

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОТЕРМАЛЬНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ЮРСКИЕ ОТЛОЖЕНИЯ (ЗАПАДНАЯ СИБИРЬ)

М.Ю. Зубков
(ООО «ЗапСибГЦ»)

Скважины, вскрывающие базальные юрские отложения и кровельную часть до-юрского комплекса (ДК), часто попадают в зоны осветлённых пород [7, 10]. Причем эти зоны осветлённых пород из ДК поднимаются в юрские отложения и наблюдаются постепенные переходы по направлению снизу-вверх от светло-серых, почти белых базальных отложений к серым и темно-серым породам, сохранившим первоначальный цвет. Именно такая картина наблюдается, например, в пределах Убинского и Северо-Варьеганского месторождений, где базальные юрские отложения представляют собой углистые, плохо сортированные аргиллиты, содержащие в себе остроугольные обломки различных размеров. В них зона осветления имеет мощность около 8-10 м (рис. 1).

Очевидно, что осветление углистых отложений обусловлено окислением органического вещества, присутствующего в их составе. Следовательно, проникающие из фундамента в юрские отложения гидротермальные флюиды должны содержать в своем составе окислитель, которым может быть, например, кислород.

Действительно, в монографии В.И. Бгатова убедительно доказывается, что кислород может иметь глубинное происхождение и входить в состав флюидов, выделяющихся из приповерхностных магматических тел, например, базальтов, при их кристаллизации [1]. Поэтому этот ювенильный кислород способен вызвать осветление пород, содержащих в своем составе органическое вещество, как слагающих ДК, так и базальные юрские отложения [10].

Кроме интенсивного осветления пород, гидротермальные флюиды вызывают формирование вторичной пористости, растворяя неустойчивые минеральные зерна и образуя новые минеральные ассоциации, а также участвуют в самом процессе генерации нафтидов из органического вещества, входящего в состав юрских отложений [7, 8, 10-12].

Действительно, существуют публикации, в которых обращается внимание на прямую связь гидротермальных флюидов и нафтидов [2, 3, 5, 14-16, 26]. Однако в большинстве этих публикаций нет четких доказательств происхождения этих нафтидов, хотя некоторые ученые полагают, что они могут иметь ювенильное происхождение [2, 3, 5, 14-19, 22, 25-27].

Большинство публикаций, посвященных влиянию эндогенных процессов на нафтогенез, к сожалению, имеют умозрительный характер, и не основаны на экспериментальных доказательствах. Существуют лишь единичные публикации, посвященные экспериментальному моделированию гидротермальных систем с участием осадочных пород, содержащих в своем составе органическое вещество [9, 29].

Поэтому целью настоящей публикации является продемонстрировать влияние гидротермальных флюидов, имеющих различный состав и температуру, на формирование зон осветления в юрских отложениях, образование в них вторичной пористости, как за счет растворения обломочных зерен различных неустойчивых минералов, так и вследствие образования нафтидов из органического вещества, присутствующего в их составе

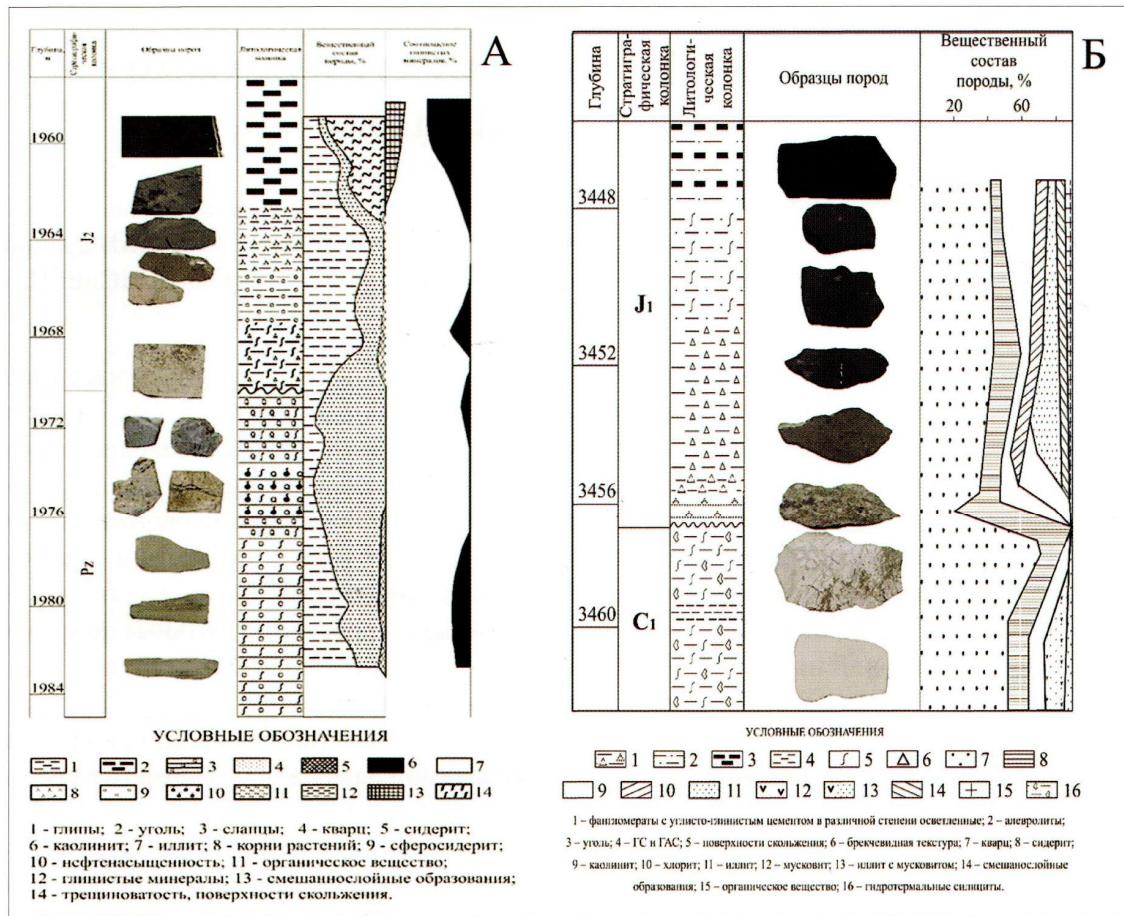


Рис. 1. Литологические разрезы с зонами осветления базальных юрских отложений и кровельной части палеозойского дююрского комплекса по скважинам Убинского (а) и Северо-Варьеганского (б) месторождений

и, наконец, непосредственного участия гидротермальных флюидов в формировании углеводородных залежей.

Аппаратура и методики

Поскольку по результатам исследований вулканологов в составе гидротермальных флюидов вторым по содержанию после воды является углекислый газ и угольная кислота, образующаяся при растворении CO₂ в воде [4, 14, 20, 21, 23], то основной объём опытов выполнен с гидротермальными растворами, имевшими различную концентрацию CO₂. По данным тех же исследователей, гидротермальные флюиды характеризуются очень низкой минерализацией [4, 14, 20, 21, 23], являясь по сути почти дистиллятами, поэтому большинство экспериментов проводилось с дистиллированной водой без добавления солей.

Присутствие кислорода в составе гидротермальных флюидов в различной концентрации моделировалось добавлением в них перекиси водорода (H₂O₂).

Температурный интервал, в котором проводились исследования, был выбран в соответствии с результатами определения температур гомогенизации газово-жидких вклю-

чений в кристаллах кварца, отобранных автором из верхнеюрских отложений (пласт КС₁) и исследованных специалистами ЗапСибНИГНИ [28].

Эксперименты проводились в Институте геологии и минералогии СО РАН им. В.С. Соболева под руководством д.г.-м.н., профессора Г.Ю. Шведенкова [9, 29].

Для гидротермального моделирования использовались реакторы (автоклавы) объемом около 10 см³, изготовленные из нержавеющей стали, давление в которых задавалось по коэффициенту заполнения, исходя из их объема, данных о фазовых равновесиях в системе вода-двуокись углерода и соотношению между давлением, объемом и температурой в этой системе [24].

Образцы для экспериментов готовились следующим образом. С помощью алмазной пилы вырезались прямоугольные столбики сечением около 1 см² и длиной примерно 2-3 см. После этого изготовленные образцы помещались в автоклав, заливались дистиллированной водой и выдерживались при требуемых температурах и давлении. В большинстве экспериментов в качестве буфера (с целью поддержания величины Eh около нейтральных значений) добавлялась пиритовая шихта.

Образцы после проведения экспериментов изучались под бинокуляром, а затем исследовались с использованием РСА¹ и съемки на РЭМ. Последняя процедура была направлена на определение изменения структуры порового пространства образцов после гидротермальной обработки. Изменения минерального состава фиксировались главным образом на поверхности образца. Кроме того, исследованию подвергалась также часть осадков, образовавшихся в процессе эксперимента. Элементные спектры, приводимые рядом со снимками, были получены с их площади, если нет иных указаний при их описании.

Опыты объединялись в серии, которые, как правило, проводились при одной и той же температуре, но с различной концентрацией H₂O₂ или CO₂ в составе ГФ. Все эксперименты осуществлялись при одном и том же гидростатическом давлении, равном 70 МПа. В процессе разгерметизации реакторов после опытов из всех выделялся газ.

Оценка формирующейся вторичной пористости проводилась лишь на качественном уровне, поскольку её образование происходило, главным образом, в приповерхностной части образца, так как система образец-ГФ была закрытой и процесс растворения образца флюидом прекращался по мере его насыщения растворимыми минеральными компонентами.

Для анализа характера растворения или выщелачивания поверхности образцов юрских отложений под действием ГФ выбирались участки, на которых отсутствовали отложения вторичных минералов, имевших гидротермальное происхождение.

Результаты исследований

Система H₂O-H₂O₂

Опыты проводились при температуре 390°С. Длительность экспериментов составляла 10 суток. Концентрация кислорода в ГФ задавалась раствором H₂O₂. Объемное соотношение H₂O/H₂O₂ изменялось от 8/0 до 5/3. Во все автоклавы в качестве буфера добавлялась пиритовая шихта.

¹ Сокращения (аббревиатуры), используемые в настоящей публикации: Ам.кр – аморфный кремнезём; Анг – ангидрит; Гем – гематит; ГФ – гидротермальный флюид; Ил – иллит; Кв – кварц; Кт – каолинит; Кц – кальцит; Mg – магнетит; ОВ – органическое вещество; Пи – пирит; Пир – пирротин; ПШ – полевые шпаты (кислые плагиоклазы); Сид – сидерит; РСА – рентгеноструктурный анализ; РЭМ – растровый электронный микроскоп; Fe-Хл – железистый хлорит; Хкз – халькозин (Cu₂S); χ_{CO₂} – мольная доля углекислого газа в составе гидротермального флюида; S⁰ – самородная сера.

Эксперимент 15

В качестве исходного образца в этом эксперименте использовался темно-серый углистый аргиллит, состоящий из глинистых минералов (в порядке убывания: Кт, Хл, Ил) с примесью мелкоалевритовых обломков Кв и ПШ, а также небольшим содержанием диагенетического Кц. Исходный состав гидротермального флюида: 100 % H_2O и 0 % H_2O_2 , то есть в рассматриваемом эксперименте в составе ГФ присутствовала только вода.

После эксперимента наблюдалось слабое осветление поверхности образца, образование на нем многочисленных капелек битума, вытопившегося из микролинзочек углей. Причем, в зависимости от формы углефицированных древесных остатков, битум вытапливался либо в виде довольно изометричных капель, либо в форме удлиненных тел (рис. 2а-в). Давление, которое возникало при переходе твердых органических остатков в жидкое и газообразное состояния, превышало прочностные свойства образца и по этой причине в нем возникали трещины флюидоразрыва, по которым происходило выделение битума на его поверхность (см. рис. 2б). Микроскопические полости, присущие в возникших каплях битума, свидетельствуют о том, что процесс его образования сопровождался выделением из него газообразных продуктов (рис. 2б, в).

Анализ поверхности образца после эксперимента показал, что она подверглась очень слабому растворению, вследствие чего на ней образовались микропустоты, радиус которых в среднем не превышает 1.2-2.5 мкм (рис. 2б).

Сравнение данных РСА образца до и после гидротермального воздействия на него показало, что соотношение Кв и ПШ почти не изменилось. С поверхности образца исчез Кц, а среди глинистых минералов отмечаются заметные изменения – произошло практически полное растворение Кт и, напротив, увеличение доли Fe-Хл.

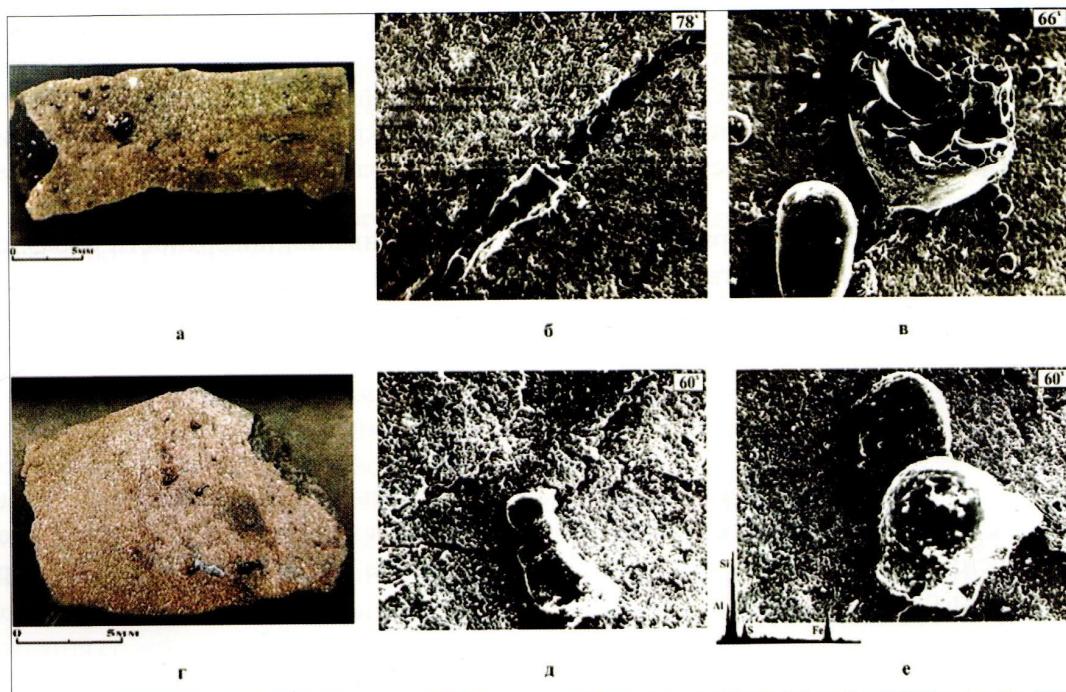


Рис. 2. Фотографии образцов углистого аргиллита (а, г) и снимки РЭМ их поверхностей (б, в, д, е) после воздействия на них гидротермальных флюидов, имевших $T=390$ °C и соотношение H_2O/H_2O_2 в их составе, равное 8/0 (а-в) и 7/1 (г-е)

На поверхности пиритовых зерен, входящих в состав пиритовой шихты, местами отмечается образование мелкочешуйчатого гидротермального Fe-Хл.

