

## **РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗУЧЕНИЯ АНИЗОТРОПИИ МИКРОСТРОЕНИЯ КАРБОНАТНЫХ ПОРОД МЕТОДАМИ ЭЛЕКТРОННОЙ МИКРОСКОПИИ И КОМПЬЮТЕРНОГО АНАЛИЗА ИЗОБРАЖЕНИЙ**

В.А. Кузьмин, Н.Н. Михайлов, В.М. Максимов, И.П. Гурбатова  
ИПНГ РАН, e-mail: KuzminVA@mail.ru

В статье приведены методы изучения и изложены результаты электронно-микроскопических исследований анизотропии микростроения и порового пространства образцов полноразмерного керна карбонатных пород, на которых предварительно были проведены эксперименты по определению анизотропии фильтрационных и физических свойств. В образцах, которые являются карбонатными породами со сложной структурой порового пространства, экспериментально обнаружена азимутальная анизотропия микростроения и порового пространства. На основе цифровой обработки электронно-микроскопических изображений сделаны важные заключения о преимущественном влиянии крупнопорового пространства на азимутальную анизотропию фильтрационных свойств, которые необходимо учитывать при разработке месторождений углеводородов.

### **Введение**

При разработке нефтяных месторождений с поддержанием пластового давления методом закачки воды повышение нефтеотдачи в значительной степени связано с полнотой охвата продуктивного пласта. Полнота охвата пласта зависит от многих причин, и в частности от особенностей технологической разработки месторождения, а также от многочисленных разномасштабных факторов, связанных с геологическим строением месторождения и строением конкретных пород. При отсутствии трещиноватости направление потоков закачиваемой воды в пласте определяется преимущественным направлением проводящих поровых каналов в породе. Это связано с тем, что ориентация пор в различных направлениях разная. Иначе говоря, имеет место фактор анизотропии. В осадочных породах анизотропия фильтрационных свойств относительно вертикального и горизонтального направлений хорошо известна [1]. Такая анизотропия присуща всем осадочным породам. В основном она связана с седиментационными условиями осадконакопления, вторичными преобразованиями в процессе катагенетических изменений и с воздействием горного давления. Эффект анизотропии отчетливо проявляется при петрофизических исследованиях в разной

величине коэффициента проницаемости, измеряемой параллельно или перпендикулярно напластованию. В работе [18] показано, что в общем случае анизотропия имеет тензорный характер, который проявляется как в вертикальном, так и в горизонтальном направлениях. Соответственно, анализ латеральной анизотропии представляет особый интерес. Анизотропия фильтрационных свойств в карбонатных породах также имеет место и, как правило, связана с трещиноватостью [2]. Однако и при отсутствии трещиноватости в карбонатных породах эффект анизотропии фильтрационных свойств практически всегда присутствует. В наибольшей степени он проявляется в крупнопоровых и кавернозных разностях. При проектировании разработки месторождений вертикально-горизонтальная фильтрационная анизотропия учитывается на основе геофизических данных и петрофизических исследований керна. Азимутальная анизотропия слабо изучена и из-за сложности определения, как правило, не учитывается.

### **Теоретический анализ**

В последнее время в связи с необходимостью построения более точных гидродинамических 3D-моделей месторождений, помимо вертикальной, необходим учет и азимутальной (горизонтальной) анизотропии фильтрационных свойств пород. Причинами такой анизотропии являются ориентация породообразующих частиц и порового пространства в результате формирования и преобразования породы, а также воздействия тектонических процессов. Детальное исследование анизотропии флюидопроводимости в разных азимутальных направлениях требует петрофизических исследований на ориентированных кернах. Ориентировка керна возможна в процессе его отбора при бурении специальным оборудованием или на основе палеомагнитных методов, позволяющих сориентировать керн в пространстве, при этом определяется не только его современное положение в породах, но и положение во время образования породы [3]. В настоящее время имеются работы по изучению азимутальной ориентации флюидомиграции в пластах, проведенные на ориентированных кернах [4, 5, 6]. В работе [4] авторы провели комплекс исследований по анизотропии коллекторов нефтяных месторождений с помощью петрографических, палеомагнитных и физических (упругих, магнитных) методов. Показано, что анизотропия физических свойств в породах обусловлена не только изменчивостью петрофизических характеристик (проницаемости, вторичной пористости), но и направленностью (трендом изменения) разуплотнения матрицы, ее деформации посредством флюидотектонических процессов. В работах [7, 8]

