



ГИДРОТЕРМАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ВТОРИЧНЫХ КОЛЛЕКТОРОВ В КРЕМНИСТЫХ ИЗВЕСТНЯКАХ (СИСТЕМА H_2O-CO_2)

М. Ю. Зубков

Западно-Сибирский геологический центр, Тюмень, Россия

Впервые рассмотрены результаты гидротермального моделирования формирования вторичных коллекторов (гидротермальных силицитов) в кремнистых известняках, широко распространенных в доюрском комплексе Западной Сибири, в системе H_2O-CO_2 , в которой мольная доля CO_2 изменялась от 0,0 до 1,0, а температура от 215 до 410 °С. Установлено, что в этой системе осуществляется преимущественное растворение карбонатов, и в первую очередь доломита. В результате происходит окремнение поверхности кремнистых известняков и формирование в них вторичной пористости, в единичных образцах – образование микрокристаллов кварца с различной степенью совершенства кристаллической грани. Установлено, что пирит также неустойчив в этих гидротермальных условиях и разлагается с образованием за его счет железосодержащих карбонатов. Также наблюдается его превращение в пирротин и сульфиды меди и никеля. Растворенный гидротермальным флюидом биогенный кварц выделяется из него или в форме микрокристаллического кварца, или в виде закалочных фаз, представленных кристобалитом и/или аморфным кремнеземом. Выяснено, что при температуре выше 360 °С вместо железосодержащих карбонатов за счет пирита образуется хлорит, при этом вместе с пиритом разлагается и каолинит. Впервые экспериментально установлено, что при высокой температуре (410 °С) углекислый газ приобретает окислительные свойства и в результате его взаимодействия с медью образуются окись и закись меди. Кроме того, в этих условиях пирит превращается в железосодержащие карбонаты, а не в хлорит. Выявлены основные закономерности формирования по палеозойским кремнистым известнякам вторичных коллекторов – гидротермальных силицитов.

Ключевые слова: кремнистые известняки, гидротермальные флюиды, система H_2O-CO_2 , вторичные коллекторы, гидротермальные силициты.

HYDROTHERMAL MODELING OF SECONDARY RESERVOIR FORMATION IN SILICEOUS LIMESTONS (H_2O-CO_2 SYSTEM)

M. Yu. Zubkov

West-Siberian Geological Center, Tyumen, Russia

We have discussed the first results of hydrothermal modeling of the formation of secondary reservoirs (hydrothermal silicites) in siliceous limestones, which are widespread in the Pre-Jurassic complex of West Siberia, namely, in the H_2O-CO_2 system, in which the mole fraction of CO_2 varied from 0.0 to 1.0, and the temperature from 215 to 410°C. It has been found that in this system there is a predominant dissolution of carbonates and, first of all, dolomite, as a result of which the surface of siliceous limestone is silicified and secondary porosity is formed in them. In some samples, quartz microcrystals with varying degrees of perfection of crystal faceting are shaped. It is found that pyrite is also unstable under these hydrothermal conditions and decomposes forming iron-containing carbonates at its sacrifice. Its transformation into pyrrhotite and copper and nickel sulfides is also observed. Biogenic quartz dissolved by a hydrothermal fluid is released from it either in the form of microcrystalline quartz, or in the form of quenching phases represented by cristobalite and/or amorphous silica. It is also found that at temperatures above 360°C, instead of iron-containing carbonates, chlorite is formed due to pyrite, while kaolinite also decomposes along with pyrite. It was experimentally established for the first time that at a high temperature (410°C), carbon dioxide acquires oxidizing properties and, as a result of its interaction with copper, oxide and red oxide of copper are formed. In addition, under these conditions, pyrite passes into iron-containing carbonates rather than chlorite. The main regularities of the formation of secondary reservoirs, i. e. hydrothermal silicites, in the Paleozoic siliceous limestone have been revealed.

Keywords: siliceous limestones, hydrothermal fluids, H_2O-CO_2 system, secondary reservoirs, hydrothermal silicites.

DOI 10.20403/2078-0575-2020-3-43-58

Снижение темпов прироста запасов в традиционных (терригенных) породах-коллекторах мезозойского возраста, входящих в состав осадочного чехла Западно-Сибирского осадочного бассейна, вынуждает геологов и нефтяников вести поиски углеводородных залежей в породах доюрского комплекса (ДК) [1–8, 10, 13, 15]. Наиболее перспективны в его

составе известняки, включая их кремнистые разновидности. Кремнистые известняки и образовавшиеся в них в результате их тектоно-гидротермального преобразования вторичные коллекторы (гидротермальные силициты по [7]) широко развиты в составе кровельной части ДК Западно-Сибирского бассейна [6, 7, 14] – на Талинском, Северо-Варьганском,



Варьеганском, Ханты-Мансийском, Южно-Демьянском, Туйском, Когитском, Восточно-Когитском, Западно-Останинском, Северо-Калиновом, Восточном и других месторождениях; их возраст верхнедевонско-нижнекарбонный [6, 7]. По высокой степени метаморфизма рассеянного в них органического вещества (как правило, от Т до А, за исключением периферийных районов), а также низкой пористости (в редких случаях до 2–4 %) можно заключить, что они побывали на глубине 8–10 км и практически полностью реализовали свой нефтегенерационный потенциал, уплотнились и перешли в класс неколлекторов [18, 19]. Таким образом, существование первичной пористости в кремнистых известняках невозможно и перспективы нефтегазоносности этих пород следует связывать лишь с вторичными коллекторами, которые возникают в них в результате тектонического дробления и воздействия гидротермальных растворов, проникающих по этим зонам дробления из фундамента. Гидротермальные флюиды отделяются от магматических тел, поднимающихся из астеносферы и включают в свой состав (мобилизуют) сначала поровые воды, содержащиеся в породах фундамента, а затем также и воды подошвенной части осадочного чехла [6].