Таким образом, гидротермальная обработка образца углистого аргиллита ГФ, не содержащим H_2O_2 , привела к слабому частичному растворению на его поверхности минеральных фаз, представленных преимущественно Кц и Кт, образованию Fe-Хл и интенсивному преобразованию углистого детрита в битум, что вызвало возникновение в нем трещин флюидоразрыва и появление многочисленных капелек и потоков битума. В небольшом количестве образовались гидротермальные Анг и апатит.

Эксперимент 201

В качестве исходного образца использован тот же темно-серый углистый аргиллит с мелкими углистыми прослойками и рассеянным углистым детритом. Соотношение H_2O/H_2O_2 в этом эксперименте составляло 7/1, то есть перекись водорода в составе ГФ присутствовала в минимальном количестве.

После завершения эксперимента наблюдалось слабое осветление поверхности образца, появился охристый налет, представленный мелкими кристалликами Fe-Хл и Mg (рис. 2г). Так же, как и в предыдущем опыте, на поверхности рассматриваемого образца после завершения эксперимента появились капельки битума, однако их количество и размеры заметно меньше, чем в предыдущем опыте (сравнение приведено на рис. 2а-в и г-е).

Поверхность образца после опыта носила признаки слабого растворения, отмечаются тонкие трещины флюидоразрыва, по которым на нее вытекал битум (рис. 2д). Судя по элементному спектру, полученному с поверхности образца, она сложена главным образом Кв, Ил, а также гидротермальными Mg и Fe-Хл (рис. 2е).

Анализ элементного состава образовавшихся капелек битума показал, что в них отмечается высокое содержание серы (то есть это тиобитум), а на их поверхности присутствуют присыпки, представленные выделившимися из ГФ Ам.кр и Fe-Хл (рис. 2е).

Сопоставляя результаты РСА образца до и после воздействия на него ГФ можно отметить, что с его поверхности исчезли Кц и Кт, уменьшилось содержание ПШ, а содержание Fe-Хл, напротив, увеличилось.

В нижней части образца на границе с шихтой пирита наряду с тонкодисперсным Mg отмечается присутствие мелких кристаллов S^o. Образование сульфатов не установлено, поэтому можно предположить, что из-за невысокой концентрации кислорода, который образовался вследствие разложения H_2O_2 в ГФ, окисление Pi осуществлялось в соответствии со следующей реакцией:



Образовавшийся водород, в свою очередь, взаимодействуя с перекисью водорода, превращается в воду:



Таким образом, проведенный эксперимент с невысоким содержанием в ГФ перекиси водорода, показал, что отмечается слабое растворение минералов, присутствующих на поверхности образца (главным образом Кц, Кт и ПШ) и образование новых, представленных Fe-Хл, S^o и Mg. Наблюдается окисление ОВ (что вызывало осветление его поверхности) и генерация битума. Последнее повлекло за собой образование мелких трещин и полостей флюидоразрыва, по которым битум вытекал на поверхность образца. Окисление Pi, присутствовавшего в автоклаве в виде буфера, привело к формированию

небольшого количества S^o и тонкодисперсного Mg, который придал слабый буроватый оттенок поверхности образца в местах его отложения.

Эксперимент 14

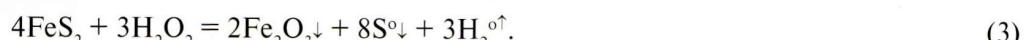
В качестве исходного образца в этом эксперименте использован тот же темно-серый углистый аргиллит с мелкими углистыми прослойками и рассеянным растительным детритом. Отношение H₂O к H₂O₂ в ГФ равно 6/2. Иными словами, в рассматриваемом эксперименте концентрация перекиси водорода заметно возросла по сравнению с предыдущим опытом.

Анализ извлеченного из автоклава после опыта образца показал, что его поверхность оказалась интенсивно выщелоченной, что привело к формированию многочисленных микропустот. Кроме того, из-за тонкой пленки мелкодисперсных окислов железа, отложившихся на его поверхности, образец приобрел светло-бурый цвет (рис. 3а). Присутствовавший в составе ГФ кислород окислил ОВ, поэтому под светло-бурым пленкой окислов железа поверхность образца имеет светло-серый цвет.

Даже при небольшом увеличении хорошо видна трещиновато-микропористая структура поверхности образца, которая сформировалась сначала за счёт флюидоразрыва, вызванного генерацией битума, а затем его окисления (см. рис. 3б). Раскрытость трещин составляет 30-80 мкм, а их протяженность – более 0.8-1.8 мм. Судя по данным элементного анализа поверхности образца, на ней присутствуют преимущественно Кв, Ил и минералы гидротермального происхождения, представленные Гем, Mg-Fe Хл и небольшой примесью Анг (см. рис. 3б).

При еще большем увеличении наблюдается рыхлая мелкочешуйчатая микротекстура поверхности образца, вызванная интенсивным выщелачиванием неустойчивых минералов (Кц, Кт и ПШ) и окислением ОВ, а также образованием новых минералов – Mg-Fe Хл и Гем (рис. 3в).

Сопоставление данных РСА образца до и после воздействия на него ГФ показало, что с его поверхности исчезли Кт и Кц, уменьшилось содержание ПШ, напротив, немного увеличилась концентрация Mg-Fe-Хл, появился тонкочешуйчатый Гем. То есть, в отличие от уравнения реакции (1), описывающего образование Mg, в случае более высокой концентрации в составе ГФ H₂O₂ протекает реакция с образованием Гем:



Окисление ОВ, представленного первоначально углистым детритом, а затем образовавшимся из него битумом, предполагает протекание в автоклаве следующей реакции:



Следовательно, в составе ГФ в результате протекающих в автоклаве реакций H₂O₂ с ОВ обязательно появится CO₂ и дополнительное количество H₂O. В предыдущем эксперименте также образовывались CO₂ и H₂O, однако в заметно меньшем количестве.

Содержащаяся в составе углистого детрита и битума сера может выделиться в виде самостоятельной фазы или окислиться H₂O₂ до серной кислоты в соответствии с уравнением реакции:



Образовавшийся водород, в соответствии с уравнением реакции (2), взаимодействуя с H₂O₂, превращается в воду. Образующаяся H₂SO₄, реагируя с Кц, присутствующим в составе образца, а также с аортитовым миналом зёрен ПШ, образует гидротермальный Анг.

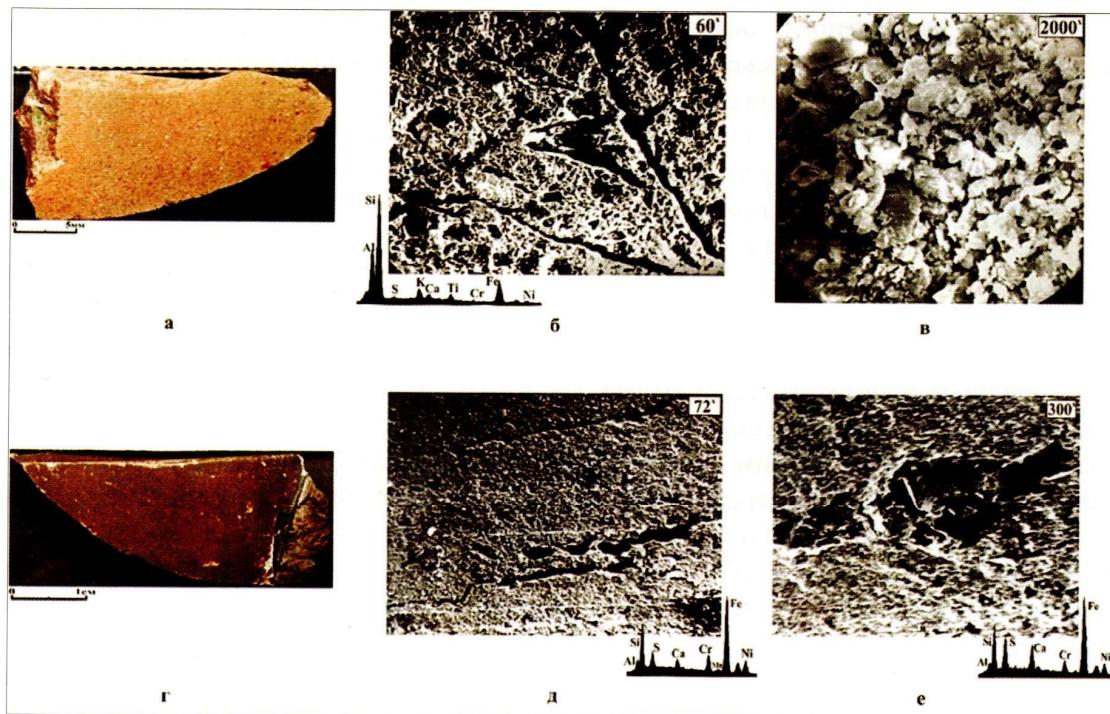


Рис. 3. Фотографии образцов углистого аргиллита (а, г) и снимки РЭМ их поверхности (б, в, д, е) после воздействия на них гидротермальных флюидов, имевших $T=390\text{ }^{\circ}\text{C}$ и соотношение $\text{H}_2\text{O}/\text{H}_2\text{O}_2$ в их составе, равное 6/2 (а-в) и 5/3 (г-е)

Таким образом, увеличение в составе ГФ доли H_2O_2 ведет к тому, что ОВ, входящее в состав приповерхностной части образца, полностью окисляется, что, в свою очередь, вызывает формирование дополнительной емкости вторичного происхождения. Кроме того, вследствие окисления ОВ в составе флюида появляется CO_2 , способствующая растворению неустойчивых в этой термодинамической обстановке минералов, за счет которых также формируется дополнительная вторичная емкость. Более того, образуется H_2SO_4 , благодаря реакции которой с Кц и/или анортитовым миналом ПШ появляется Анг.

Эксперимент 2

В качестве исходного образца в этом эксперименте использован тот же образец темно-серого углистого аргиллита с тонкими углистыми прослойками и рассеянным растительным детритом. Соотношение воды и H_2O_2 в ГФ составляло 5/3. То есть, в рассматриваемом эксперименте концентрация H_2O_2 в составе ГФ была максимальной, по сравнению с предыдущими опытами.

Образец, извлеченный из автоклава после опыта, имел темно-бурую окраску. В нижней его части отмечается линейная субгоризонтальная двухфазная граница (жидкость-газ), обозначенная мелкими кристаллами Гем темно-серого цвета (рис. 3г).

Поверхность исходного образца первоначально была явно осветлена за счет окисления ОВ, содержавшегося в нем, на ней присутствуют многочисленные трещины флюидоразрыва и полости, оставшиеся от окислившихся углистого детрита и вытопившегося из них битума. Также отмечаются следы выщелачивания неустойчивых минералов (рис. 3д, е). Раскрытость образовавшихся микротрещин составляет 15-75 мкм, а их протяженность часто превышает 1.5-2 мм (рис. 3д, е).

Судя по элементному спектру, полученному с поверхности образца, на нем присутствуют Кв, Анг, Кт, а также Гем (рис. 3е). Кристаллы новообразованного Анг часто располагаются в образовавшихся микротрецинах (см. рис. 3е). Кроме того, присутствуют соединения Cr и Ni. Эти элементы были выщелочены ГФ из тела автоклава.

Кроме Анг и Гем на поверхности образца присутствуют войлокоподобные агрегаты сульфатов Al, K и Na типа квасцов, а также сернокислого алюминия, встречающегося в природе под названием миллезевичит которые, вероятно, являются закалочной фазой, выпавшей из пересыщенного ГФ при его охлаждении.

На двухфазной границе образовался чешуйчатый мелкокристаллический Гем, отдельные его кристаллы имеют размеры 5-30 мкм, на них позднее отложились гораздо более крупные кристаллы Анг (рис. 3г). Из исходных минералов, входящих в состав образца, на его поверхности сохранился, главным образом, лишь Кв (рис. 3д, е). То есть, под действием ГФ с высоким начальным содержанием кислорода происходит интенсивное окисление поверхности образца, что связано с образованием серной кислоты за счёт окисления пиритовой шихты и, соответственно, высокой кислотности образующегося в результате этого ГФ. В этих чрезвычайно кислых условиях растворяются и выносятся практически все элементы кроме кремния, обладающего чрезвычайно низкой растворимостью в кислом ГФ [4, 7, 10, 14, 21].

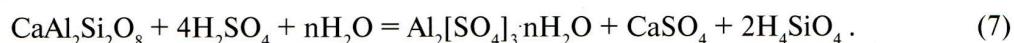
Анализ результатов РСА образца до и после воздействия на него ГФ с высоким начальным содержанием в нем кислорода показал, что на его поверхности полностью окислилось ОВ, входившее в его состав. Уменьшилось содержание ПШ, полностью исчез Кц, увеличилась доля Кв, появились Анг, Гем и Кт.

Следует обратить внимание на тот факт, что в предыдущих экспериментах Кт был неустойчив и полностью растворялся ГФ, а в рассматриваемом эксперименте, напротив, отмечается его образование. Этот факт, вероятно, объясняется чрезвычайно высокой кислотностью образовавшегося ГФ вследствие окисления кислородом, серы, входящей в состав ОВ, и пиритовой шихты. Вследствие окисления S⁰ и Pi образовался серный ангидрит, который, реагируя с водой, превратился в сильную серную кислоту.

В изучаемом эксперименте встречены в основном те же новообразованные фазы, что и в предыдущих опытах. Однако очень высокая концентрация H₂O₂ привела к возникновению ГФ с очень высоким окислительным потенциалом (Eh) и чрезвычайно сильной кислотностью (очень низкая величина pH). Вероятно, отсутствие в достаточном количестве в составе углисто-алевритистого аргиллита таких сильных нейтрализаторов, как карбонаты, не позволило значительно повысить величину pH ГФ, из-за чего произошло образование фаз, богатых алюминием, таких как калинатровые квасцы и миллезевичит в соответствии со следующими реакциями образовавшегося сернокислого ГФ, во-первых, с K и Na миналами ПШ:



и, во-вторых, с аортитовым миналом, также входящим в состав ПШ:



Таким образом, в результате протекания этих реакций на поверхности образца должен накапливаться кремнезем, что и наблюдается в действительности (рис. 3д, е).

Так как в составе исходного образца Кц очень мало, то совместное образование Анг и Кт, скорее всего, идет в основном за счет реакции образующейся серной кислоты с аортитовым миналом, присутствующим в обломках ПШ, входящих в его состав:



Из приведенного выше уравнения следует, что кроме Анг в результате реакции аортитового минала с серной кислотой должен образовываться и Кт, что и наблюдается в действительности.