Гурбатовой И.П. и Михайловым Н.Н. проводились исследования анизотропных свойств газопроницаемости и скорости распространения упругих волн на полноразмерных образцах кернов карбонатных пород. Проведенные экспериментальные исследования показали, что помимо вертикальной анизотропии для изученной коллекции образцов характерна азимутальная анизотропия в плоскости напластования, а проницаемости в различных направлениях этой плоскости кратно различаются. Эксперименты показали, что для некоторых образцов отсутствует прямая корреляция между направленной проницаемостью и направленной скоростью распространения упругих волн. В общем случае авторы установили нелинейную корреляционную зависимость между направленной проницаемостью и временем распространения упругих волн. Для объяснения нетривиальных полученных результатов авторы сделали предположение, что в сложно построенных коллекторах имеется два типа симметрии: первичный (седиментационный) и вторичный, когда на первичные элементы симметрии накладываются процессы выщелачивания и каверно-образования, что и определяет различие анизотропии по различным физическим свойствам. Детальное изучение анизотропии микростроения глинистых пород методами электронной микроскопии на основе Фурье-анализа было проведено в работах [9, 10]. Авторы исследовали микроструктурную ориентированность глинистых пород (грунтов) по изображениям, полученным с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ). Приведенные данные показали высокую информативность электронно-микроскопических методов на основе цифровой обработки изображений для исследований микроструктурной ориентации в глинистых породах. Для карбонатных пород такие исследования на основе Фурье-анализа электронно-микроскопических изображений были впервые проведены Кузьминым В.А. и Скибицкой Н.А. в работе [11]. Ими было изучено влияние ориентации микроструктуры на ориентацию порового пространства и получены корреляционные связи между степенью анизотропии микростроения и степенью анизотропии порового межзернового пространства. Экспериментально было установлено, что пористые образцы являются неоднородными с точки зрения азимутальной ориентации микроструктурных частиц и поровых каналов. Было обнаружено, что степень ориентации порового пространства по-разному связана с ориентацией кристаллической матрицы. При сопоставимой пористости, более проницаемые образцы имеют более ориентированные

поровые каналы. Исследования также показали, что в ряде случаев имеется разнонаправленность ориентации микроструктурных частиц и порового пространства.

### Методика и экспериментальная часть

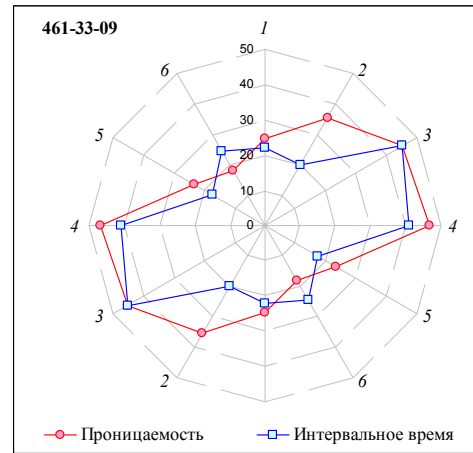
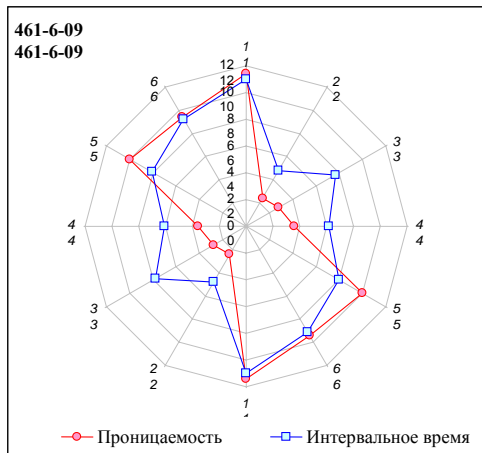
Для изучения латеральной анизотропии на полноразмерных ядрах были проведены специальные эксперименты по определению максимальной проницаемости в зависимости от направления. Литологическая характеристика изученных образцов приведена в табл. 1. Использовалось специальное оборудование, позволяющее проводить определение проницаемости и интервального времени в перпендикулярном направлении относительно вертикальной оси ядра. Все измерения были выполнены с шагом измерений  $30^\circ$  по круговому сектору. По полученным данным были построены лепестковые диаграммы (розы ориентаций) проницаемости по газу и времени распространения упругих волн (интервального времени ультразвука).

Таблица 1

### Литологическая характеристика пород

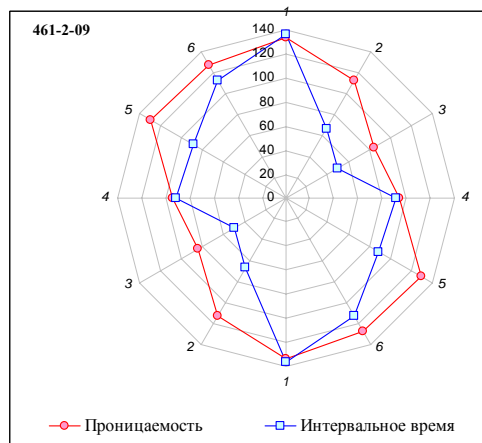
№ образца	Литологическая характеристика пород
461-2-09	Известняк с примесью органогенного детрита неравномерно доломитизированный, стилолитизированный, трещиноватый, локально пористый, неравномерно нефтенасыщенный
461-6-09	Доломит вторичный с реликтовой органогенной структурой известковистый стилолитизированный, пористо-кавернозный, локально трещиноватый, сильно нефтенасыщенный. Текстура узорчатая, стилолитовая, локально трещиноватая, пористо-кавернозная
461-33-09	Известняк с незначительной примесью глинистого вещества, стилолитизированный, трещиноватый, участками кавернозно-пористый, неравномерно пигментирован БОВ. Текстура стилолитовая, трещиноватая, участками кавернозно-пористая, пятнистая, обусловленная крайне незначительной примесью глинистого материала