В связи с этим несомненный интерес представляет моделирование процессов гидротермального воздействия на кремнистые известняки и набор минералов, образующихся в результате такого воздействия [9]. Это позволило бы более детально разобраться в механизме образования в них вторичных коллекторов (гидротермальных силицитов), а также попытаться восстановить состав гидротермальных растворов, их температуру и физико-химические свойства. С этой целью осуществлен комплекс экспериментов с гидротермальными растворами, имевшими различную температуру, состав, окислительно-восстановительный потенциал, кислотно-щелочные условия. Продолжительность экспериментов изменялась от 7 до 20 суток.

Поскольку по результатам исследований вулканологов в составе гидротермальных флюидов вторыми по содержанию после воды являются углекислый газ и угольная кислота, образующаяся при растворении CO_2 в воде [11, 12, 16], то основной объем опытов был выполнен с гидротермальными растворами с различной концентрацией CO_2 . Было проведено около 100 экспериментов, и в одной статье трудно описать все полученные результаты. Поэтому в настоящей публикации представлены лишь те, которые получены при проведении опытов только в системе $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$, включая эксперименты с чисто водным (без CO_2) и безводным (только с CO_2) флюидами.

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

В статье использованы следующие сокращения: Ам. кр – аморфный кремнезем; Анг – ангидрит;

Анк – анкерит; ГФ – гидротермальный флюид; ДК – доюрский комплекс; Дл – доломит; Ил – иллит; Кв – кварц; КИ – кремнистый известняк; Кт – каолинит; Кц – кальцит; ОВ – органическое вещество; Пи – пирит; Пир – пирротин; Сид – сидерит; РСА – рентгеноструктурный анализ; РЭМ – растровый электронный микроскоп; Хл – хлорит; S° – самородная сера; χ_{CO_2} – мольная доля углекислого газа в составе гидротермального флюида.

Аппаратура и методики

Эксперименты проводились в реакторах (автоклавах) объемом около 10 см³, изготовленных из нержавеющей стали, давление в которых задавалось по коэффициенту заполнения исходя из его объема. Для этого, в свою очередь, использовались данные о фазовых равновесиях в системе $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ и соотношения в ней между давлением, объемом и температурой [17].

В качестве исходных для экспериментов использовались образцы КИ из кровельной части доюрского комплекса, вскрытого в пределах Северо-Варьеганского месторождения [6, 7]. В большинстве экспериментов в качестве буфера (для поддержания величины Eh около нейтральных значений) добавлялась пиритовая шихта. В процессе разгерметизации реакторов после опытов из всех выделялся газ.

Образцы после проведения экспериментов изучались и описывались под биноклем, а затем исследовались с использованием РСА и съемки на РЭМ. Последняя процедура имела целью определение изменения структуры порового пространства после гидротермальной обработки. Изменения минерального состава фиксировались главным образом на поверхности образца. Кроме того, также исследовалась часть образовавшихся в процессе эксперимента осадков.

Опыты объединялись в серии, которые, как правило, проводились при одной и той же температуре, но с различной концентрацией CO_2 в составе ГФ. Все опыты проводились при одном и том же давлении (70 МПа.)

Образование вторичной пористости оценивалось лишь на качественном уровне, поскольку она формировалась преимущественно в приповерхностной части образца, так как система образец – ГФ была закрытой и процесс растворения образца флюидом прекращался по мере его насыщения растворяемыми минеральными компонентами.

Результаты исследований

В составе КИ кроме карбонатов и кремнезема, являющихся главными породообразующими компонентами, присутствуют также и глинистые минералы, представленные преимущественно Ил с небольшой примесью Кт и Хл, суммарное содержание которых составляет около 10 %. Кроме Кц в КИ присутствует Дл (в среднем 8 %) и Пи (около



5 %), отмечена незначительная примесь обломков полевых шпатов (около 1,5 %), Сид (1,2 %) и ОВ (около 1,4 %) [7].

Это породы темно-серого цвета, обладающие преимущественно массивной текстурой, иногда трещиноватые с трещинами, заполненными эпигенетическим Кц белого цвета. Содержание кремнезема (Кв) и карбонатов (Кц и Дл) изменяется в широких пределах (рис. 1). Кремнезем встречается либо в виде отдельных рассеянных в породе мелких зерен, часто расположенных между зернами (кристаллами) карбонатов, либо агрегатов, сконцентриро-

ванных в зернах микрокристаллических карбонатов, а также в обломках раковин морских организмов (см. рис. 1, а–г). Широко развиты процессы коррозии кремнистого материала карбонатами. Часто встречается также «перьевидная» разновидность эпигенетического кремнезема, обрастающая кристаллы Пи (см. рис. 1, г).

Поскольку биогенный кремнезем, который входил в состав разнообразных морских организмов, имевших кремнистый скелет, подвергался жесткому термобарическому воздействию, то он превратился в мелкозернистую плохо кристаллизованную