В заключение следует отметить, что весь присутствовавший в приповерхностной части образца углистый детрит и образовавшийся из него битум полностью окислился, из-за чего в составе ГФ появились CO_2 и H_2O , а также в образце сформировалась дополнительная вторичная пористость, как и в предыдущем эксперименте (рис. 3д, е).

Эксперимент 19

В качестве исходного образца в этом эксперименте использовался тонкослоистый темно-серый слабоуглистый аргиллит, сложенный глинистыми минералами (в порядке убывания: Кт, Хл, Ил), мелкоалевритовыми обломками Кв и Пш, а также микрооолитами диагенетического Сид. Исходное соотношение H_2O к H_2O_2 равно 8/0, то есть в этом эксперименте H_2O_2 в составе ГФ полностью отсутствовала.

После проведения эксперимента отмечалось едва заметное осветление поверхности образца, а также следы слабого её выщелачивания (рис. 4а).

Микроскопический анализ показал, что битум выплавлялся и вытекал на поверхность по трещинам флюидоразрыва, а вместо самих углистых прослоев возникали открытые полости, раскрытость которых составляет 10-30 мкм (см. рис. 4б, в).

Кроме трещин флюидоразрыва и полостей, отмечаются довольно многочисленные микрокаверны округлой формы (диаметром 10-50 мкм), возникшие, скорее всего, вследствие растворения микростяжений Сид.

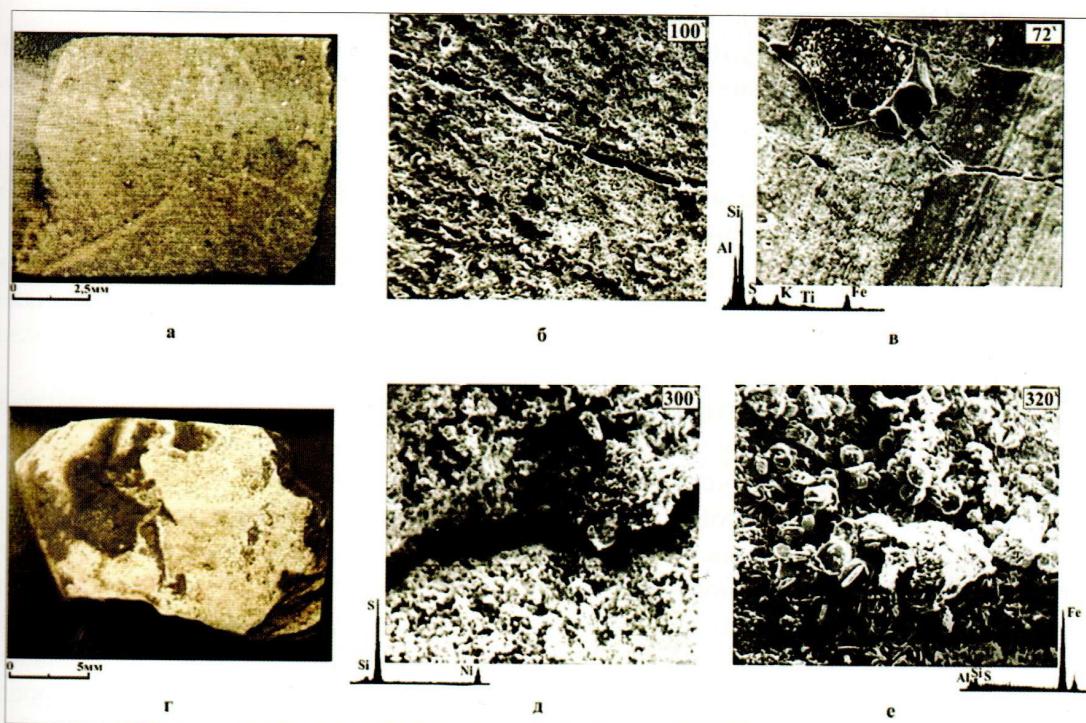


Рис. 4. Фотографии образцов слабоуглистого аргиллита (а, г) и снимки РЭМ их поверхностей (б, в, д, е) после воздействия на них гидротермальных флюидов, имевших $T=390$ °С и соотношение $\text{H}_2\text{O}/\text{H}_2\text{O}_2$ в их составе, равное 8/0 (а-в) и 5/3 (г-е)

Судя по результатам элементного анализа поверхности образца после опыта, она сложена главным образом Кв, Ил, Хл с небольшой примесью ПШ (рис. 4в). На снимке поверхности образца, выполненного в режиме КОМПО, хорошо видно распределение мелких зерен Пи светло-серого (почти белого) цвета, отложившихся преимущественно на поверхности битума, имеющего на снимке темно-серый (почти черный) цвет (рис. 4в).

Анализ результатов РСА поверхности образца, полученных до и после гидротермальной обработки, обнаружил, что воздействие ГФ вызвало резкое уменьшение содержания ПШ, полностью растворился Сид и Кт. Напротив, содержание Fe-Хл увеличилось. Заметных изменений в концентрации Ил не наблюдается, а вот содержание Кв явно выросло, то есть произошло окремнение поверхности образца.

Таким образом, полученные результаты по воздействию ГФ, содержащего в своем составе лишь воду, на образец углистого аргиллита свидетельствуют о том, что происходит незначительное растворение и вынос неустойчивых минеральных компонентов из состава образца, генерация углистым веществом, содержащимся в нем, битума и газообразных углеводородов, растворение и переотложение Pi, содержащегося в виде шихты на дне автоклава, а также образование гидротермального Fe-Хл.

Эксперимент 18

В качестве исходного образца в этом эксперименте использован тот же тонкослойный темно-серый слабоуглистый аргиллит. Исходное соотношение воды и перекиси водорода во флюиде равно 5/3.

После завершения эксперимента отмечались следующие изменения: поверхность образца приобрела светло-серый цвет, однако местами на образце (особенно в его нижней части) отложились окислы железа, придавшие ему темно-серый, иногда с буроватым оттенком цвет (рис. 4г); отмечается интенсивное растворение неустойчивых минералов и окисление ОВ, входящего в состав углистого аргиллита.

Вследствие окисления углистого материала, входившего в состав образца, в зависимости от его формы (прослои или отдельные обломки) формировались протяженные полости (рис. 4д) или отдельные микрокаверны. Размеры микрокаверн составляют порядка 25-125 мкм, а раскрытость полостей – 20-40 мкм (рис. 4д). Поверхность образца вокруг полости покрыта микроагрегатами S^o, сульфата никеля и небольшим количеством Ам.кр (рис. 4д). Вокруг микрокаверн отмечается Ил, Кв, S^o, Гем и сульфат Ni.

Изредка S^o образует довольно хорошо ограненные единичные кристаллы ромбоэдрической формы, поверхность которых покрыта тонкими корочками, сложенными более поздними по образованию микроскопическими агрегатами, состоящими из Ам.кр и сульфата Ni, которые, скорее всего являются закалочными фазами.

Анализ участков, покрытых темно-серой с буроватым оттенком пленкой, показал, что они сложены несколькими минеральными фазами, представленными преимущественно округлыми агрегатами чешуйчатого Гем с примесью зерен S^o и Кт (рис. 4е).

Сопоставление результатов РСА поверхности образца, полученных до и после гидротермальной обработки, выявило, что воздействие ГФ привело к практически полному растворению ПШ и Сид. Немного снизилась концентрация Ил и Хл, причем их кристаллическая структура характеризуется слабой упорядоченностью (пики на дифрактограммах стали более широкими, а их интенсивность уменьшилась). Содержание Кт увеличилось, причем его кристаллическая структура также является разупорядоченной. Заметно возросла доля Кв (отмечается окремнение поверхности образца). Появились Гем, S^o и сульфат Ni.

ОВ, присутствовавшее в приповерхностной части образца, полностью окислилось, что привело к формированию дополнительной пористости в исходном образце и дополнительного количества CO₂ и H₂O в составе ГФ.

Система $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$

С целью наглядного представления об интервалах изменений значений температур и мольной доли CO_2 в выполненных сериях гидротермальных экспериментов приводится соответствующая диаграмма (рис. 5).

Серия $\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$

Исходными образцами в этой серии экспериментов служили различные по составу породы – от углистых аргиллитов до крупнозернистых песчаников. Мольная доля углекислоты (χ_{CO_2}) изменялась от 0 до 0.16. Температура в экспериментах варьировала от 235 до 300 °C (см. рис. 5). Длительность экспериментов (τ) изменялась от 10 до 16 суток. Шихта Пи в этой серии опытов не добавлялась.

Рассмотрим результаты двух экспериментов, в которых в качестве испытуемого использовался алевритистый песчаник, обломочная часть в котором состояла из зерен Кв и ПШ, а глинистый цемент представлен в порядке убывания Кт, Хл, Ил. Раннедиагенетический Сид присутствовал в виде мелких сферолитов.

Эксперимент б

В составе ГФ рассматриваемого эксперимента $\chi_{\text{CO}_2} = 0.10$, $T = 235$ °C, $\tau = 10$ суток. После эксперимента поверхность образца носила следы слабого выщелачивания, в результате чего образовались мелкие вторичные пустоты за счет растворения главным

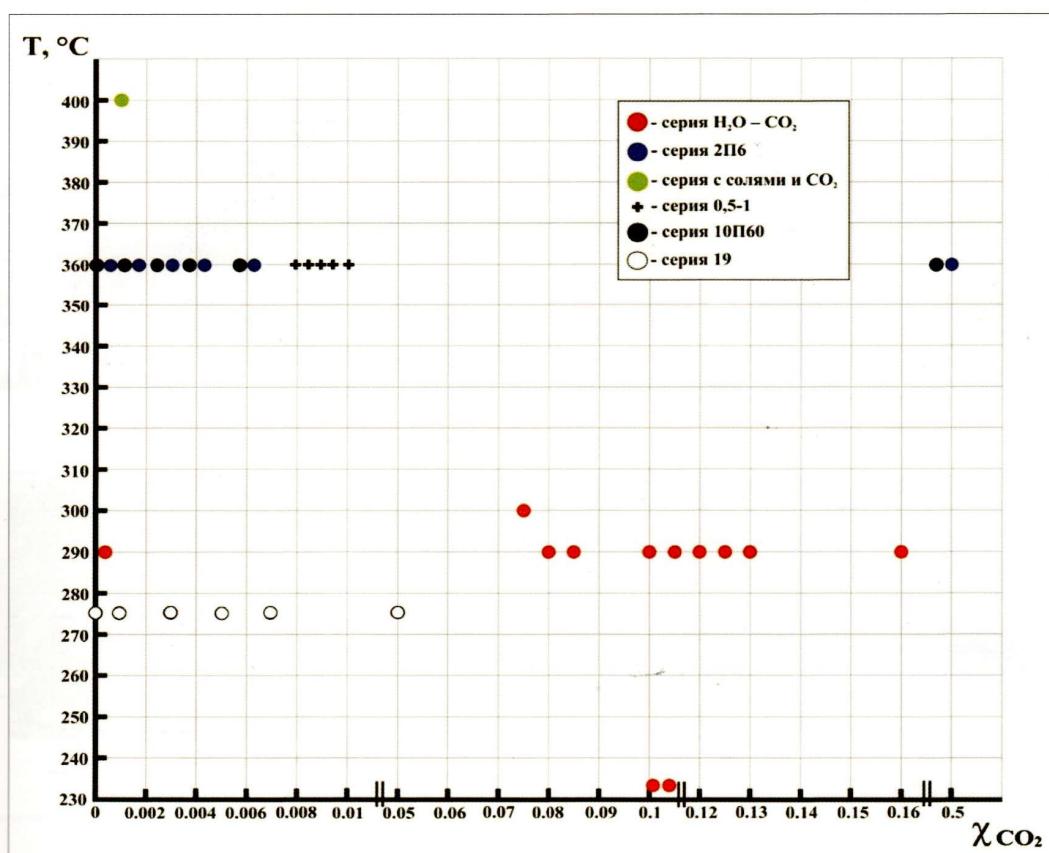


Рис. 5. Диаграмма $\chi\text{CO}_2 - T$ °C с фигуративными точками выполненных гидротермальных экспериментов

образом обломков ПШ (рис. 6а), что, в свою очередь, привело к окремнению поверхности образца (рис. 6б). В порах отмечаются редкие кристаллы гидротермального Сид (см. рис. 6в).

Эксперимент 204

В составе ГФ данного эксперимента $\chi_{CO_2} = 0.105$, $T = 290^\circ\text{C}$, $\tau = 10$ суток.

После эксперимента поверхность образца носила следы выщелачивания, а цвет образца почти не изменился. На ней возникли тонкие корочки темно-серого с буроватым оттенком цвета, с бархатистым отливом, напоминающие по форме «осинки» (рис. 6г). Образовались многочисленные мелкие пустоты вследствие преимущественного выщелачивания ГФ зерен ПШ, из-за чего произошло окремнение поверхности образца (рис. 6д). Бархатистые корочки оказались сложенными микрочешуйчатым гидротермальным Fe-Хл, отложившимся на микроолитах Сид (рис. 6е).

Следующие два эксперимента проводились с образцом алевритистого песчаника, содержащего в себе тонкие прослои углистого дегрита. Его обломочная часть также состояла из Кв-Пш обломочных зерен, скементированных глинистым (Кт, Хл, Ил) и карбонатным (Кц, Сид) цементом.

Эксперимент 7

В составе ГФ рассматриваемого эксперимента $\chi_{CO_2} = 0.110$, $T = 235^\circ\text{C}$, $\tau = 10$ суток.