На рис. 1—3 представлены результаты этих исследований в виде лепестковых диаграмм (розы ориентации).



*a*

*б*



*в*

Рис. 1. Результаты азимутального изучения газопроницаемости и интервального времени  
роза ориентации: *a* – образец 461-33-09; *б* – образец 461-6-09; *в*– образец 461-2-09

Как видно из диаграмм, во всех образцах имеются различия в фильтрационных и физических свойствах, а также в асинхронном изменении значений проницаемости и интервального времени в зависимости от направления. Также во всех образцах имеются различия в ориентации главного направления фильтрации и направления интервального времени распространения упругих волн. В табл. 2 приведены данные по фильтрационной анизотропии, вещественному составу карбонатных пород, а также значения пористости с учетом и без учета каверн.

Таблица 2

**Характеристика анизотропии фильтрационно-емкостных свойств и  
вещественный состав пород**

№ образца	Пористость, %			Газопроницаемость, мД			Карбонатность, %	
	С учетом внешних каверн	Без учета внешних каверн	Доля внеш- них каверн		Гориз. 90 °	Вертик	Каль- цит	Доломит
461-2-09	8.19	8.19	0	153.4 1	115.69	28.17	72.9	19.9
461-6-09	6.71	6.11	0.60	5.44	5.24	9.06	н/обн	99.2
461-33-09	9.07	8.60	0.47	26.54	14.19	29.30	98.2	н/обн

Из табличных данных видно, что образцы пород при сопоставимой пористости 6,7–9,07% различаются по анизотропии фильтрационных свойств (газопроницаемости). В образце 461-6-09 величины проницаемости в азимутальном направлении (главное и перпендикулярное направления фильтрации) практически не различаются и составляют соответственно 5,44 и 5,24 мД. Если выразить коэффициент фильтрационной анизотропии ( $K_{a(\phi)}$ ) как отношение разницы проницаемостей к большей проницаемости, то в этом случае  $K_{a(\phi)}$  в процентах составит 3,6%. Заметная анизотропия фильтрационных свойств наблюдается в образце 461-2-09, для которого коэффициент газопроницаемости по главному и перпендикулярному направлениям  $K_{пр}$  равен соответственно 153,41 и 115,61 мД, а  $K_{a(\phi)} = 32,7\%$ . Максимальная анизотропия фильтрационных свойств наблюдается в образце 461-33-09, в котором азимутальные проницаемости различаются практически в два раза (26,54 и 14,19 мД) в зависимости от направления ( $K_{a(\phi)} = 87,0\%$ ).

Поскольку фильтрация осуществляется по системе поровых каналов, то для изучения причин таких фильтрационных различий необходимо исследовать особенности микростроения пород и их порового пространства на микроуровне. В настоящей работе для таких исследований применялся аналитический автоэмиссионный растровый электронный микроскоп LEO SUPRA 50VP с полевой эмиссией катода и с разрешением

прибора 1 нм. Идентификация минерального состава проводилась с помощью рентгеноспектрального энергодисперсионного анализатора. Анизотропия микростроения изучалась методом градиента интенсивности сигналов РЭМ-изображений сколов образцов [12, 13]. Анализ порового пространства осуществлялся по сечениям пор и каналов на поверхности аншлифов в режиме катодолюминесценции в РЭМ по методике Кузьмина В.А. (1987, 2009 г.) [14, 15].

В кавернозных карбонатных породах масштаб крупных пор и каверн слишком велик для изучения методами электронной микроскопии. В связи с этим автором для оценки степени ориентации (анизотропии по различным направлениям) был разработан и применен способ контрастных оптических изображений. С этой целью с помощью микроскопа МБС и цифровой камеры MDC20 осуществлялась цифровая микрофотосъемка при контрастном освещении пришлифованной поверхности образцов.