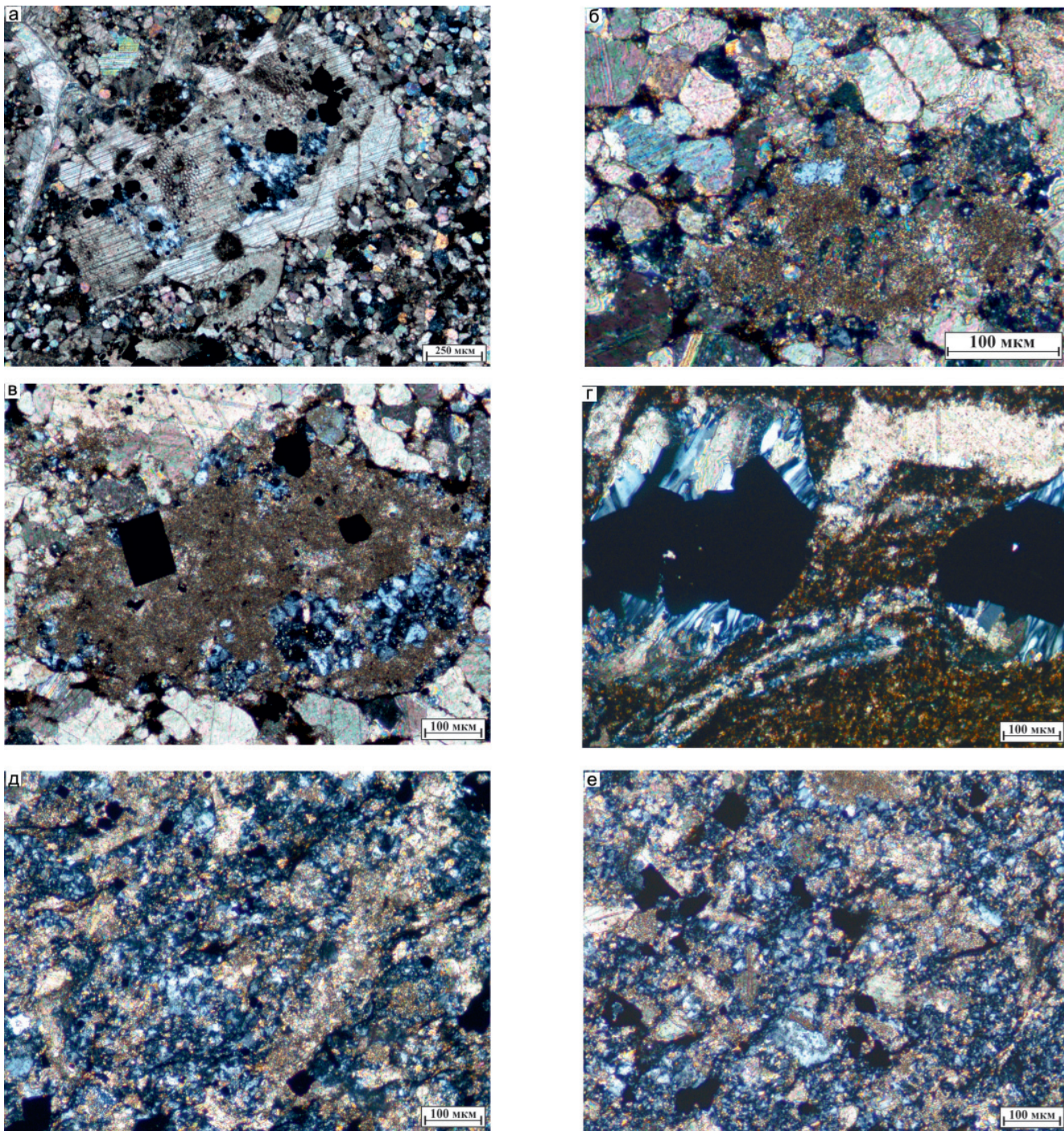


Рис. 1. Петрографические шлифы (с анализатором) образцов КИ, отобранные из скв. 8П Северо-Варьганского месторождения в инт. 3480–3490 м. Карбонаты – пестрые цвета с перламутровым оттенком; кремнезем – синего или голубого цвета различных оттенков (пояснения см. в тексте)