После эксперимента отмечалось очень слабое осветление его поверхности и появление многочисленных полостей различного размера, которые образовались в результате растворения в основном обломков ПШ, а также Кц, что, в свою очередь, привело

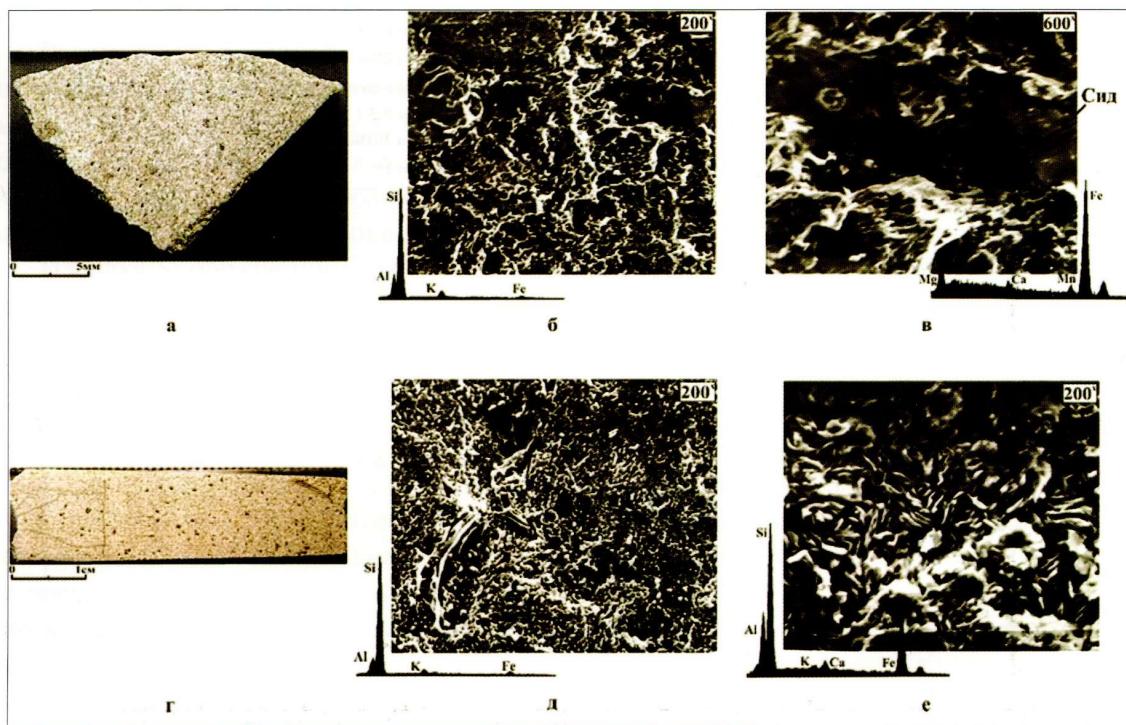


Рис. 6. Фотографии образцов алевритистого песчаника (а, г) и снимки РЭМ их поверхностей (б, в, д, е) после воздействия на них гидротермальных флюидов, имевших $T=235^\circ\text{C}$, $\chi CO_2 = 0.1$ (а-в) и $T=290^\circ\text{C}$, $\chi CO_2 = 0.105$ (г-е)

к окремнению поверхности образца (рис. 7а). На месте почти полностью растворившихся обломочных зерен ПШ возникли полости, в которых отмечаются мелкие, плохо ограненные кристаллы вторичного «гидротермального» альбита, который в отличие от аортитового минала, является устойчивой минеральной фазой в этих условиях (см. рис. 7б). Здесь следует заметить, что прекрасно ограненные кристаллы гидротермального альбита часто встречаются в юрских, а также и меловых отложениях Западной Сибири [8, 10]. Пример таких кристаллов альбита приведен на рис. 7в.

Некоторые прослои, обогащенные углистым дегритом, в местах их выхода на поверхность вспустились вследствие их превращения в битум.

Эксперимент 1

Исходным образцом, как и в предыдущем эксперименте, служил тот же алевритистый песчаник. В составе ГФ этого эксперимента $\chi_{CO_2} = 0.124$, $T = 290^{\circ}C$, $\tau = 10$ суток.

После эксперимента поверхность образца носила следы выщелачивания и слабого осветления, из углистых прослоев произошло выплавление битума, имеющего темно-коричневый цвет, который растекся по поверхности образца вокруг этих углистых прослоев, либо стек по его поверхности вниз в виде капелек (рис. 7г).

На выщелоченной поверхности образца отмечаются многочисленные полости, причем вследствие растворения ПШ в оставшихся от них пустотах, как и в предыдущем эксперименте, образовались плохо ограненные кристаллы гидротермального альбита (рис. 7д).

На поверхности образца вдоль слойков, обогащенных растительным дегритом, отмечаются вздутия, представляющие собой метаморфизованный битум (рис. 7е). В битуме присутствуют многочисленные пустоты от выделившихся из него газообразных

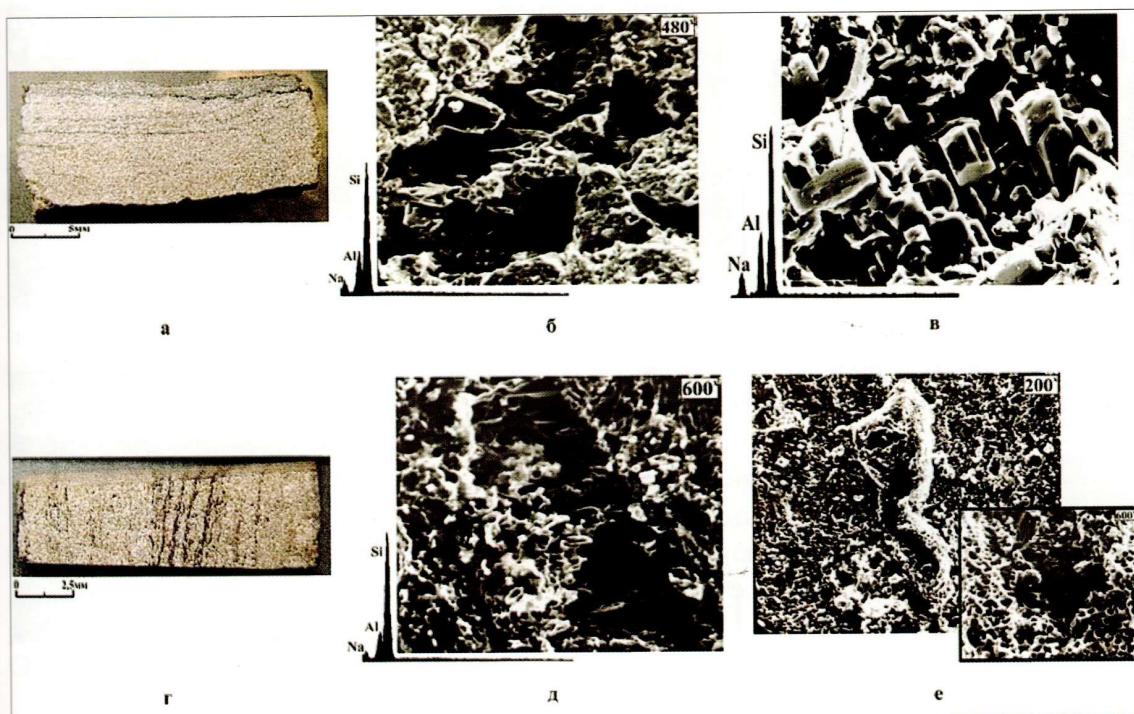


Рис. 7. Фотографии образцов алевритистого песчаника (а, г) и снимки РЭМ их поверхностей (б, в, д, е) после воздействия на них гидротермальных флюидов, имевших $T=235^{\circ}C$, $\chi CO_2 = 0.11$ (а-в) и $T=290^{\circ}C$, $\chi CO_2 = 0.124$ (г-е)

продуктов гидротермального термолиза, что особенно хорошо видно при большом увеличении (см. вставку на рис. 7е).

Эксперимент 4

Исходным образцом этого опыта служил тонкослоистый, среднезернистый песчаник, обломочная часть которого представлена преимущественно Кв, а глинистый цемент Кт, Ил и Хл. В составе ГФ рассматриваемого эксперимента $\chi_{CO_2} = 0.130$, $T = 290^{\circ}\text{C}$, $\tau = 10$ суток.

После завершения эксперимента образец практически не изменил первоначальный цвет, однако на его поверхности отмечаются полости от выщелоченных минеральных зёрен (рис. 8а, б). Следует отметить, что из всех углистых прослойков, присутствующих в нем, лишь один «разбух» вследствие генерации им битума, в котором присутствуют многочисленные полости от выделившихся из него газообразных продуктов (см. рис. 8в).

Эксперимент 559

В последнем эксперименте этой серии исходным образцом служил темно-серый с буроватым оттенком тонкослоистый углистый аргиллит, сложенный Кт, Хл, Ил с примесью мелкоалевритовых обломков Кв и Пш, а также микростяжениями Сид. В составе ГФ в данном эксперименте $\chi_{CO_2} = 0.079$, $T = 290^{\circ}\text{C}$, $\tau = 10$ суток.

После проведения эксперимента образец практически не изменил первоначальную окраску, однако на его поверхности образовались многочисленные, главным образом, очень мелкие по размерам (сотые и десятые доли миллиметра) черные капельки метаморфизованного битума. Кроме того, в местах наибольшего их скопления возникли «жирные» пятна (рис. 8г).

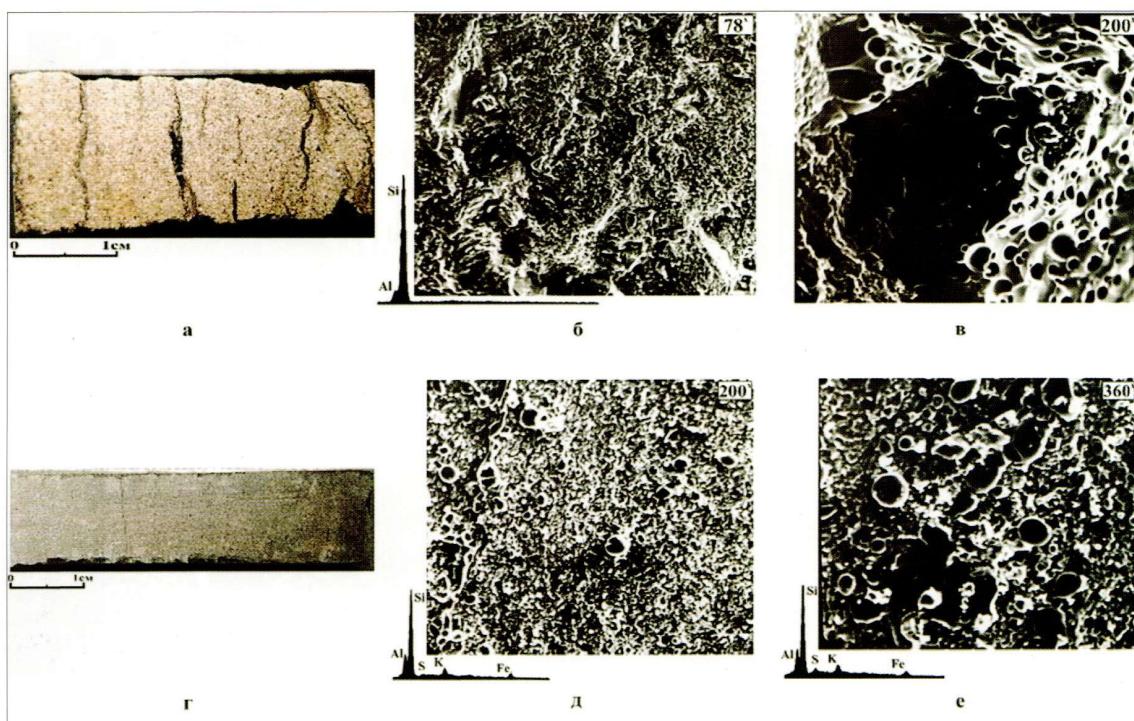


Рис. 8. Фотографии образцов песчаника (а) и углистого аргиллита (г), а также снимки РЭМ их поверхностей (б, в, д, е) после воздействия на них гидротермальных флюидов, имевших $T=290^{\circ}\text{C}$ и $\chi CO_2 = 0.13$ (а-в) и 0.09 (г-е)

На поверхности образца, кроме многочисленных мелких капелек битума, отмечаются трещинки флюидо- или битуморазрыва, из которых часто на поверхность образца выступает битум в виде протяженных, соединенных друг с другом тонких агрегатов (рис. 8д, е). На том месте, из которого выпотелся битум, часто остаются протяженные тонкие полости, напоминающие трещины. Анализ элементных спектров, полученных с помощью снимков РЭМ, свидетельствует о том, что поверхность образца сложена в основном Кв и Ил (рис. 8д, е). Пик серы, присутствующий на элементном спектре, свидетельствует о том, что битум относится к классу тиобитумов.

Серия 19

Исходным образцом в этой серии экспериментов служил темно-серый, со слабым буроватым оттенком слабоуглистой аргиллит, сложенный Кт, Хл и Ил с алевритовой примесью Кв и ПШ, а также небольшим содержанием Кц. Условия проведения экспериментов: $T = 275^{\circ}\text{C}$, χ_{CO_2} изменяется от 0 до 0.05, $\tau = 19$ суток (рис. 5). Во всех опытах в качестве буфера присутствовало 0.5 г пирита.

Эксперимент 3

В составе ГФ проводимого эксперимента $\chi_{\text{CO}_2} = 0.001$.

После эксперимента поверхность образца носила следы интенсивного выщелачивания, осветления, на нем отмечалось присутствие тонких рыхлых пленочек и корочек светло-серого, реже светло-зеленого цвета, а также пленки битума (рис. 9а).

Из микролинзочек углей и растительного дегрита происходило выплавление битума, что фиксируется как на поверхности образца (см. рис. 9а), так и в составе осадка (в виде мелких капелек). На поверхности образца возникли микропоры вторичного (гидротермального) происхождения, причем не только за счет рассеянного ОВ, но и вследствие растворения и выщелачивания неустойчивых минералов.

Сопоставление результатов PCA образца до и после опыта показало, что произошло небольшое увеличение доли Хл и, напротив, уменьшение содержания Кт и ПШ.

Эксперимент 5

В составе ГФ этого эксперимента $\chi_{\text{CO}_2} = 0.003$.

После эксперимента наблюдаются похожие изменения поверхности образца в результате растворения неустойчивых минералов. Также отмечается образование микрокаверн за счет преобразования рассеянного растительного дегрита в битум, который вытекал из образца, а в некоторых случаях оставался на его поверхности в виде мелких капелек и даже сплошных потоков (см. рис. 9б). На поверхности образовавшихся капелек тиобитума, имеющих размеры 10–20 мкм, присутствуют многочисленные мелкие агрегаты Fe-Хл (рис. 9в).

Микроскопический анализ обломочных зерен, поднятых со дна автоклава, показал, что их поверхность покрыта многочисленными мелкими чешуевидными кристаллами гидротермального Fe-Хл (рис. 9г, д). Непосредственно на зернах шихты Пи отмечается плотные корочки, сложенные Fe-Хл, в составе которого полностью отсутствует Al. Вероятно, этот Fe-Хл представляет собой разновидность септехлоритов типа гриналита. Отмечаются также прекрасно ограненные кристаллы Хкз (рис. 9е).

Серия 10П 60

Исходным образцом в этой серии экспериментов служил тот же слабоуглистой аргиллит, что и в предыдущей серии опытов.