Для определения интегральных значений ориентации кристаллов и пор использовался упомянутый выше метод градиента интенсивности сигнала, который реализовывался с помощью пакета прикладных программ. Метод градиента интенсивности сигнала РЭМ-изображений для определения ориентации, по сути, является модифицированным методом анализа частоты изменения яркостных градиаций изображения в различных по ориентации направлениях, ранее предложенным Кузьминым В.А. (1978 г.) [17]. Алгоритмы цифровой обработки изображения в этом методе основываются на том, что в процессе анализа производится оценка локального градиента интенсивности сигнала  $V$  в каждой точке изображения по двум направлениям  $dI/dx$  и  $dI/dy$ . Величина градиента рассчитывается из выражения:

$$V = \sqrt{(dI/dx)^2 + (dI/dy)^2},$$

где  $I$  – яркость сигнала в данной точке изображения.

Градиент интенсивности сигнала вычисляется из выражения:  $\operatorname{tg}\theta \frac{dI/dy}{dI/dx}$

По результатам анализа строят розу ориентации, длина лучей которой представляет относительную величину градиента интенсивности сигнала в процентах. Направление преимущественной ориентации определяют к нормали по направлению максимального градиента интенсивности сигнала.

По полученной розе ориентации рассчитывается параметр степени ориентации — коэффициент анизотропии  $A$ , который определялся из выражения

$$A = \{1 - (S_1 + S'_1) / (S_2 + S'_2)\} * 100\%,$$

где  $(S_1 + S'_1)$  и  $(S_2 + S'_2)$  – суммарные площади радиальных сегментов вдоль минимальной и максимальной осей розы ориентации. Подробно метод изложен в работе [10].

### **Полученные результаты и обсуждение**

Для оценки особенностей микростроения пород образцы были изучены в стандартном режиме в РЭМ (во вторичных электронах). Этот режим позволяет визуализировать микростроение в виде обычного восприятия, идентичного оптическим средствам. При изучении все образцы были строго ориентированы по главному направлению (направление максимальной фильтрации). Поровое пространство исследовалось в РЭМ в режиме катодolumинесценции.

По данным РЭМ, все изученные образцы представляют собой крупнопоровые и крупнопорово-кавернозные разности пород. Значительная доля емкости в них сформирована вторичными порами и кавернами в основном в результате процессов выщелачивания. То есть в образцах помимо первичных, более мелких, пор имеется система вторичных поровых каналов с различной генетической принадлежностью – межзерновые поры, образованные в результате процессов перекристаллизации, и крупные поровые каналы и каверны, образованные в результате растворения карбонатной матрицы.

С точки зрения ориентации структурных элементов во всех изученных образцах наблюдается разнонаправленное расположение слагающих породы агрегатов, кристаллов и зерен. Визуальная оценка тренда ориентации кристаллов и пор по РЭМ-изображениям в большинстве случаев невозможна, и, следовательно, невозможна визуальная оценка анизотропии микростроения. Таким образом, анализ «вторично-электронных» изображений микростроения показал, что в породах имеются разнообразные микроструктурные морфологические, размерные, микротектурные и ориентационные различия порообразующих кристаллов и поровых каналов.

Для сравнительной оценки межзернового порового пространства в изученных образцах нами приведены гистограммы распределения пор по размерам (рис. 2), полученные методом анализа катодolumинесцентных РЭМ-изображений. Для подсчета применялась программа «Коллектор», разработанная в ИПНГ РАН [16]. Приведенные распределения захватывают только диапазон межзерновых (межкристаллических) капиллярных поровых каналов. Сверхкапиллярные поровые каналы (каверновые каналы) в этих распределениях не учитывались.



По характеру распределения гистограммы имеют полимодальный вид с преобладанием крупных фильтрующих пор. Во всех образцах наблюдается возрастание объемной доли пор с ростом их размеров. Такое распределение характерно для вторичной пористости в карбонатных кавернозных породах с высокой пористостью. Наиболее крупные межзерновые поры – в образце 461-6-09, их максимальный размер составляет 536,6 мкм. Следует отметить, что размеры вторичных пор растворения и межзерновых пор, образованных гранями кристаллов в крупнозернистых разностях, могут частично перекрываться, поэтому обозначать полученные гистограммы как долевой объем межзерновых пор можно с достаточной степенью условности.