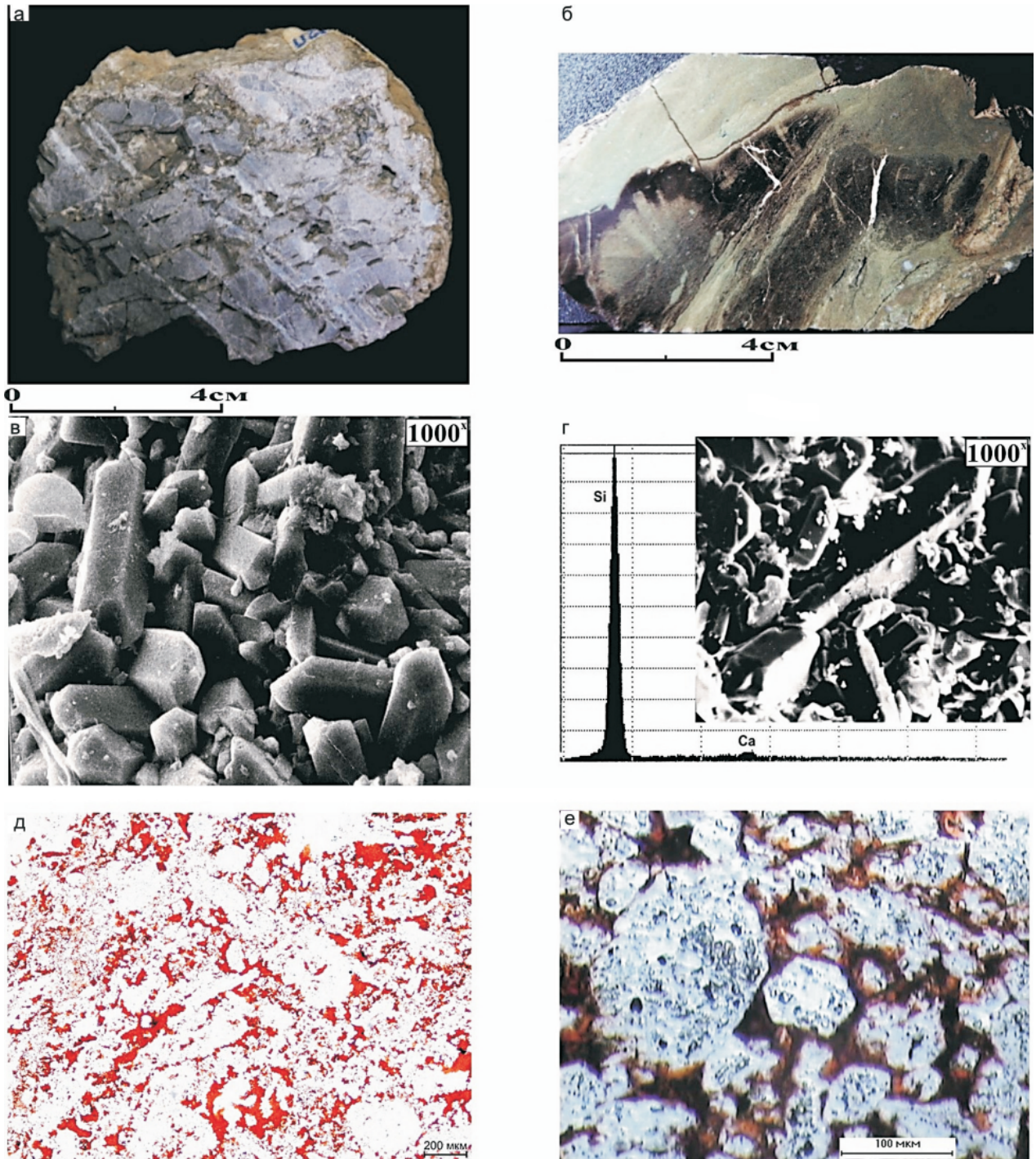


Рис. 2. Образцы ГС (а, б); снимки РЭМ их поверхности (в, г) и прокрашенных красной смолой прозрачных петрографических шлифов (д, е); месторождения: а, в, д, – Северо-Варьганское; б, г, е – Ханты-Мансийское

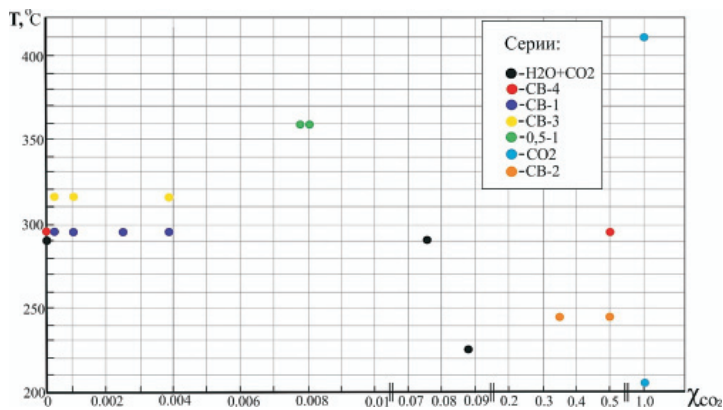


Рис. 3. Диаграмма мольной доли CO₂ – температуры с нанесенными на нее фигуративными точками, соответствующими сериям проведенных экспериментов в системе H₂O–CO₂ при P = 70 МПа

массу, что особенно хорошо видно в образцах, где кремнезем явно преобладает над карбонатами (см. рис. 1, д, е).

В результате гидротермального воздействия на КИ образуются так называемые ГС (силициты, а не кварциты, чтобы подчеркнуть биогенную природу исходного кремнезема) [7]. Они представляют собой светло-серые, иногда почти белые, породы с бурыми участками, сложенными гидротермальным Сид (рис. 2, а, б). Состоят они практически из одного мелкокристаллического кварца (см. рис. 2, в, д) и обладают высокой пористостью – до 25–30 % (см. рис. 2, д, е). Их мощность достигает 100–150 м.

Так как нет прямых определений температур и составов ГФ, действовавших на КИ в составе дюрского комплекса Западной Сибири, эксперименты проводились исходя из самых общих представлений о возможных термодинамических свойствах ГФ с широкими вариациями температур и соотношений H_2O-CO_2 [11, 12, 16].

Фигуративные точки, соответствующие проведенным экспериментам, расположены на диаграмме, имеющей в качестве осей значения температуры и молярной концентрации CO_2 (рис. 3).

Изменения в минеральном составе приведены в таблице. Для минеральных фаз, изначально входивших в состав кремнистых известняков, а затем выделявшихся также и из ГФ в виде новообразованных кристаллов, в таблице выделено по два столбца: исходный (Исх) и гидротермальный (Гт) соответственно.

Начнем рассмотрение полученных результатов с экспериментов, в которых флюид имел чисто водный состав ($\chi_{CO_2} = 0$).

Серии H_2O-CO_2 и СВ-4. Первые два эксперимента проводились с КИ при температурах 290 и 295 °С (см. рис. 3, таблицу). После их завершения отмечалось слабое осветление поверхности образцов, на ней возникли многочисленные мелкие вторичные поры, размеры которых изменяются в широких пределах – от 1–5 до 50–100 мкм (рис. 4, а, б). Судя по элементным спектрам, полученным с поверхности образца, она сложена главным образом исходными минералами – Кв и Ил, доля Кц заметно уменьшилась (см. рис. 4, б).

При большом увеличении видно, что новообразованный Сид присутствует на поверхности образца в виде мелких кристаллов (см. рис. 4, б). По данным РСА можно заключить, что воздействие ГФ на поверхность КИ привело к незначительному ее окремнению, увеличению доли Ил, полному исчезновению Дл и появлению новых минеральных фаз гидротермального происхождения: Сид, Анг и миллерит (NiS). Таким образом, чисто водный ГФ вызывает полное растворение Дл, частичное – Кц; разлагается Пи, за счет которого образуются Сид и Анг.

Следующие эксперименты проводились с участием CO_2 , но его молярная доля в ГФ в этих экспериментах не превышала 0,1.