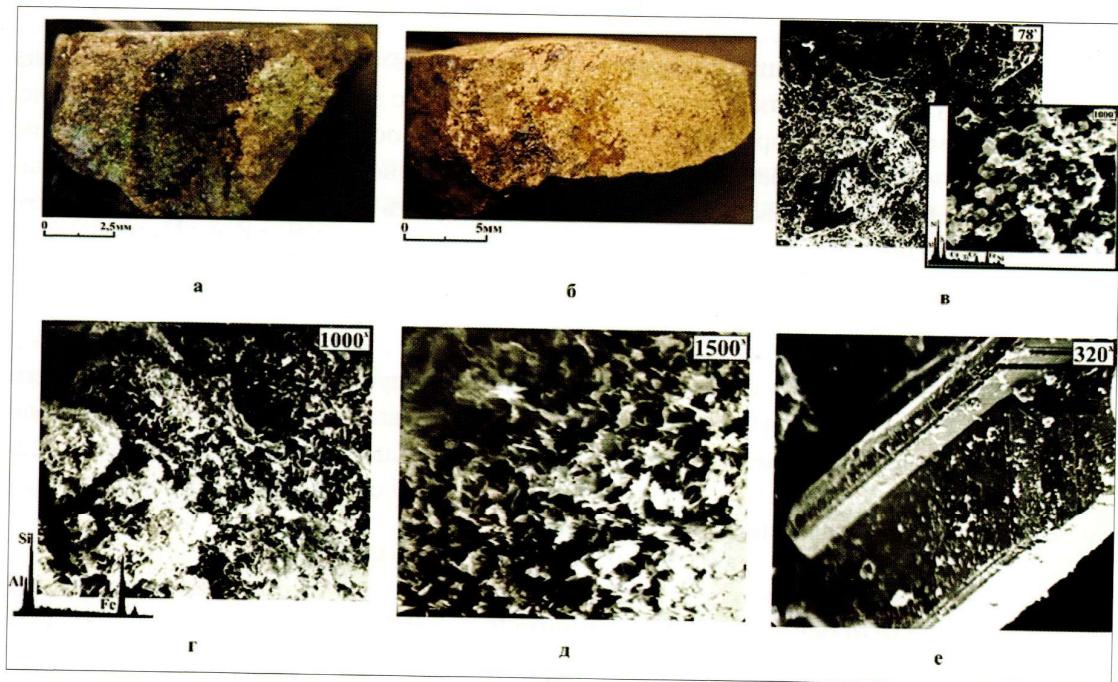


Рис. 9. Фотографии образцов углистых аргиллитов (а, б) и снимки РЭМ поверхностей последнего (в) и осадка (г-е) после воздействия на них гидротермальных флюидов, имевших $T=275\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $\chi_{\text{CO}_2}=0.001$ (а) и 0.003 (б-е)

Условия проведения экспериментов: $T = 360\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P = 70\text{ MPa}$, $\tau = 6$ суток. Во всех опытах кроме одного (№ 143) в качестве буфера присутствовало 0.5 г Пи, χ_{CO_2} изменялась от 0 до 0.5 (рис. 5).

Эксперимент 1

В составе ГФ $\chi_{\text{CO}_2} = 0.0079$.

После проведения эксперимента на поверхности образца отмечались следы его интенсивного выщелачивания и осветления, образовались довольно крупные полости и микрокаверны в тех местах, где в образце присутствовали прослойки и обломки углистого материала. В результате произошедших гидротермальных изменений цвет образца изменился с темно-серого на светло-коричневый (рис. 10а).

Поры, микрокаверны и микрополости возникли главным образом за счет гидропиролиза углистых слойков и частиц растительного детрита и в меньшей степени из-за растворения неустойчивых минералов (см. рис. 10б, в). Образующийся в результате гидротермального пиролиза углистого вещества битум в большинстве случаев под действием собственного веса скатывался на дно реактора. Однако мелкие капельки битума задерживались на поверхности образца и затем покрывались тончайшей «мохнатой» пленочкой, состоящей из многочисленных микроскопических чешуевидных кристаллов гидротермального Fe-Хл (рис. 10г).

Сопоставление результатов РСА образца до и после его обработки ГФ показало, что гидротермальное воздействие привело к полному исчезновению из состава его приповерхностной части Кт и Кц, растворению ПШ и Кв. Отмечается относительный рост концентрации в приповерхностной части образца Ил, но больше всего увеличилось содержание Fe-Хл, имеющего гидротермальное происхождение.

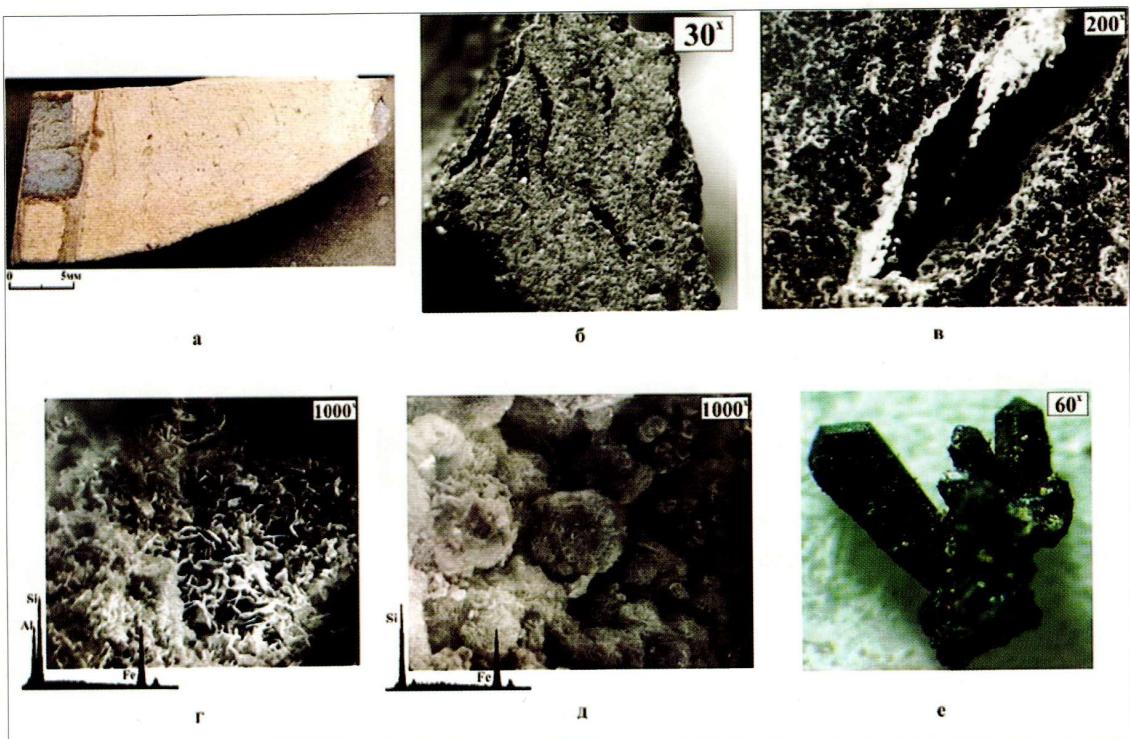


Рис. 10. Фотография образца углистого аргиллита (а) и снимки РЭМ его поверхности (б-г) и осадка (д, е) после воздействия на него гидротермального флюида, имевшего $T=360\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $\chi_{\text{CO}_2} = 0.0079$

На дне автоклава помимо пиритовой шихты и новообразованного Пир, присутствуют капли битума, покрытые микрочешуйчатым гидротермальным Fe-Хл (рис. 10д), а также микродрузы Хкз (рис. 10е).

Эксперимент 19

В составе ГФ данного эксперимента $\chi_{\text{CO}_2} = 0.006$.

После эксперимента поверхность образца носила следы интенсивного выщелачивания и осветления. Кроме того, на его поверхности отмечалось присутствие тонких пленок метаморфизованного битума темно-бурого, почти черного цвета (рис. 11а). Интересно, что в отличие от капелек метаморфизованного битума, наблюдавшихся в предыдущих опытах, которые характеризуются заметной прочностью и хрупкостью, «вытопившийся» из рассеянных углефицированных остатков битум в изучаемом опыте имеет пластичную консистенцию и напоминают тяжелую вязкую нефть.

На выщелоченной поверхности образца отмечаются многочисленные, часто очень мелкие пустоты, имеющие диаметр от 0.12 до 2.0 мкм. Вязкий нефтеподобный битум, в который превращаются углефицированные растительные остатки, покрывает прилегающее к образующимся полостям пространство (см. рис. 11б). На снимке с большим увеличением хорошо видно, как битум тонкой пленкой покрывает поверхность образца, причем в его составе присутствует большое количество серы, то есть это тиобитум (рис. 11в).

Сопоставление результатов РСА поверхностной части образца до и после опыта показало, что произошло увеличение доли Хл и Кв, а ПШ, напротив, уменьшилось.

Анализ осадка, извлеченного со дна автоклава, после опыта показал, что он имеет темно-серый до черного цвет, землистый вид. В нем присутствуют обломки интенсивно

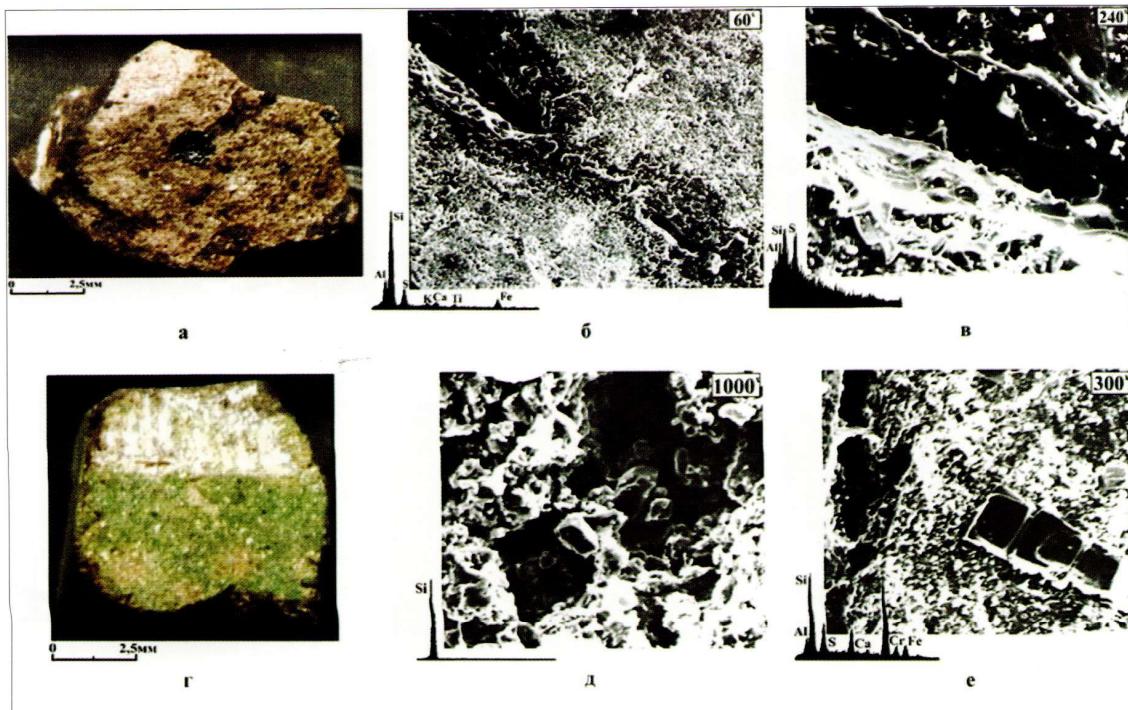


Рис. 11. Фотографии образцов углистого аргиллита (а, г) и снимки РЭМ их поверхностей (б, в, д, е) после воздействия на них гидротермальных флюидов, имевших $T=360\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $\chi_{\text{CO}_2}=0.006$ (а-в) и 0.5 (г-е)

выщелоченного исходного образца, отделившиеся от него в процессе эксперимента, состоящие из Кв, Ил и Хл, на последнем отмечаются редкие мелкие кристаллы Анг.

Встречаются единичные мелкие полупрозрачные «шарики» буровато-розового цвета, представляющие собой метаморфизованный битум, а также редкие, довольно крупные хорошо ограненные двойниковые кристаллы Хкз, имеющие размеры по длиной оси от 0.4 до 0.9 мм.

Эксперимент 143

В составе ГФ рассматриваемого эксперимента $\chi_{\text{CO}_2}=0.5$, шихта Пи не добавлялась.

После эксперимента поверхность образца носила следы интенсивного выщелачивания и осветления, на ней отложилась тонкая пленка оксида хрома зеленого цвета (рис. 11г). Отмечаются многочисленные полости и микрокаверны, образовавшиеся за счет присутствующего в составе образца растительного дегрита (рис. 11г). Наблюдается интенсивное выщелачивание и разрыхление поверхности, причем, судя по результатам элементного анализа, поверхность образца вследствие гидротермальной обработки явно подверглась окремнению. В появившихся полостях встречаются мелкие, плохо ограненные новообразованные кристаллы Кв (рис. 11д).

Кроме кварца, из новообразованных фаз следует отметить хорошо ограненные отдельные кристаллы Анг, отложившиеся на ранее образовавшейся пленке оксида хрома (рис. 11е).

По данным РСА, после завершения эксперимента доля Кв и Кт увеличилась, а ПШ и Хл, напротив, немного уменьшилась, появился Сид.

Осадок, образовавшийся в результате проведения эксперимента, представляет собой серую с буроватым оттенком землистую массу, в составе которой встречаются редкие, мелкие капельки битума.

Серия 2П6

Исходным образцом в этой серии экспериментов служил серый слабоуглистой алевролит с тонкими параллельными слойками, представленными углефицированным растительным детритом. Обломочная его часть представлена мелкоалевритовыми зернами Кв и ПШ, а глинистая, в порядке убывания: Кт, Ил и Хл. В виде примеси присутствует Сид. Условия проведения эксперимента: $T = 360^{\circ}\text{C}$, $\tau = 5$ суток. Во всех опытах, кроме одного (№ 167), в качестве буфера добавлено 0.5 г пирита, а χCO_2 изменялась от 0 до 0.5 (рис. 5).

Эксперимент 167

В составе ГФ данного эксперимента χCO_2 имела самую высокую величину, равную 0.5. Кроме того, в отличие от других экспериментов этой серии, в него не добавлялась пиритовая шихта.

После эксперимента поверхность образца носила следы интенсивного выщелачивания и приобрела светло-серый, почти белый цвет. Одна сторона образца полностью покрылась рыхлой корочкой ярко зеленого цвета, другая – частично (рис. 12а). Встреченных в предыдущих опытах других серий капелек битума на поверхности образца не обнаружено. Отмечаются лишь небольшие по площади (каждый около 1 мм^2) «натеки» битума темно-бурого цвета на нижней части образца, которые имеют пластичную консистенцию и легко царапаются стальной иглой.

Поверхность светло-серой стороны изучаемого образца имеет микропористую структуру, обусловленную, как и в ранее рассмотренных экспериментах, растворением неустойчивых минеральных фаз и превращением в битум углефицированных растительных обломков (см. рис. 12б).

Другая её часть покрыта очень рыхлой ажурной корочкой новообразованных фаз зеленого цвета, сложенных в основном соединениями никеля, имеющими войлоковидную микротекстуру (рис. 12в).

Сопоставление результатов РСА образца до и после опыта показало, что произошло уменьшение в составе его приповерхностной части, главным образом, ПШ. Увеличилась доля Ил и Кв, немного возросло содержание Сид. Доля Кт по сравнению с Хл немного уменьшилась.