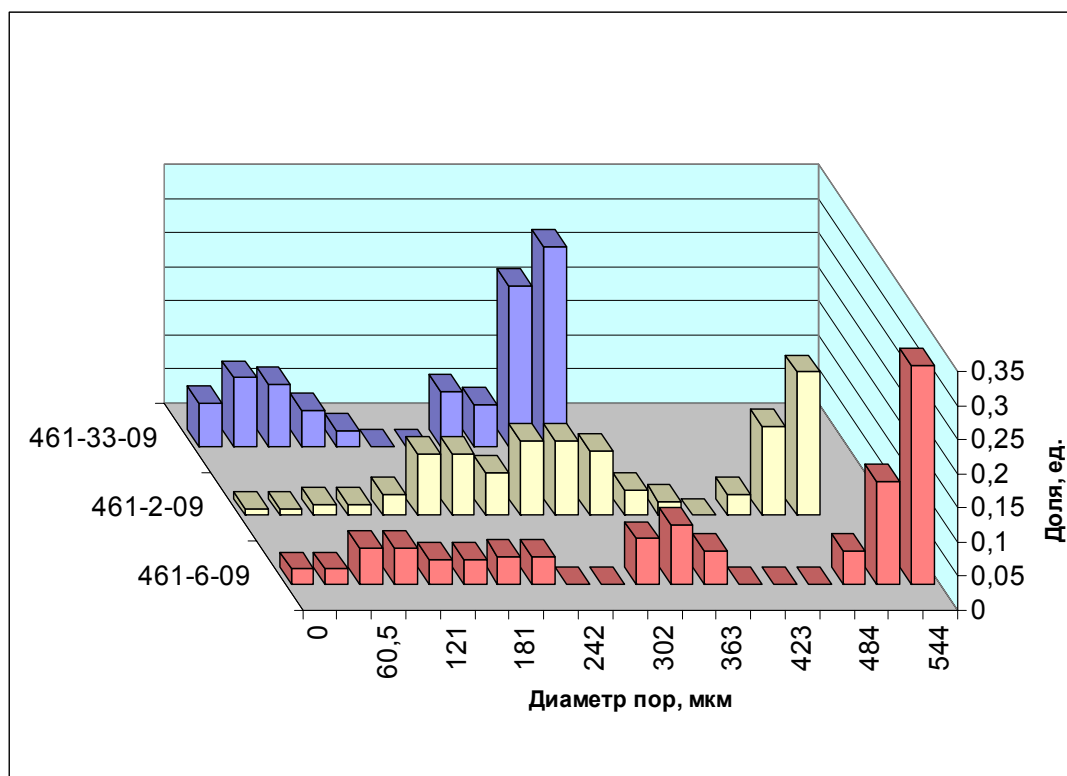


Рис. 2. Гистограммы долевого объема пор и каналов по результатам РЭМ-анализа

В изученных образцах фильтрующие поровые каналы можно разделить на две группы по их влиянию на симметрию физических свойств (согласно принципу Нэймана). Как видно по результатам электронно-микроскопических исследований, ориентация межзерновых капиллярных пор с размерностью от 0,2 до 500 мкм связана с ориентацией кристаллов кальцита и доломита в породах. Более крупные сверхкапиллярные поры,

образованные за счет выщелачивания, имеют ориентацию, связанную с другими многочисленными факторами, влияющими на степень и скорость растворения.

В настоящей работе изучение азимутальной ориентации (анизотропии) элементов микростроения и порового пространства карбонатных пород проводилось по следующей схеме:

1. Крупнопоровое пространство и каверны на поверхности шлифованных пластин, выпиленных из полноразмерных кернов, фотографировались при контрастном освещении. Далее программными средствами полутоновые изображения пор и каверн преобразовывались в двуградационные изображения. По цифровым изображениям определялся коэффициент анизотропии.
2. В РЭМ в режиме «вторичных электронов» исследовалось микростроение сколов, приготовленных параллельно напластованию. Далее при информативном увеличении по РЭМ-изображениям проводился анализ анизотропии и интегрального значения степени ориентации зерен и кристаллов карбонатной матрицы.
3. В РЭМ в режиме катодolumинесценции исследовались пропитанные катодolumинофором аншлифы, и полученные изображения анализировались для оценки анизотропных свойств и ориентированности порового пространства.

Такой подход позволил детально исследовать влияние факторов микростроения на анизотропию и выявить разнонаправленность поровых каналов по ориентировке в зависимости от их генетической принадлежности и размерной характеристики (межзерновые и каверновые поры и каналы).

Ниже в качестве примера приведено детальное исследование ориентации и анизотропии элементов микростроения и порового пространства для образца 491-2-09. Оценка анизотропии крупнопорового пространства и преимущественной ориентации поровых каналов была проведена с помощью цифрового анализа оптического контрастного изображения шлифованной поверхности. На рис. 3 представлена фотография крупнопорового пространства участка пластины, отпиленной от полноразмерного керна, на котором были проведены азимутальные определения по фильтрации и интервальному времени. Стрелкой показано главное направление фильтрации, на фотографии оно расположено под углом  $25,5^{\circ}$  к горизонтали.

Как видно из розы ориентации, в образце 461-2-09 имеется практически полное совпадение ориентации фильтрационных свойств (главного направления) и ориентации

крупнопорового пространства. Оценка анизотропии и ориентации микростроения проводилась по вторично-электронным РЭМ-изображениям (рис. 4).