Серия СВ-1. Температура составляла 295 °С, χ_{CO_2} в ГФ изменялась от 0,0002 до 0,0038 (см. рис. 3, таблицу).

Во всех экспериментах наблюдались примерно одни и те же изменения, а именно: слабое осветление и выщелачивание образцов КИ с образованием многочисленных мелких пор на их поверхности (см. рис. 4, в, г). В результате преимущественного растворения карбонатов, и в первую очередь Дл, происходит окремнение поверхности образцов. Наблюдается также выщелачивание зерен Пи, образуются многочисленные микропоры, размеры которых изменяются от 3–5 до 50–100 мкм (см. рис. 4, г).

Следует обратить внимание, что на одном из участков поверхности КИ в образовавшихся микрокавернах отмечается присутствие мелких (5–25 мкм) кристаллов гидротермального Кв и агрегатов плохо ограниченных кристаллов Кт (см. рис. 4, г).

Серия СВ-3. Значение χ_{CO_2} изменялось в тех же пределах, что и в предыдущих опытах (от 0,0002 до 0,0038), температура составляла 315 °С (см. рис. 3, таблицу).

Образцы КИ претерпели слабое осветление, окремнение и выщелачивание. С их поверхности исчезли Дл и Пи, появились тонкие небольшие по размерам пленки и мелкие хлопьевидные агрегаты Ам.кр (5, а, б). Отмечается растворение и перетложение Кц в форме мелких хорошо ограниченных кристаллов размером 3,5–50,0 мкм (см. рис. 5, б).

Таким образом, из образцов в большей или меньшей степени выносятся почти все породообразующие минералы (Дл, Кц, кремнезем, Пи), которые после насыщения ГФ растворенными компонентами выделяются из него или в форме кристаллов (Кц, Сид, Анг, Пир, миллерит, S^0), или в виде аморфных образований (кремнезем). В результате растворения неустойчивых минералов формируется вторичная пористость.

Серия 0.5-1. Рассмотрим результаты двух гидротермальных экспериментов с низкой концентрацией CO_2 в составе ГФ, но высокой температурой (360 °С), χ_{CO_2} в первом эксперименте 0,0080, во втором – 0,0079 (см. рис. 3, таблицу).

После завершения первого эксперимента поверхность образца носила следы интенсивного выщелачивания и заметного осветления, отмечалось отложение пленочек и корочек светло-серого, реже светло-буроватого цвета (см. рис. 5, в). Встречаются также мелкие прозрачные кристаллы гидротермального Кц (см. рис. 5, г).

На интенсивно выщелоченной поверхности образца отмечаются рыхлые микропористые агрегаты новообразованных минеральных фаз, представленных главным образом микрошешуйчатым Mg-Fe Хл с примесью Анг (см. рис. 5, г). Хл является более поздней фазой, отлагавшейся из ГФ на многочисленных мелких кристаллах гидротермального Кц (см. рис. 5, г).

Результаты анализа изменений минерального состава образцов кремнистого известняка после воздействия на него гидротермального флюида с различной температурой и соотношением H_2O-CO_2

Серия	T, °C	χ_{CO_2}	Кц		Дл	Сид		Анк	Ил	Кт		Хл		Кв		Ам.кр	Пи	S°	Анг	Другие фазы гидротермального происхождения	
			Исх	Гт		Исх	Гт			Исх	Гт	Исх	Гт	Исх	Гт						
H_2O+CO_2 СВ-4	290	-	<	+	<0	=	н/д	-	>	=	-	=	-	-	+	н/д	н/д	н/д	+	н/д	н/д
	295	-	<	н/д	<0	=	+	н/д	>	<0	-	<0	-	+	+	н/д	н/д	н/д	+	н/д	Миллерит
СВ-1	295	0,0002– 0,0038	<	+	<0	=	н/д	н/д	>	=	+	=	-	+	+	+	+	+	+	+	«
	315	0,0002– 0,0038	<	+	<0	=	+	+	>	=	н/д	<0	-	+	+	+	+	+	+	+	«
СВ0.5-1	360	0,008	<	+	<0	<0	0	-	>	<0	-	=	+	-	+	+	+	н/д	+	+	Халькозин
	360	0,0079	<	+	<0	<0	0	-	>	<	-	=	+	-	+	+	+	н/д	+	+	н/д
H_2O+CO_2 H_2O+CO_2	235	0,089	<	н/д	<0	=	+	+	>	=	-	<0	-	-	+	н/д	н/д	н/д	н/д	н/д	н/д
	290	0,075	<	н/д	<0	=	+	+	-	=	-	<0	-	-	н/д	н/д	н/д	н/д	н/д	н/д	н/д
СВ-2	245	0,5	<	+	<0	=	н/д	н/д	>	=	н/д	н/д	н/д	н/д	+	н/д	н/д	н/д	н/д	н/д	н/д
	245	0,34	<	+	<0	=	н/д	н/д	>	=	н/д	<0	-	+	+	н/д	н/д	н/д	н/д	н/д	н/д
СВ-4	295	0,5	<	н/д	<0	=	+	н/д	>	=	-	<0	-	н/д	+	н/д	н/д	н/д	н/д	н/д	н/д
	410	1,0	=	н/д	н/д	=	+	-	=	=	-	н/д	-	-	+	н/д	н/д	н/д	--	н/д	Миллерит, халькозин, тенарит, куприт
CO_2	215	1,0	=	+	<	=	+	=	=	-	н/д	-	+	+	н/д	н/д	н/д	-	-	н/д	Миллерит

Примечания: Исх – исходная минеральная фаза, входящая в состав КИ; Гт – новообразованная минеральная фаза гидротермального происхождения; изменения содержания минеральной фазы: < – уменьшение, <0 – полное исчезновение, > – увеличение, прочерк – отсутствие, = – сохранение исходной; + – появление новой минеральной фазы гидротермального происхождения; н/д – нет данных.