После эксперимента в автоклаве была обнаружена крупная новообразованная корочка, имевшая площадь около 16 мм^2 и толщину, равную приблизительно 1 мм. Она имела зональное строение. Внутренняя ее часть обладала темно-серым с буроватым оттенком цветом, а наружная ее часть имела светло-серый цвет. Микроскопический анализ показал, что темная внутренняя ее часть сложена многочисленными округлыми «лохматыми» агрегатами Fe-Хл, состоящими из мелких тонких пластинок, имеющих длину около 2-4 $\mu\text{м}$ и толщину приблизительно 0.5-0.8 $\mu\text{м}$, а сами шарообразные агрегаты имеют диаметр около 6-26 $\mu\text{м}$ (рис. 12г, д).

Внешняя часть рассматриваемой корочки, имеющая светло-серый цвет, оказалась сложенной также шарообразными «мохнатыми» агрегатами диаметром 12-30 $\mu\text{м}$, по составу близкими к Fe-Хл, но, в отличие от ранее рассмотренных, состоящих исключительно из Fe и Si, в составе этих агрегатов Fe-Хл (помимо Fe и Si) присутствует Al (рис. 12е).

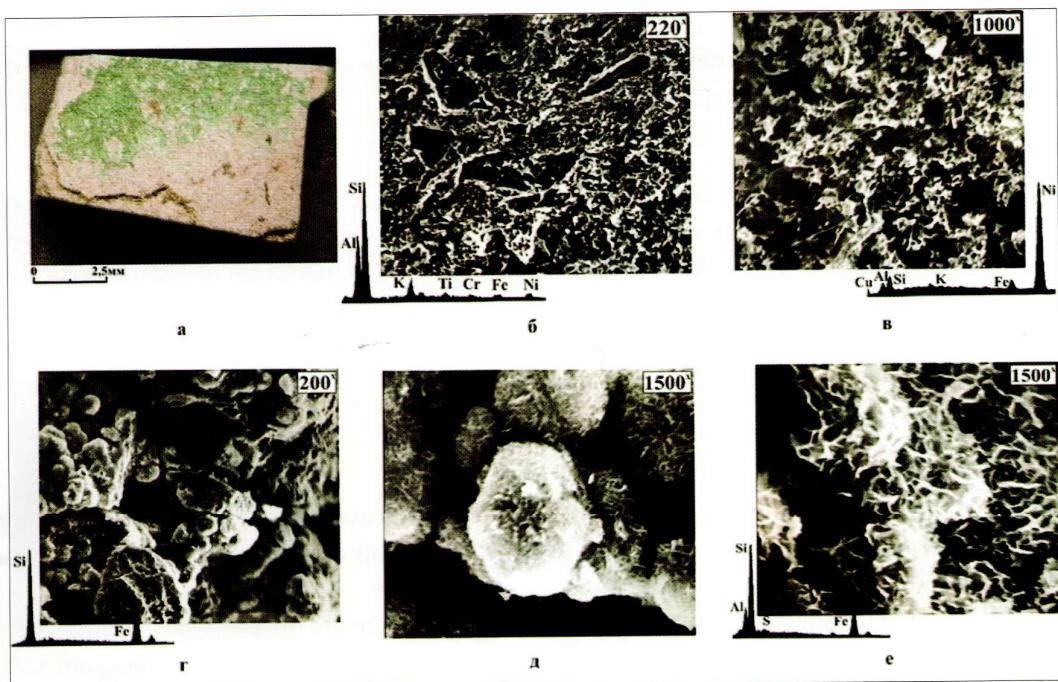


Рис. 12. Фотография образца слабоуглистой алевролита (а) и снимки РЭМ его поверхности (б, в), а также осадка (г-е) после воздействия на него гидротермального флюида, имевшего $T=360^{\circ}\text{C}$ и $\chi\text{CO}_2 = 0.5$

Серия 0.5-1

Условия проведения экспериментов: $T = 360^{\circ}\text{C}$, $P = 70 \text{ МПа}$, $\tau = 14$ суток. Во всех опытах в качестве буфера добавлено 0.5 г пирита, а χ_{CO_2} изменялась от 0.0079 до 0.010 (рис. 5).

Эксперимент 154

В качестве исходного образца в этом эксперименте использован углистый аргиллит, сложенный главным образом Кт, Ил и Хл с примесью мелкоалевритовых обломков Кв и ПШ, а также Сид. В составе ГФ $\chi_{\text{CO}_2} = 0.009$.

После эксперимента наблюдалось интенсивное осветление и выщелачивание поверхности образца, которая в первоначальном состоянии имела темно-серый, почти черный цвет, а после эксперимента приобрела светло-серый оттенок. Отмечается образование микрополостей, возникших на тонких прослойках углистого детрита.

Несмотря на сравнительно невысокую долю CO_2 в ГФ, он интенсивно взаимодействовал с исходным образцом, выщелачивая неустойчивые в этих условиях минеральные компоненты и отлагая взамен их новые, покрывающие тонкими пленками его поверхность. Выщелоченные ГФ и не покрытые новообразованными минеральными фазами участки, судя по элементному спектру, полученному с их площади, сложены преимущественно Ил.

На поверхности образца присутствуют «бархатистые» пленочки светло-серого цвета, покрывающие не только его поверхность, но и образовавшиеся капельки битума, представленные гидротермальным Fe-Хл и Ам.кп (рис. 13а).

Сопоставление результатов РСА поверхности образца до и после гидротермального воздействия на нее показало, что произошло растворение и полное удаление с поверхности образца Кт и Сид, содержание ПШ резко уменьшилось, снизилась концентрация и Кв. Напротив, увеличилось относительное содержание Ил и особенно сильно выросла концентрация Fe-Хл.

После проведения эксперимента на дне автоклава отмечалось большое количество новообразованных пористых агрегатов. В составе этих агрегатов часто присутствуют мелкие сферические образования, полностью состоящие из Fe-Хл или покрывающие тонкой пленкой капельки битума, вытопившегося из углистого детрита (см. рис. 13б).

Массивные мелкокристаллические корочки, встреченные в составе осадка – это поликристаллические агрегаты Хкз (рис. 13в), а тонкие мелкие иголочки представляют собой кристаллы миллерита (рис. 13г). Похожие кристаллы миллерита были встречены в верхнеюрских отложениях (нижнеданиловская подсвита) Северо-Даниловского месторождения (Шаймский НГР) [10].

Серия с солями и углекислотой

В отличие от других экспериментов в данной серии опытов, кроме CO_2 (0.48 г/л), в гидротермальном растворе присутствовали соли: 36.8 г/л NaCl и 3.1 г/л CaCl_2 . Пиритовая шихта отсутствовала. Эксперименты проводились при $T = 400^\circ\text{C}$ и $\tau = 10$ суток (рис. 5).

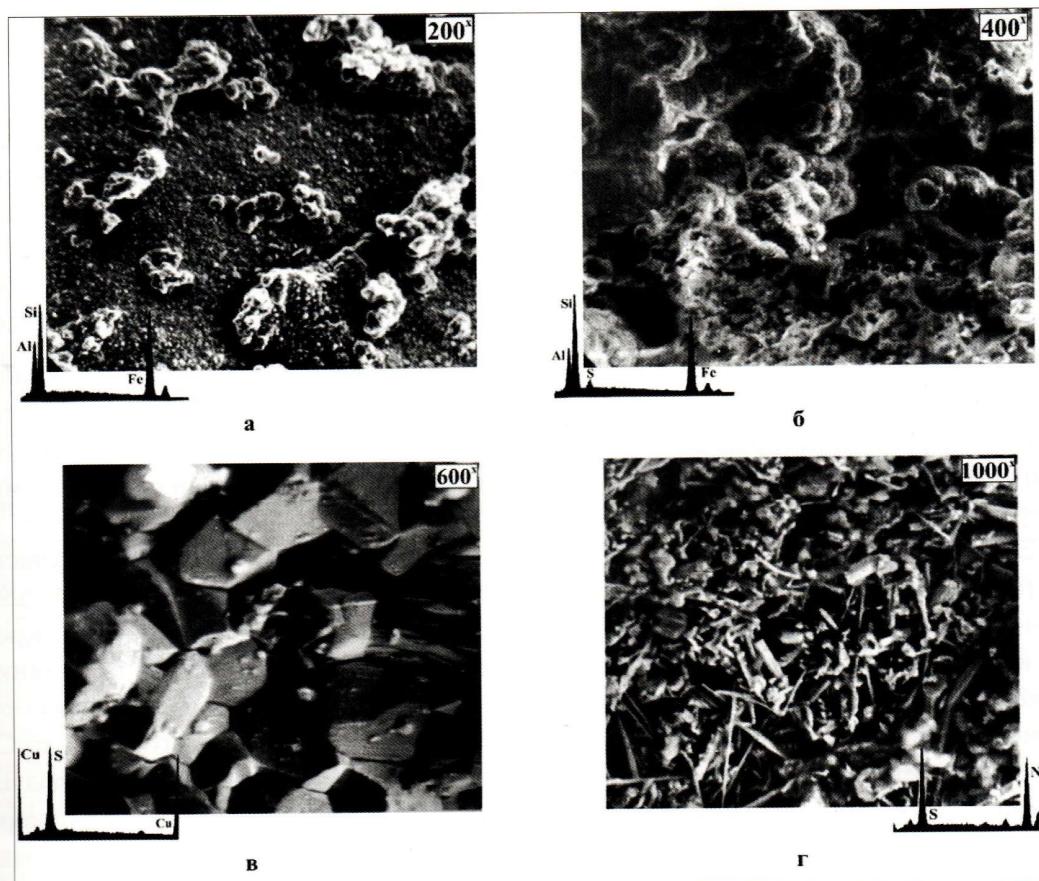


Рис. 13. Снимки РЭМ поверхности углистого аргиллита (а) и образовавшегося осадка (б-г) после воздействия на него гидротермального флюида, имевшего $T=360^\circ\text{C}$ и $\chi\text{CO}_2 = 0.009$

Опыт 7П74

Исходным образцом в этом опыте являлся слабоизвестковистый песчаник, состоящий из обломочных зерен Кв и ПШ, сцепментированных глинистыми минералами Кт, Ил и Хл, а также Кц. После опыта наблюдалось осветление и выщелачивание поверхности образца. Кроме того, на его поверхности образовались микрокристаллические агрегаты новых минеральных фаз гидротермального происхождения.

Сравнение результатов анализа РСА образца до и после эксперимента показало, что соотношение Кв и ПШ практически не изменилось. Отмечается почти полное исчезновение Кц и полное – Кт, а также значительное уменьшение содержания Ил. Доля Хл, напротив, заметно увеличилась.

По данным РСА, в составе осадка основными минеральными фазами являются бунзенит (NiO), куприт (Cu_2O) и тенорит (CuO). Остальные минералы гидротермального происхождения присутствуют в небольшом количестве, которые, к сожалению, не удалось точно диагностировать.

Опыт 11П41

Исходным образцом в этом опыте являлся известковистый песчаник, состоящий из обломочных зерен Кв и ПШ, сцепментированных Кт, Ил и поровым Кц. После опыта наблюдалось осветление и выщелачивание поверхности образца. Кроме того, на его поверхности образовались микрокристаллические агрегаты гидротермальных минералов.

Сравнение результатов анализа РСА образца до и после эксперимента показало, что произошло относительное увеличение доли Кв по сравнению с ПШ и Кц (примерно в 2 раза). Кт и Ил полностью исчезли. Содержание Хл почти не изменилось.

По данным РСА, в составе осадка преобладает куприт, а также в небольшом количестве присутствует кальцит. Вероятно, образовались цеолиты. Остальные минеральные фазы, к сожалению, не удалось диагностировать из-за слабой упорядоченности их кристаллической структуры и малого содержания.

Обсуждение полученных результатов

Понятно, что проведенные гидротермальные эксперименты не в полной мере моделируют природные гидротермальные процессы, тем не менее они позволили установить ряд важных фактов, которые дают возможность прогнозировать поведение основных типов юрских пород при воздействии на них ГФ, имеющих различный состав и температуру при давлении 70 МПа.

Эксперименты с различными типами осадочных пород, проведенные без участия H_2O_2 (8/0) в системе $\text{H}_2\text{O}-\text{H}_2\text{O}_2$, продемонстрировали, что в этом случае в гидротермальных условиях неустойчивыми являются ПШ, Кт и карбонатные минералы (Кц, Сид). Кроме того, исходное ОВ, представленное преимущественно углистым дегритом, под влиянием высокотемпературного (390 °C) ГФ превращается в битум (точнее в тиобитум) и генерирует большое количество газообразных УВ (при этой температуре, скорее всего, от C_1 до C_{25}). При этом за счёт превращения исходного твердого ОВ в жидкое и газообразные продукты формируется дополнительная вторичная пористость. Кроме того, происходит флюидоразрыв породы и объём образующейся за счёт исходного ОВ вторичной пористости ещё больше увеличивается. Поскольку в природных условиях в поровом пространстве осадочных пород обязательно присутствует вода, то она также вследствие воздействия на неё высокотемпературного ГФ, резко увеличивается в объёме и вызывает гидроразрывы породы. Поэтому, благоприятные условия для генерации газообразных УВ в гидротермальных условиях создаются в осадочных породах, где имеется значительное количество пористости и вода.

годаря этим процессам, даже аргиллиты становятся проницаемыми в интервале времени, пока на них воздействует ГФ и образовавшиеся в них нафтиды энергично эмигрируют в ближайшие к ним породы-коллекторы, создавая в них углеводородные залежи [6, 8, 10-13].

В результате растворения неустойчивых в этих термодинамических условиях минералов также формируется вторичная пористость. Однако она частично может быть заполненной новообразованными (гидротермальными) минералами. Эти вторичные минералы, судя по полученным результатам гидротермального моделирования, в случае, если в ГФ отсутствует H_2O_2 , представлены преимущественно Хл, а также примесью Анг, апатитом и кремнезёмом, включая его аморфную разновидность. Ам.кп образуется в гидротермальных экспериментах в качестве закалочной фазы вследствие быстрого охлаждения автоклавов. В природных условиях растворенный в ГФ кремнезём из-за продолжительного охлаждения гидротермальной системы отлагается из него в виде хорошо ограниченных мелких кристаллов кварца, либо формирует регенерационные каемки на обломочных зёдрах кварца [7, 8, 10, 11].

Железистый Хл образуется за счёт растворяемых ГФ ПШ, Кт и Сид. Кроме того, часть железа поступает в ГФ в результате растворения им пиритовой шихты.

Ангидрит кристаллизуется в результате взаимодействия сульфат-ионов, возникающих вследствие окисления пиритовой шихты и катионов кальция, освобождающихся из растворяемого ГФ Кц и анортитового минала ПШ. Кислород в составе ГФ, который окислил Пи до серного ангидрита, в экспериментах, проводимых без добавления H_2O_2 , вероятнее всего находился в растворенном состоянии в воде и воздухе, присутствовавших в автоклаве.