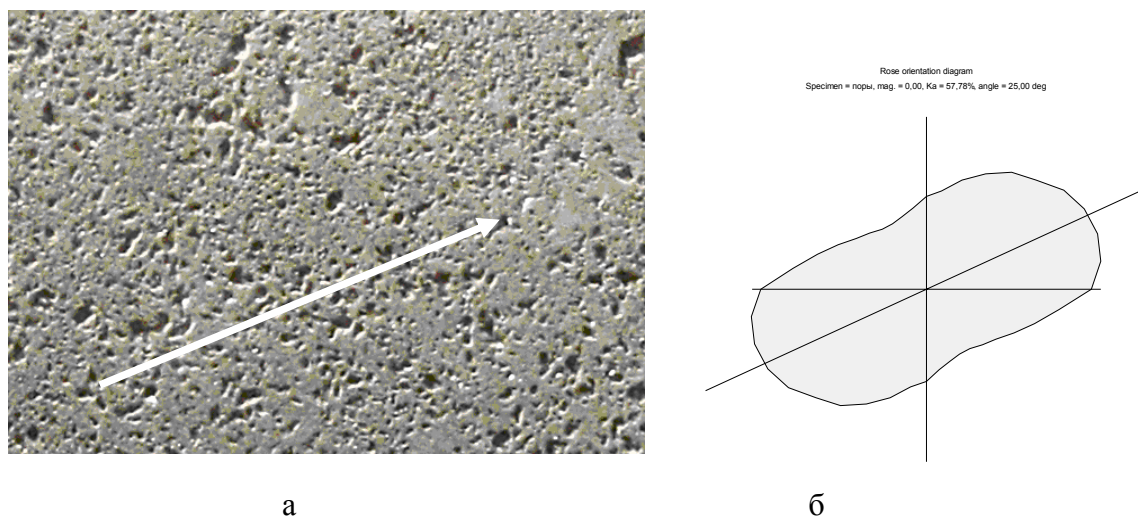


Рис. 3. Образец 461-2-09

*a* – фотография участка пластины, отпиленной от полноразмерного керна, угол главного направления фильтрации (показано стрелкой) 25,5 град. от горизонтали. Увеличение 5; *б* – роза ориентации крупнопоровых каналов.  $K_a = 57,78 \%$ , угол интегральной ориентации 25,0 град. Разница с главным направлением фильтрации 0,5 град.

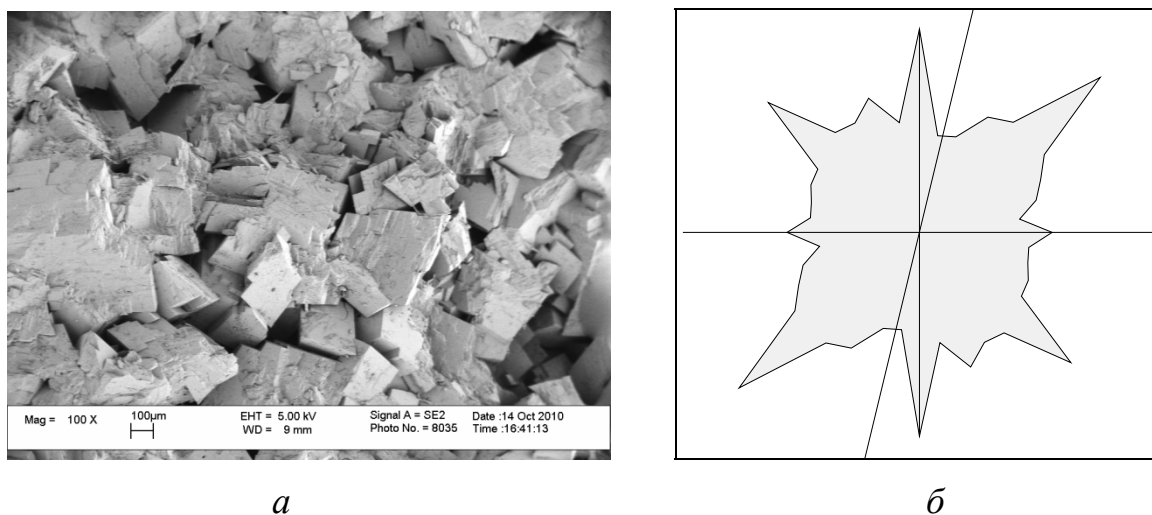


Рис. 4. Образец 461-2-09



анизотропию в пределах 10%, но со значительными углами отклонения интегральной ориентации от главного направления фильтрации. Другими словами, имеет место разнонаправленность систем поровых каналов различного генезиса.

В образце с одинаковыми фильтрационными свойствами в азимутальном направлении (461-6-09) ориентация кавернового и межзернового порового пространства составляет 6,19%, то есть практически отсутствует.

Для обобщения полученных данных в табл. 6 приведены результаты исследования анизотропии микроструктурных элементов и порового пространства образцов, а также рассчитанные углы отклонения направления интегральной ориентации от главного направления фильтрации.

