnson G.M., Toelle B., Kleinberg R.L., Miller P., Pennington W.D. Seeking the sweet spot: Reservoir and completion quality in organic shales // Oilfield Rev., 2013, т. 25, №. 4, с. 16—29.