По мере увеличения концентрации H_2O_2 в составе ГФ наблюдаются следующие закономерности.

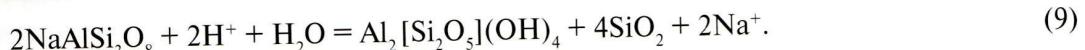
При минимальной концентрации H_2O_2 в составе ГФ (7/1) наблюдается окисление исходного ОВ, присутствующего в образце, и вытапивающегося из него битума. Хотя полного окисления образовавшегося битума при этой концентрации перекиси водорода всё же не происходит. Так же как и в эксперименте без H_2O_2 , наблюдается почти полное растворение Кц, Кт и, в меньшей степени, ПШ. Образуются гидротермальные Хл, Mg, S^o, Ам.кп и битум. Последний в значительной степени оказывается окисленным кислородом, выделившимся при разложении H_2O_2 . Mg и S^o образовались вследствие окисления пиритовой шихты, добавлявшейся в автоклав в качестве буфера и тиобитума.

Увеличение концентрации H_2O_2 в составе ГФ (6/2) приводит к полному окислению присутствовавшего в составе образца ОВ, включая образовавшийся из него битум. Так же как и в предыдущих экспериментах, с поверхностной части образца исчезают Кц, Кт и ПШ, а образуются железистый Хл, Анг, Гем и Ам.кп. То есть, в этом случае вместо Mg образуется Гем (см. уравнение (3)).

При еще большем увеличении концентрации H_2O_2 (5/3) в составе ГФ, отмечается растворение Кц и ПШ, полное окисление ОВ и битума. Однако вместо Хл наблюдается образование гидротермального Кт, а также, кроме Анг, Гем и Ам.кп, появляется большое количество сульфатов типа квасцов, миллезевичита, а также сульфат Ni и, вероятно, хромат никеля.

Таким образом, очень высокая концентрация кислорода в составе ГФ приводит к интенсивному окислению не только пиритовой шихты, добавляемой в качестве буфера, но и элементов, слагающих автоклавы, в которых проводились эксперименты.

Появление гидротермального Кт в экспериментах с очень высокой концентрацией H_2O_2 в составе ГФ объясняется двумя основными причинами. Во-первых, высокой величиной окислительного потенциала гидротермальной среды, в которой всё присутствовавшее в составе ГФ Fe имело трёхвалентное состояние, что препятствовало образованию железистого Хл, в составе которого помимо Fe^{3+} обязательно присутствует и Fe^{2+} . Во-вторых, благодаря интенсивному окислению пиритовой шихты в составе ГФ появилось большое количество серной кислоты, следовательно его кислотность очень сильно увеличилась, что также препятствовало образованию Хл и, напротив, способствовало возникновению Кт [4, 6-10, 14, 21, 23]. Процесс каолинитизации в кислой гидротермальной среде можно продемонстрировать на примере реакции кислого ГФ с альбитом:



Из приведенного уравнения следует, что в результате образования гидротермального Кт в кислой среде обязательно образуется кремнезём, то есть происходит окремнение исходных образцов. Действительно, во всех выполненных экспериментах наблюдается окремнение поверхности образцов, особенно в тех, где в составе ГФ присутствовало максимальное содержание H_2O_2 .

Исследование минерального состава образцов, отобранных из осветлённых (обогащённых) юрских и доюрских отложений показало, что в них отсутствуют Mg и тем более Гем гидротермального происхождения [7, 8, 10]. Тем не менее присутствовавшее в их составе ОВ оказалось полностью или почти полностью окисленным. В них отмечаются гидротермальные сульфаты (Анг, барит), Кт, Сид, Kv и в редких случаях S° [6-8, 10]. Из этого можно заключить, что концентрация кислорода в природных ГФ была заметно меньше, чем в проведенных экспериментах. Но поскольку объемы и время воздействия в природных ГФ на исходные юрские отложения были гораздо более значительными, чем в экспериментах, то ОВ, входившее в их состав, успевало окислиться. Кроме того, не следует забывать, что в проводившихся экспериментах система являлась закрытой и продукты гидротермальных реакций накапливались в автоклавах, в то время как природные системы обычно являются в той или иной мере открытыми, и образующиеся продукты имеют возможность в большей или меньшей степени покидать место, где они образовались.

Интенсивное разложение карбонатов в проведенных экспериментах объясняется отсутствием карбонат-ионов в составе ГФ, имевшего чисто водный состав. В опытах, в которых присутствовала H_2O_2 , при этом возникала кислая среда из-за образования серной кислоты (в результате окисления пиритовой шихты и тиобитума), поэтому карбонаты легко растворялись в кислом ГФ. Следовательно, природные ГФ содержали в своем составе заметно меньше кислорода, чем в выполненных экспериментах, а кроме того, в них присутствовало достаточное количество карбонат-ионов, необходимых для образования карбонатов и, в первую очередь, имевших железистый состав (Сид). Присутствовавшее в юрских осадках ОВ выступало в роли буфера, способствовавшего сохранению двухвалентного состояния Fe, содержащегося в составе ГФ. Благодаря этому в осветлённых юрских отложениях, наряду с гидротермальными Kv и Кт, часто присутствует Сид [6-8, 10]. Кроме того, природные ГФ имели явно кислый состав, благодаря чему из них кристаллизовались Кт и Сид, а не Fe-Хл [6-8, 10].

В экспериментах, выполненных в системе H_2O-CO_2 , наблюдаются следующие закономерности.

Самым неустойчивым минералом, по данным анализа полученных результатов гидротермальных экспериментов, является ПШ. Во всех проведенных экспериментах

именно он растворяется в первую очередь, в результате этого в образцах появляется вторичная пористость, величина которой определяется размерами и количеством исходных обломочных зерен ПШ. При этом вначале растворяется анортитовый минал плагиоклазов, а более устойчивый альбитовый в ряде случаев отлагается в образующихся порах в виде плохо ограненных кристаллов гидротермального альбита (рис. 7б, д).

Неустойчивым также является поровый Кц, который интенсивно растворяется ГФ и только в случае его пересыщения ионами Ca^{2+} и CO_3^{2-} и образования конвекционной ячейки в автоклаве, в редких случаях на его дне в осадке образуется гидротермальный Кц (опыт 11П41 с солями).

Преимущественное растворение ГФ карбонатов и ПШ приводит к окремнению поверхности испытуемых образцов.

В самых низкотемпературных экспериментах (235°C) отмечается сохранение исходного и/или даже образование гидротермального сидерита (рис. 6в). Увеличение температуры ГФ до 290°C приводит к возникновению гидротермального Fe-Хл на поверхности диагенетического Сид, причем, как в случае полного отсутствия в составе ГФ CO_2 , так и при его присутствии. Очевидно, что в этих условиях Сид становится неустойчивым и замещается Fe-Хл (рис. 6г-е). Исходя из результатов этих экспериментов, можно заключить, что в гидротермальных условиях в системе $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ с низкой концентрацией CO_2 граница перехода Сид \leftrightarrow Fe-Хл, при условии присутствия в составе ГФ Al и/или Si, например, за счет растворения ПШ и Кв, лежит в интервале $235-290^\circ\text{C}$.

Из всех глинистых минералов, входящих в состав использованных в экспериментах образцов, самым устойчивым оказался Ил, доля которого после завершения опытов почти всегда увеличивалась вследствие преимущественного растворения ГФ, главным образом, ПШ и Кц, а также в меньшей степени Кв. Лишь в самых высокотемпературных экспериментах (400°C) с солями отмечалось частичное или даже полное растворение Ил.

Кт также довольно устойчивый минерал, но это относится лишь к опытам, в которых ГФ имел температуру $235-290^\circ\text{C}$. При более высокой температуре ГФ начинает его растворять, причем наиболее интенсивно в тех случаях, когда в составе исходных образцов отсутствует обломочный ПШ. При этом растворению Кт в ГФ способствует присутствие в автоклавах пиритовой шихты, которая явно стимулирует образование гидротермального Fe-Хл, поставляя в ГФ катионы Fe^{2+} , и тем самым способствуя растворению Кт, а также и Кв, которые являются источниками Al и Si, участвующими в образовании гидротермального Хл.

Напротив, в тех опытах, в которых пиритовая шихта отсутствовала, Кт сохранялся в составе исходных образцов, а в экспериментах с самой высокой концентрацией углекислоты ($\chi\text{CO}_2 = 0.5$) сохранялся и Сид, несмотря на высокую температуру. Однако здесь следует особо отметить, что сохранялся лишь «чистый» Сид, не содержащий в своем составе изоморфных примесей Ca и Mg. Наоборот, его разновидности, содержащие изоморфные примеси, растворялись, а Fe и Mg, бывшие в его составе, шли на образование Хл.

Следовательно, граница перехода Сид \leftrightarrow Fe-Хл зависит не только от температуры ГФ, но и от концентрации в его составе CO_2 . С ростом концентрации углекислоты устойчивость Сид и Кт увеличивается.

Тем не менее, в самых высокотемпературных опытах с солями (400°C) Кт оказался неустойчивым и полностью растворился ГФ.

Образующийся в опытах гидротермальный Хл имеет различный состав в зависимости от соотношения и концентрации в ГФ растворенных в нем компонентов. Так,

на зернах Пи и Пир, где в составе ГФ велика концентрация Fe^{2+} , обычно образуется «чистый» Fe-Хл без примеси в его составе Mg^{2+} или с минимальным его содержанием. К тому же, поскольку максимальная концентрация Al^{3+} в составе ГФ наблюдается в приповерхностной зоне образцов, то на самих образцах образуется Fe-Хл, содержащий в своем составе Al. По мере протекания реакции с образованием Fe-Хл Al, присутствовавший в составе ГФ, постепенно расходуется, особенно это заметно в нижней части автоклавов, где находится шихта Пи и/или образующийся осадок. В этой зоне часто образуется Fe-Хл с низким содержанием в его составе Al, либо вовсе без Al. В экспериментах, в которых использовались образцы не имевшие в своем составе ПШ, весь гидротермальный Хл состоял лишь из Fe и Si.

Важной особенностью экспериментов с самой высокой мольной долей CO_2 является появление на поверхности образца углистого аргиллита большого количества гидротермального Анг (рис. 11e). Небольшие его количества могут возникать в результате реакции кислорода воздуха, попавшего в автоклав при подготовке опыта с шихтой Пи, при проведении экспериментов. В результате этого образуется серная кислота, которая нейтрализуется Кц или аортитовым миналом ПШ, присутствующими в составе образцов, с образованием Анг. Однако для формирования многочисленных поликристаллических агрегатов Анг, наблюдающихся в опытах с самой высокой мольной долей CO_2 , этого количества кислорода, попадающего в состав воздуха в автоклав, явно недостаточно. Остается предположить, что при достаточно высокой температуре и особенно при значительной концентрации в ГФ углекислоты, она выступает в роли окислителя, окисляя серу, входящую в состав тиобитума. Других источников серы в этих опытах нет, так как в них не добавлялась пиритовая шихта.

Действительно, с ростом температуры ГФ (примерно с 360 °C и выше) CO_2 начинает все активнее проявлять свои окислительные способности, что особенно хорошо наблюдается после завершения таких высокотемпературных экспериментов по появлению на поверхности образцов тонких зеленых корочек или пленочек, сложенных оксидами хрома и/или никеля (рис. 11г, 12а).

Окисление металлов, входящих в состав автоклава, углекислотой осуществляется следующим образом:



Наиболее сильно окислительные способности CO_2 проявляет в самых высокотемпературных опытах, в которых ГФ имел температуру 400 °C. В этих экспериментах наряду с бунзенитом (NiO) появляются куприт (Cu_2O) и тенорит (CuO):



Таким образом, в этих экспериментах восстановителями углекислоты являются металлы, входящие в состав автоклавов. Поэтому в ГФ в самых высокотемпературных экспериментах наряду с CO_2 должна появиться окись углерода (CO).

Действительно, хроматографический анализ газовой фазы с помощью детектора по теплопроводности после завершения одного из таких опытов показал, что в её составе, наряду с водой и CO_2 , присутствует большое количество CO (рис. 14а).

В этой связи отметим, что важнейшим свойством CO является его способность реагировать с водородом, который в большем или меньшем количестве обычно присут-

стествует в составе природных ГФ, с образованием органических соединений (процесс синтеза Фишера-Тропша), который в упрощенном виде записывается следующим образом:



Следовательно, в природных условиях образующаяся СО может служить дополнительным источником формирования углеводородов, при наличии в составе ГФ H_2 .

Можно предположить, что осветление поверхности образцов, наблюдавшееся в результате воздействия на них ГФ, содержащего в своем составе CO_2 , также происходило именно благодаря окислительным свойствам углекислоты, которая окисляла, в первую очередь, ОВ, присутствовавшее в составе образцов, а также поливалентных элементов-хромофоров, входящих в состав обломочных зерен. Действительно, в опытах, в которых в составе ГФ углекислота отсутствовала, поверхность образцов практически не изменяла свой первоначальный цвет (рис. 2а, 4а).

Следует обратить внимание также на тот факт, что при отсутствии в составе ГФ углекислоты (при наличии в качестве буфера пиритовой шихты) наблюдаются очень слабые изменения с исходными образцами, а металлы, входящие в состав автоклава, практически не извлекаются чисто водным флюидом и не участвуют в реакциях, протекающих в нём. В то же самое время даже минимальные концентрации CO_2 в составе ГФ способствуют очень активному выщелачиванию неустойчивых минералов в составе образцов и появлению новых минералов, в том числе и с участием в этих реакциях элементов, из которых состоят реакторы.

Пиритовая шихта так же активно взаимодействует с ГФ, содержащим CO_2 , и металлами, входящими в состав автоклава, результатом чего является образование различных сульфидов, встреченных в осадке на дне автоклавов:



Интересно, что в результате протекания приведенных выше реакций (10)-(13), (15), (16) возникают необычные минеральные ассоциации, когда и окислы, и сульфиды оказываются вместе.

Анализ элементного состава закалочной фазы, присутствующей на поверхности образцов и в составе осадка, показал, что в подавляющем числе случаев она представлена аморфным кремнеземом и в единичных случаях имеет такой же состав, что и Fe-Хл.

В зависимости от мацерального состава и степени окисленности (фузенизации) растительного детрита, находящегося образцах, участвовавших в гидротермальных экспериментах, он превращался либо в полужидкую вязкую субстанцию, напоминающую вязкую нефть, либо в твердые, часто каплевидные образования с микропористой структурой, обусловленной выделением газообразных продуктов термодеструкции, либо сохранялся в неизменном состоянии (рис. 2, 4а, в, 7е, 8в-е, 9а-в, 11а-в).

Вследствие превращения растительного детрита в битум формировалась вторичная пористость, причем её величина напрямую зависела от содержания в образцах исходного ОВ, его мацерального состава и характера его распределения.