Таблица 6

**Сводная таблица результатов исследования анизотропии микроструктурных элементов и порового пространства образцов**

№ образца	Оптический метод с контрастным освещением		Растровый электронный микроскоп (РЭМ)		СПП-катодолюминесценция в РЭМ		Анизотропия фильтрационных свойств  Ка(ф), %
	Ориентированность крупных пор и каверн		Ориентированность кристаллов и агрегатов кальцита и доломита		Ориентированность (условно) мелких пор		
	Ка, %	Угол отклонения от главного направления, град	Ка, %	Угол отклонения от главного направления, град	Ка, %	Угол отклонения от главного направления, град	
461-2-09	57.78	Совпад.	25.8	48.22	8.59	58.95	32.7
461-6-09	6.19	Совпад.	23.0	Не ориент.	3.14	Не ориент.	3.6
461-33-09	44.41	11.92	59.9	5.23	9.72	13.6	87.0

## Обсуждение результатов

На основании полученных данных можно сделать следующие заключения. Анизотропия фильтрации тесно связана с микроструктурными параметрами породы. В изученных образцах основной причиной анизотропии фильтрационных характеристик является анизотропия порового пространства, причем ведущую роль играет система крупных поровых каналов размером более 350–500 мкм, ориентация которых отличается от ориентации более мелкой системы каналов матричной капиллярной межзерновой пористости. Прямой зависимости между коэффициентом анизотропии крупных поровых каналов, полученным методом анализа изображений, и коэффициентом анизотропии проницаемости не наблюдается, что связано с одновременным влиянием всей поровой системы на фильтрацию. Ориентация каверновых каналов мало связана с ориентацией кристаллов и зерен карбонатной матрицы. Образцы коллектора, в которых нет фильтрационной анизотропии (образец 461-6-09, доломит), имеют практически неориентированное крупнопоровое и межзерновое поровое пространство. В образцах 461-2-09 и 461-33-09 интегральное направление ориентации крупнопорового пространства либо совпало с главным направлением фильтрации, либо отклонилось на небольшую величину – 11,92 град для образца 461-33-09. Во всех изученных образцах имеется анизотропия микростроения кристаллической матрицы породы в пределах  $K_a = 23,0–59,9\%$ , которая связана с интегральной ориентированностью породообразующих кристаллов и агрегатов (зерен). Угол отклонения от направления максимальной фильтрации составил от 5,23 до 48,22 град.

Проведенные исследования показали высокую информативность применения растровой электронной микроскопии и цифрового анализа изображений для исследования задач, связанных с анизотропными свойствами пород-коллекторов нефти и газа. Установлено, что в карбонатных породах элементами симметрии ориентации являются микроструктурные элементы, такие как поровые каналы, зерна и кристаллы, а также агрегаты различного вещественного состава, входящие в породу. Известно, что согласно принципу Неймана симметрия любого физического свойства должна включать в себя элементы симметрии исследуемого материала. С этих позиций в карбонатных породах-коллекторах необходимо выделять поровое пространство как самостоятельную структуру, то есть принцип Неймана следует применять отдельно к микростроению и поровому пространству. Это связано с тем, что ориентация кристаллов и зерен породы не

приводит к синхронной ориентации всего порового пространства. Как показали электронно-микроскопические исследования, в карбонатных сложнопостроенных породах крупнопоровое и каверновое поровое пространство (размером более 0,5 мм) может иметь иную ориентацию, отличную от капиллярных межзерновых поровых каналов (размером 0,0002–0,5 мм). Это объясняется тем, что кавернозная пористость может образовываться в процессе вторичных изменений, например растворения под действием давления и температуры. Процессы растворения карбонатов очень чувствительны к структурным неоднородностям и другим многочисленным факторам, влияющим на скорость растворения (неравномерное распределение минералов с различной устойчивостью к растворению, наличие примесей, состав растворов и т.д.). Это приводит к образованию системы крупнопоровых каналов с преимущественной ориентацией, отличной от ориентации межзерновых поровых каналов, формирование которых также связано со вторичными процессами, но на более ранней стадии, в результате диагенетической и катагенетической перекристаллизации. Ориентация межзерновых поровых капиллярных каналов зависит от характера упаковки кристаллов и зерен карбонатной матрицы. Следует иметь в виду, что сложнопостроенные высокопористые карбонатные породы, как правило, имеют многоуровневую систему поровых каналов с различным диапазоном размеров. В кавернозных породах система межзерновых поровых каналов может иметь меньший доленой вклад в проницаемость, чем система крупных каверновых каналов. В то же время, как уже отмечалось, интегральная ориентация каверновых каналов, образованных за счет растворения, может иметь другое направление, отличное от направления системы межзерновых пор. В этом случае анизотропия фильтрационных свойств и интервального времени будет разнонаправленной. По данным исследований в РЭМ, связанность поровых каналов также является важной составляющей анизотропии флюидопроводимости в различных азимутальных направлениях. Это объясняется тем, что фильтрация зависит от связанности пор. Ранее проведенными исследованиями установлено, что ориентированность поровых каналов влияет на связанность пор в разных направлениях; как правило, она выше в преимущественном направлении ориентации. По-видимому, связанность порового пространства изменяется в результате уплотнения и разуплотнения пород под воздействием тектонических напряжений. Однако вопрос связанности поровых каналов в различных направлениях требует дальнейшего детального исследования микростроения на ориентированных образцах.