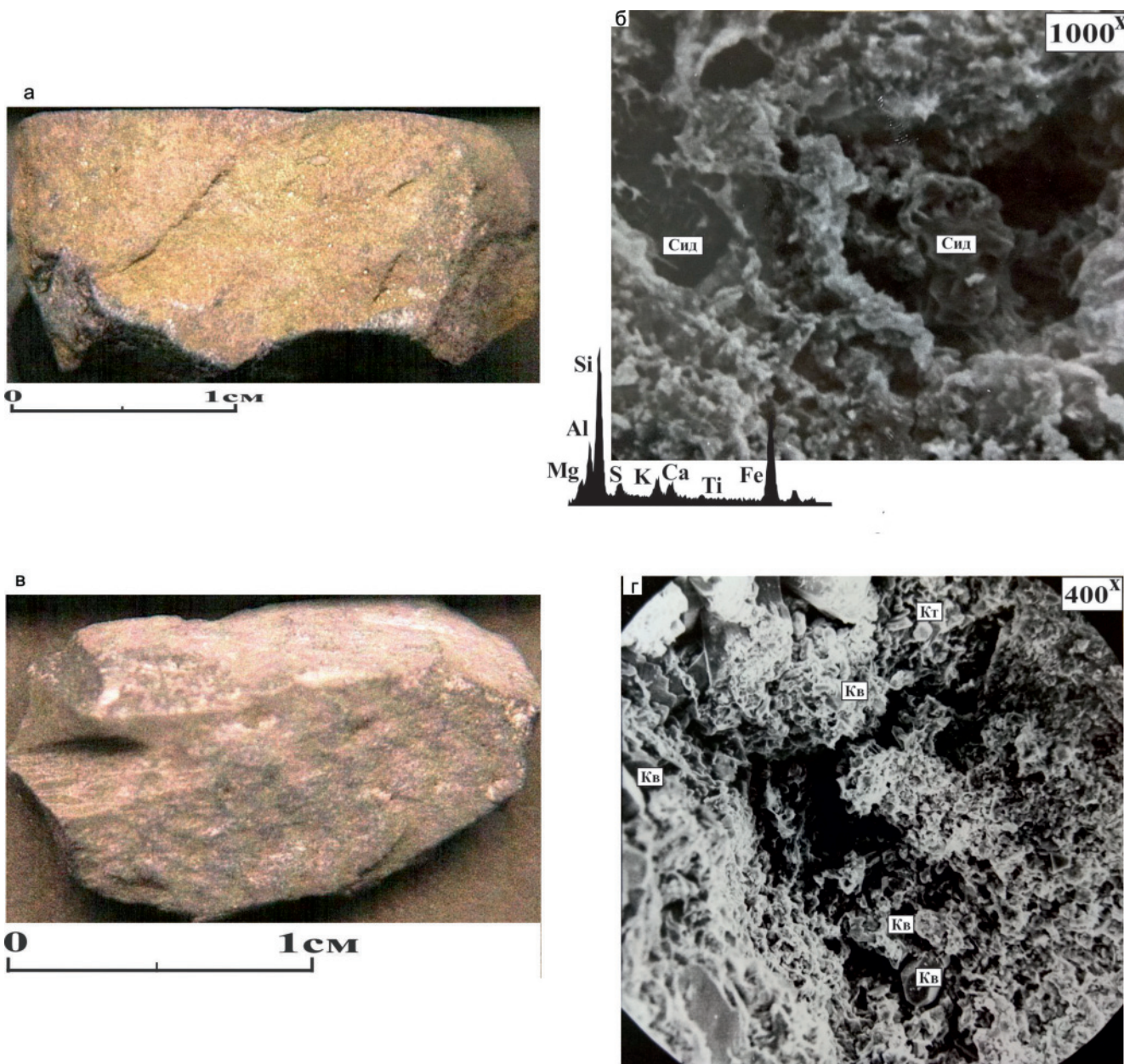


Рис. 4. Фотографии КИ (а, в) и снимки РЭМ их поверхности (б, г) после воздействия на них ГФ: ($T = 295\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\chi_{\text{CO}_2} = 0$ (а, б, серия СВ-4) и $\chi_{\text{CO}_2} = 0,0038$ (в, г, серия СВ-1))

а – внешний вид образца после эксперимента; б – выщелоченная микропористая и окремненная его поверхность с кристаллами гидротермального Сид; в – внешний вид образца после эксперимента; г – увеличенный фрагмент микрокаверны, в которой отмечаются новообразованные минералы гидротермального происхождения: кристаллы Кв и Кт (здесь и далее под снимками приведены элементные спектры, полученные с их площади, если нет иных пояснений)

Таким образом, наблюдается интенсивное растворение минералов, входящих в состав образца, в результате чего в нем образуется вторичная пористость. На его поверхности отлагаются новообразованные минеральные фазы: Кц, Mg-Fe Хл, хлопьевидными тонкими пленками – Ам. кр.

В составе ГФ во втором эксперименте χ_{CO_2} составляла 0,0079 (см. рис. 3, таблицу).

Ровная и довольно гладкая поверхность исходного образца после эксперимента приобрела микропористую текстуру за счет образования на ней микрополостей с широким диапазоном размеров – от 2 до 50 мкм (рис. 6, а, б). Судя по эле-

ментным спектрам, полученным с поверхности образца, можно заключить, что она сложена преимущественно Кв, Ил и гидротермальным Mg-Fe Хл с примесью Анг (см. рис. 6, б). Мелкие блестящие кристаллы на поверхности образца – это гидротермальные Кц и S° .