Существует широко распространенная точка зрения, что из терригенного ОВ, входящего в состав нижне- и среднеюрских отложений Западной Сибири, в результате термического или катагенетического преобразования формируется преимущественно метан. Однако результаты гидротермального моделирования с образцом углистого аргиллита (серия $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$, $T = 300^\circ\text{C}$, $\chi_{\text{CO}_2} = 0.075$) показали, что по данным газовой хро-

матографии, в составе газовой фазы, отобранный из автоклава после проведения опыта, метан не является преобладающим компонентом (рис. 14б). Кроме него, присутствуют более тяжелые УВ, включая его гомологи, а больше всего в составе пробы газа оказалось C_5 и близких к нему по времени удержания углеводородов (рис. 14б).

На основе полученных в результате гидротермального моделирования данных, можно предложить следующую упрощенную модель формирования УВ-залежей в осадочном чехле при участии ГФ.

Из астеносферы поднимается магматическое тело, над которым в земной коре формируется зона напряжения. В некоторый момент, с превышением величин напряжений, возникающих над этим телом, предела прочности пород, слагающих кору, происходит их дробление с возникновением серии субвертикальных трещин [10, 13]. Внешнее давление резко уменьшается и из магматического тела выделяются растворенные в нём высокоентальпийные газы, представленные H_2O , CO_2 , CO , O_2 , HCl , HF , H_2S , SO_2 , H_2 , CH_4 и др. [1, 2, 4, 5, 10, 13-15, 20, 21, 23]. Они, поднимаясь вверх по зонам дробления, мобилизуют поровую воду сначала в породах фундамента, а затем и в осадочном чехле, в результате чего образуются слабоминерализованные ГФ [4, 6-8, 10-13, 21].

Проникая в осадочный чехол, ГФ выщелачивают неустойчивые минералы, формируя дополнительную вторичную пористость и подвергают гидропиролизу присущее в осадках ОВ, которое превращается в битум и углеводородные и не углеводородные летучие соединения [10-13]. Наряду с тектоногенной трещиноватостью, за счет образующихся из растительного детрита жидким и газообразным нафтидов, а также термического расширения поровой воды возникают трещины флюидоразрыва. В результате протекания этих процессов даже глинистые отложения на определенное время становятся проницаемыми.

Поскольку при высоких температурах (около 400 °C) вода и углеводороды образуют единую гомогенную фазу, то пропадают проблемы с фазовой проницаемостью нефти и воды в поровом пространстве пород, а также исчезает эффект Жамена, препятствующие фильтрации нефти в осадочных отложениях и формированию в них углеводородных залежей [10, 13].

Поскольку при воздействии ГФ на ОВ, присущее в осадках, образуется большое количество ненасыщенных УВ [11], то находящиеся в составе природных ГФ H_2 , CH_4 и другие органические соединения, активно взаимодействуют с ними, увеличивая

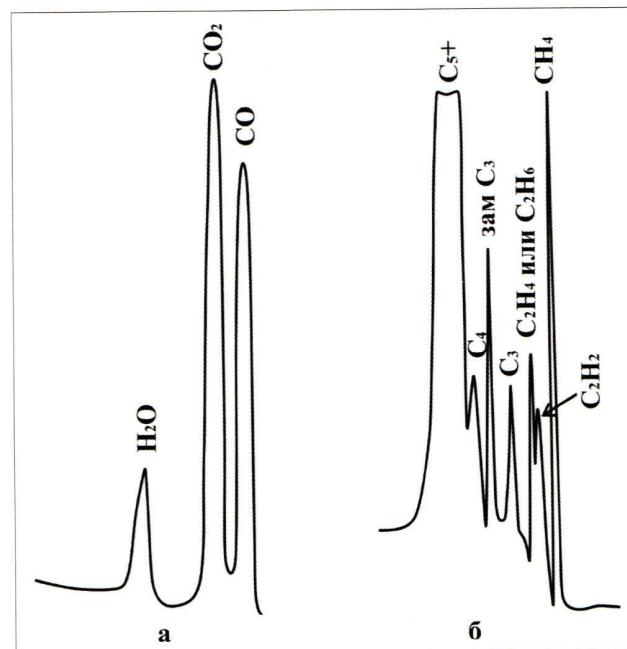


Рис. 14. Хроматограммы газообразных фаз, образовавшихся вследствие воздействия гидротермальных флюидов на углистый аргиллит, полученные с использованием детектора по теплопроводности (а) и пламенно-ионизационного детектора (б)

нефте- и газогенерационный потенциал исходного ОВ и долю образующихся легких (низкомолекулярных) нафтидов.

По мере остывания первоначально гомогенный водо-углеводородный флюид, заполнивший коллектор, распадается на две (вода-нефть) или три (вода-нефть-газ) фазы и формируется углеводородная залежь [6-8, 10, 13]. При этом, в зависимости от степени гидродинамической изолированности образующейся залежи из-за снижения температуры водонефтяного флюида, заполнившего коллектор, в ней возможно возникновение аномально низкого пластового давления, как, например, в пластах ЮК₁₀₋₁₁ Талинского месторождения [6, 8, 10], или, наоборот, аномально высокого пластового давления, как в углеводородных залежах, находящихся в баженовской свите.

Выводы

1. В экспериментах с ГФ, имеющим чисто водный состав, наблюдается интенсивная генерация углеводородов и битума из исходного растительного дегрита, что сопровождается флюидоразрывом пород и приводит к образованию в них дополнительной вторичной пористости.

2. В этих же экспериментах происходит растворение неустойчивых минералов (преимущественно ПШ), в результате чего также формируется вторичная пористость.

3. По мере увеличения доли H₂O₂ в составе ГФ наблюдается первоочередное окисление исходного ОВ и образующегося из него битума, разложение карбонатов, Кт и ПШ, появление сначала Mg, который затем по мере роста концентрации H₂O₂ сменяется Гем, образуются S°, Анг, исчезает Fe-Хл.

4. В экспериментах с максимальной концентрацией H₂O₂ к перечисленным выше минералам гидротермального происхождения добавляются сульфаты типа квасцов, миллезевичит, Кт, отмечается интенсивное окремнение поверхности образцов.

5. Воздействие гидротермального флюида, содержащего в своем составе CO₂ на юрские отложения различного состава, приводит к возникновению разнообразных минеральных ассоциаций, в зависимости от его температуры и концентрации в нём CO₂:

– чаще всего происходит растворение Кц, обломков ПШ с образованием гидротермального альбита, увеличивается доля Кв и Ил, из исходного растительного дегрита образуется битум, а также углеводородные и не углеводородные летучие соединения;

– в интервале температур 235-290 °С наблюдается смена низкотемпературной Кт-Сид ассоциации на более высокотемпературный Fe-Хл;

– с ростом температуры ГФ наблюдается усиление окислительных свойств CO₂, что приводит к осветлению поверхности образцов, формированию Анг, а в осадке появляются окислы Cr, Ni и Cu вследствие окисления металлов, слагающих автоклавы, в результате чего в гидротермальной системе возникает большое количество CO;

6. Вопреки широко распространенному мнению, что из органического вещества терригенного происхождения образуется преимущественно метан, из полученных результатов анализа газовой фазы ГФ следует, что в составе этой фазы метан не является преобладающим компонентом – гораздо больше образуется более тяжелых углеводородов вплоть до C₅ и близких к нему по времени удержания соединений.

7. Полученные результаты свидетельствуют о том, что природные ГФ имели более низкую концентрацию кислорода в своем составе, чем в проведенных экспериментах, так как в участках, подвергшихся их воздействию, не встречены окислы железа, хотя присутствуют сульфаты Ca и Ba, S°, а сами породы интенсивно осветлены.

8. Осветление пород также возможно происходило в результате окисления органического вещества, присутствующего в их составе, углекислым газом, который при высоких температурах активно проявляет свойства окислителя.

9. В опытах, где ГФ имел кислые свойства, вместо Fe-Хл образовывались Кт и Сид, однако при прочих равных условиях, Хл является более высокотемпературным минералом, чем Кт.

10. Благодаря тектоно-гидротермальным процессам, имевшим место в юрских отложениях Западной Сибири, происходит практически одновременное формирование высокоёмких пород-коллекторов и генерация нафтидов, которые заполняют эти коллекторы, формируя в них УВ-залежи. Поэтому основной задачей геофизиков, использующих дистанционные методы поисков углеводородных залежей, является создание соответствующей методики обработки этих методов, на основе использования которой стало бы возможным находить зоны, где протекали эти процессы и формировались вторичные коллекторы, заполненные углеводородами, имеющими тектоно-гидротермальное происхождение.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Бгатов В.И.* История кислорода земной атмосферы. – М.: Недра, 1985. – 87 с.
2. *Бескровный Н.С., Набоко С.И., Главатских С.Ф., Ермакова В.И., Лебедев Б.А., Талиев С.Д.* О нефтеносности гидротермальных систем, связанных с вулканизмом. – Геология и геофизика. – 1971. – № 2. – С. 3-13.
3. *Бескровный Н.С., Ермакова В.Н., Талиев С.Д.* Битумоиды нефтесодержащих гравелитов и глин в узонской гидротермальной системе. В сб.: Гидротермальные минералообразующие растворы областей активного вулканизма. – Наука. – СОАН СССР. – Новосибирск. – 1974. – С. 135-143.
4. *Борисов М.В.* Геохимические и термодинамические модели жильного гидротермального рудообразования. – М.: Научный Мир. – 2000. – 360 с.
5. *Гуцалю Л.К.* О разгрузке метана в водах термальных источников Камчатки. – Геохимия. – 1980. – № 3. – С. 351-358.
6. *Зубков М.Ю., Бакуев О.В., Дворак С.В., Пастух П.И.* Вертикальная и латеральная миграция поровых флюидов в юрском комплексе Красноленинского свода // Сборник научных трудов ЗапСибНИГНИ «Физико-литологические особенности и коллекторские свойства продуктивных горизонтов Западной Сибири». – Тюмень. – 1988. – С. 68-77.
7. *Зубков М.Ю.* Гидротермальные силициты – перспективный нефтегазопоисковый объект доюрского фундамента Западно-Сибирской плиты // Сборник научных трудов СНИИГиМС. «Геология и нефтегазоносность нижних горизонтов чехла Западно-Сибирской плиты». – Новосибирск. – 1990. – С. 87-101.
8. *Зубков М.Ю., Дворак С.В., Романов Е.А., Чухланцева В.Я.* Гидротермальные процессы в шеркалинской пачке Талинского месторождения (Западная Сибирь). – АН СССР. – Литология и полезные ископаемые. – 1991. – № 3. – С. 122-132.
9. *Зубков М.Ю., Шведенков Г.Ю.* Экспериментальное моделирование процесса формирования вторичных коллекторов под действием гидротермальных флюидов различного состава // Пути реализации нефтегазового потенциала ХМАО/ Материалы V научно-практической конференции. – Ханты-Мансийск. – 2002. – Том I. – С. 323-332.
10. *Зубков М.Ю.* Тектоногидротермальные процессы в юрских отложениях Западной Сибири. – Геология нефти и газа. – № 1. – 2017. – С. 60-76.

11. Зубков М.Ю. Связь битуминизации баженовской свиты с гидротермальными процессами (Западная Сибирь). – Горные ведомости. – 2018. – № 6 (160). – С. 6-24.
12. Зубков М.Ю. Генезис битумов в юрских отложениях Западной Сибири // Пути реализации нефтегазового потенциала ХМАО / Материалы XX научно-практической конференции. – Том I. – Ханты-Мансийск. – 2019. – С. 228-255.
13. Зубков М.Ю. Применение методов экспериментальной тектоники в нефтяной геологии на примере месторождений Западной Сибири. Геотектоника. – 2019. – № 3. – С. 92-109.
14. Карпов Г.А. Современные гидротермы и ртутно-сурмяно-мышьяковое оруденение. – М.: Наука. – 1988. – 183 с.
15. Киреева Т.А., Буданова Д.И. Роль вертикальной миграции высокотемпературных флюидов в формировании пластовых вод нефтегазовых месторождений на севере Западно-Сибирского бассейна. – Вестник МГУ. – Сер. 4. Геология. – 2013. – № 3. – С. 38-46.
16. Краюшкин В.А. Небиогенная нефтегазоносность современных центров спрединга дна мирового океана. – Геология и полезные ископаемые Мирового океана. – 2008. – № 3. – С. 19-39.
17. Кудрявцев Н.А. Против органической гипотезы происхождения нефти. – Нефтяное хозяйство. – № 9. – 1951. – С. 17-29.
18. Кудрявцев Н.А. Геологические доказательства глубинного происхождения нефти. – Труды ВНИГРИ. – № 132. – Ленинград, 1959. – С. 242-262.
19. Кудрявцев Н.А. Генезис нефти и газа. – Труды ВНИГРИ. – Вып. 319. – Ленинград: Недра. – 1973. – 216 с.
20. Мархинин Е.К. Вулканы и жизнь. – М.: Мысль. – 1980. – 198 с.
21. Набоко С.И. Формирование современных гидротерм и метаморфизм растворов и пород. Вопросы вулканизма. – Изд. АН СССР. – М. – 1962. – С. 52-62.
22. Порфириев В.Б., Ключко В.П. Геологические аспекты нефтегазоносности фундамента (на примере Западной Сибири) // Особенности глубинного строения земной коры и теория обоснования неорганического генезиса нефти. – Киев: Наукова думка. – 1982. – С. 5-155.
23. Соколов В.А. Геохимия природных газов М.: Недра. – 1971. – С. 336.
24. Справочник физических констант горных пород // Под. ред. С. Кларка мл.: М. Мир. – 1969. – 544 с.
25. Тимурзиеев А.И. К созданию новой парадигмы нефтегазовой геологии на основе глубинно-фильтрационной модели нефтегазообразования и нефтенакопления. – Геофизика. – 2007. – № 4. – С. 49-60.
26. Флоровская В.Н., Пиковский Ю.И., Теплицкая Т.А. К геохимии углеродистых веществ в гидротермальном минералообразовании // Гидротермальные минералообразующие растворы областей активного вулканизма / Отв. ред. С.И. Набоко. – Новосибирск: Наука. – 1974. – С. 143-146.
27. Чекалюк Э.Б. Нефтепродуктивный слой верхней мантии Земли // В кн.: Происхождение нефти и газа и формирование их промышленных залежей. – Киев.: Наукова думка. – 1971. – С. 37-51.
28. Щепеткин Ю.В., Рыльков А.В. Реконструкция энергетических преобразований природной геохимической системы порода-ОВ-вода-нефть (газ) на основе детальных исследований скоплений углеводородов // Энергия и механизм первичной миграции углеводородов. – М.: Наука. – 1988. – С. 66-72.
29. Zubkov M.Yu., Shvedenkov G.Yu., Savinov A.V. The role of hydrothermal solutions in the alteration of organic matter and formation of reservoir rocks. Abstracts. Second International Symposium «Thermodynamics of natural processes» and Russian Symposium «Thermodynamics in geology», 13-20 September 1992. – Novosibirsk, Russia, p. 148.