Таким образом, можно сделать вывод, что направление максимальной скорости фильтрации в изученных карбонатных породах определяется долевой проницаемостью межзерновых капиллярных пор и крупных пор растворения, имеющих различную интегральную ориентацию. Проведенными исследованиями установлено, что в карбонатных породах имеется ориентированность породообразующих кристаллов кальцита и доломита и ориентированность порового пространства, которое определяет изменчивость фильтрационных характеристик в различных азимутальных направлениях.

Полученные в настоящей работе результаты имеют практическое значение при разработке месторождений, так как неучет азимутальной ориентированности порового пространства пород приводит к тому, что при закачке воды в скважину направление потоков жидкости отклоняется от проектных значений. Это ухудшает охват нефтенасыщенного пласта и увеличивает количество остаточной нефти из-за невыработки неохваченных участков.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Ботвинкина Л.Н.* Слоистость осадочных пород. М.: Изд-во АН СССР, 1962. 542 с.
2. *Багринцева К.И.* Трещиноватость осадочных пород. М.: Недра, 1982. 256 с.
3. *Меркулов В.П., Третьяков К.Г.* Методика пространственного палеомагнитного ориентирования керна скважин // Геофизические методы при разведке недр и экологических исследованиях: сб. материалов Всерос. науч.-техн. совещ. Томск, 1996. С. 21.
4. *Меркулов В.П., Краснощекова Л.А., Александров Д.В., Мартынова Т.Е.* Исследование анизотропии коллекторов нефтяных месторождений // Сборник тезисов докладов 9-й Международной научно-практической конференции, Геомодель-2007, Геленджик, 16–21 сент. 2007. М., 2007. С. 55.
5. *Альвард А.А., Зайнутдинов Р.С.* Анизотропия проницаемости горных пород коллекторов и ее роль в регулировании процессов разработки // Интервал. 2003. № 9(56). С. 26–31.
6. *Chen H.Y., Teufel L.W.* Timing and distance of well interference in anisotropic reservoirs // SPE annual technical conference and exhibition. San Antonio, TX. 29 Sept. 2 – Oct. 2002. SPE Paper 77455.



7. Гурбатова И.П., Михайлов Н.Н. Изучение анизотропии сложнопостроенных карбонатных коллекторов лабораторными методами // Вестн. ЦКР «Роснедра». 2010. № 3.С. 28–35.
8. Гурбатова И.П., Михайлов Н.Н. Масштабные и анизотропные эффекты при экспериментальном определении физических свойств сложнопостроенных коллекторов // Материалы международной конференции «Петрофизика: современное состояние, проблемы, перспективы». М., 2010. С. 65.
9. Соколов В.Н., Юрковец Д.И. и др. Использование Фурье-анализа РЭМ-изображений для получения морфологических характеристик микроструктуры // Изв. АН. Сер. физ., 1998. Т. 62, №3. С. 450–454.
10. Осипов В.И., Соколов В.Н., Румянцева Н.А. Микроструктура глинистых пород. М.: Недра, 1989. 210 с.
11. Кузьмин В.А., Скибицкая Н.А. Изучение анизотропии микростроения пород-коллекторов нефти и газа методами электронной микроскопии // Материалы XXIII Российской конференции по электронной микроскопии. Черноголовка, 2010. С. 298.
12. Smart P., Tovey K. Electron microscopy of soils and sediments-techniques. Oxford.: Clarendon Press, 1982.
13. Unitt B.M. A digital computer method for revealing directional information in images // J. Phys. E Ser. Z. 1975. Vol. 8. P. 423–425.
14. Кузьмин В.А. Методика изучения пустотного пространства пород в РЭМ // Тез. докл. 6 Всесоюзная конференция «Коллекторы газа на больших глубинах» 1987, С. 196.
15. Kuzmin V.A. X-ray, synchrotron and neutron techniques // J. Surf. Invest. 2007. Vol. 1, N 6. P. 687–690.
16. Большаков М.Н., Скибицкая Н.А., Кузьмин В.А. Изучение структуры порового пространства в растровом электронном микроскопе (РЭМ) с помощью компьютерной программы “Коллектор” // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2007. №8. С. 108–111.
17. Кузьмин В.А. А.с. 716087. Способ определения ориентации элементов растрового изображения. – Приор. от 9.06.1978; Оpubл. в 1980.
18. Дмитриев Н.М., Максимов В.М. О структуре тензоров коэффициентов фазовых и относительных проницаемостей для анизотропных пористых сред // Докл. РАН. 1998. Т. 358, № 3.