Сопоставление минерального состава образца КИ до и после опыта по данным РСА показало, что с его приповерхностной части полностью выщелочен Дл, в значительной степени Кц, в меньшей Кв, почти полностью исчез Пи, уменьшилось содержание Кт, а доля Ил немного возросла, появились гидротермальные Хл, Кц, Анг и S° (см. таблицу).

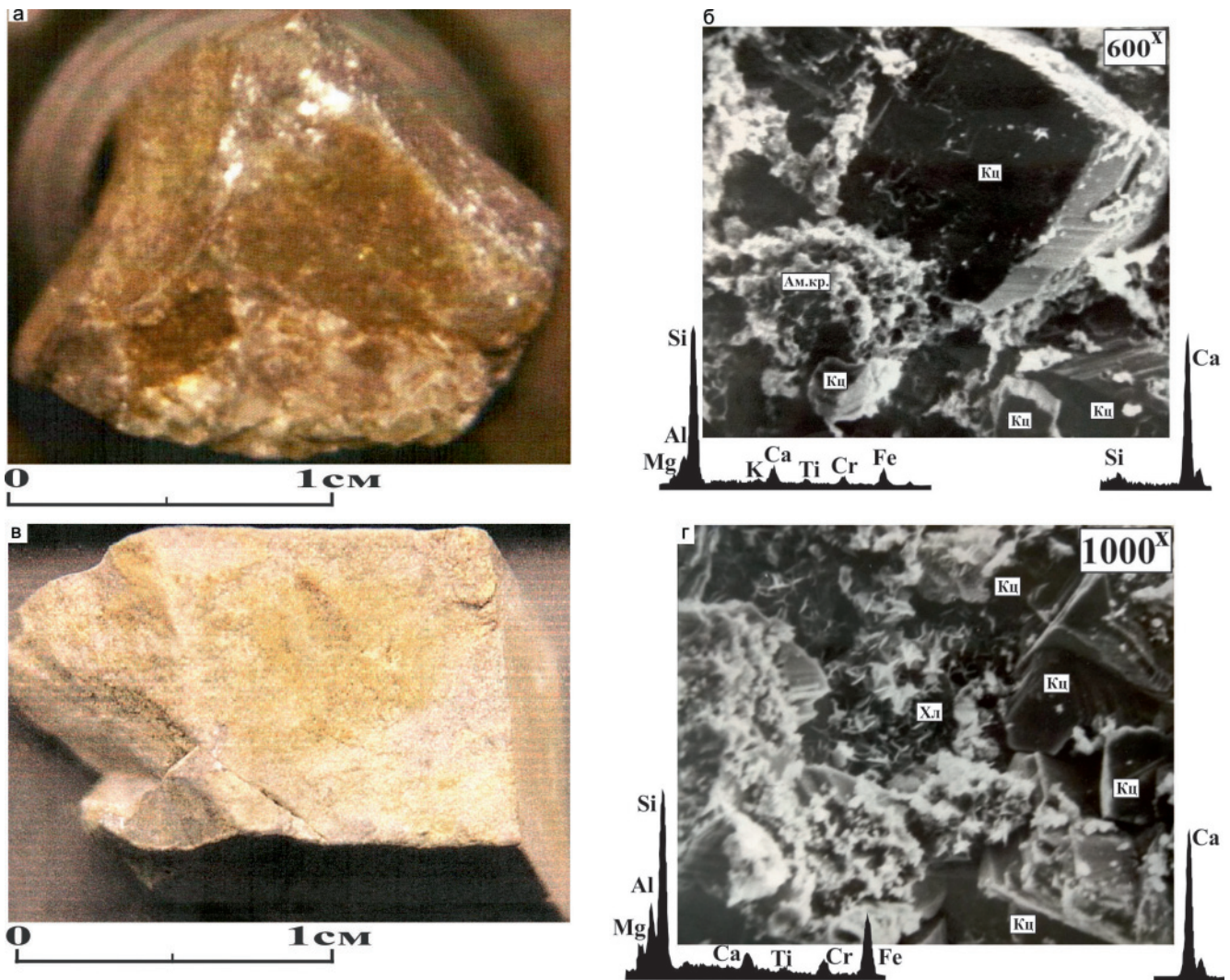


Рис. 5. Фотографии образцов КИ (а, в) и снимки РЭМ их поверхности (б, г) после воздействия на них ГФ ($T = 315\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\chi_{\text{CO}_2} = 0,0038$ (а, б, серия СВ-3) и $T = 360\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $\chi_{\text{CO}_2} = 0,0080$ (в, г, серия 0,5-1))

а – внешний вид образца после эксперимента; б – участок его поверхности с кристаллами гидротермального Кц (элементный спектр справа) и агрегатами Ам.кр (элементный спектр слева); в – внешний вид образца после эксперимента; г – увеличенный фрагмент поверхности с кристаллами гидротермального Кц (элементный спектр справа), мелкими чешуйчатыми новообразованиями Mg-Fe Хл (элементный спектр слева)

Серия $\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$. Опыты проводились с небольшой концентрацией CO_2 в составе ГФ (χ_{CO_2} от 0,075 до 0,089). Температура в одних экспериментах составляла $235\text{ }^{\circ}\text{C}$, в других – $290\text{ }^{\circ}\text{C}$ (см. рис. 3, таблицу).

После завершения более низкотемпературного эксперимента ($\chi_{\text{CO}_2} = 0,089$) поверхность образца носила следы довольно интенсивного выщелачивания и слегка осветлилась (см. рис. 6, в).

На снимке участка, снятого в режиме КОМ-ПО, хорошо видно, что поверхность образца имеет неоднородный состав: самые светлые (почти белые) мелкие зерна – это сохранившийся Пи, светло-серые – образовавшийся по Пи Анк и/или Сид с изоморфной примесью кальция, серые – Кц и основная масса темно-серого цвета – кремнезем (см. рис. 6, г).

Таким образом, анализ полученных в рассматриваемом эксперименте результатов, показал, что

под действием ГФ с невысокой концентрацией CO_2 КИ интенсивно растворяется, происходит вынос карбонатного материала, вследствие чего его поверхность окремняется. Пи также неустойчив в этих условиях и подвергается растворению ГФ с последующим его замещением железистыми карбонатами.

После завершения более высокотемпературного эксперимента ($\chi_{\text{CO}_2} = 0,075$) поверхность КИ носила следы интенсивного выщелачивания и слабого осветления, кроме того, на одной из его сторон произошло «вспучивание» нескольких зерен, первоначально представленных Пи, которые после опыта оказались приподнятыми над первоначально ровной поверхностью образца (рис. 7, а, б). Выщелоченная ГФ поверхность образца приобрела микропористую структуру с многочисленными порами, размеры которых изменяются от 13–50 до 140–350 мкм (см. рис. 7, б). Анализ приподнятых участков показал, что они сложены микрозер-

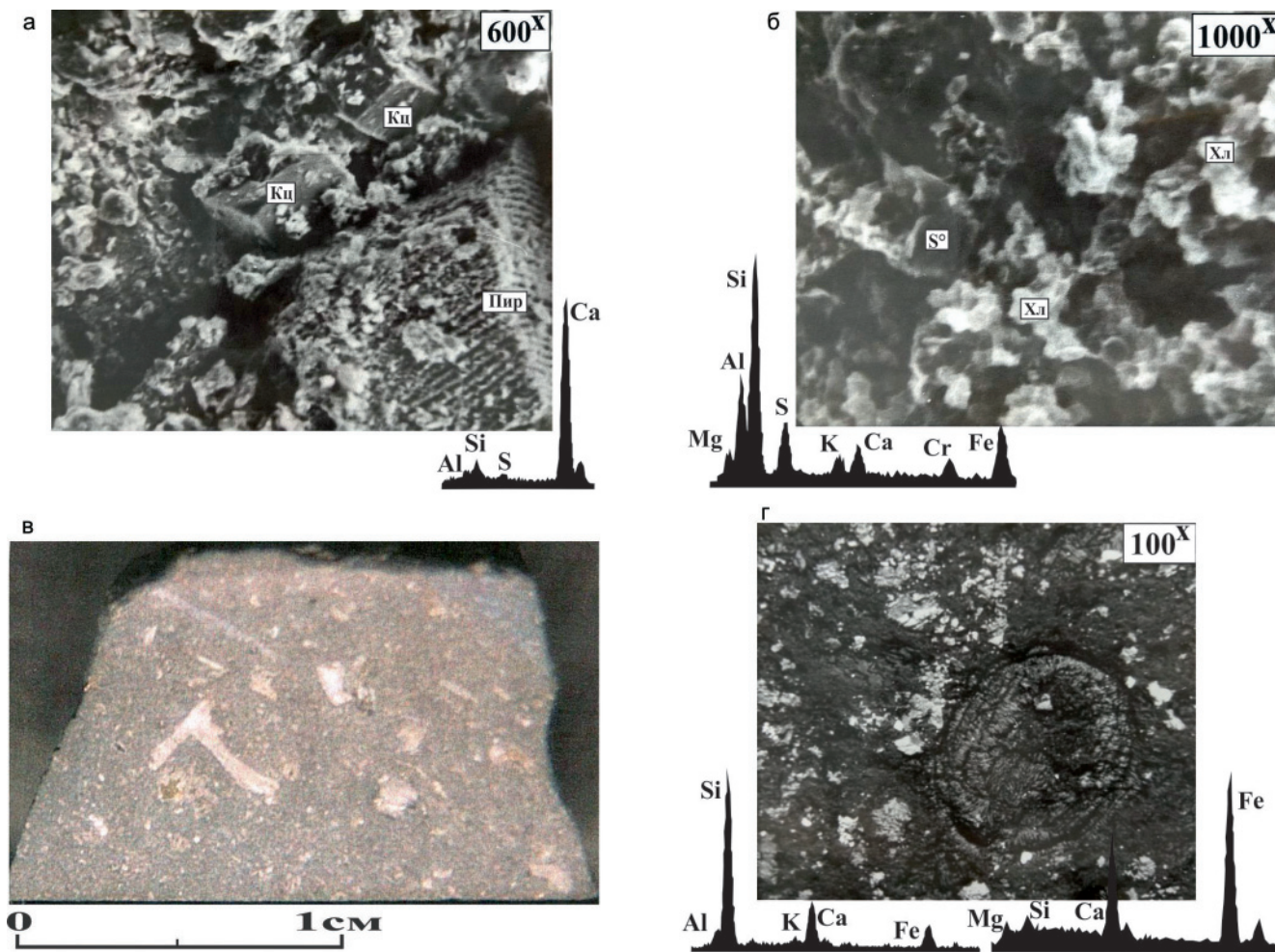


Рис. 6. Снимки РЭМ поверхности образцов КИ (а, б, г) и внешнего вида образца (в) после воздействия на них ГФ ($T = 360\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\chi_{\text{CO}_2} = 0,0079$ (а, б, серия 0,5-1), $T = 235\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\chi_{\text{CO}_2} = 0,089$ (в, г, серия $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$))

а – послойно выщелоченное зерно Пи, превратившееся в Пир и кристаллы гидротермального Кц, элементный спектр которых приведен под снимком; б – увеличенный фрагмент поверхности образца с глинистыми минералами, представленными Ил и Хл с примесью S° ; в – внешний вид образца после эксперимента; г – участок, снятый в режиме КОМПО, на котором хорошо видны следующие минеральные фазы, отличающиеся оттенками от белого до темно-серого цвета: почти белый – Пи, светло-серый – Анк, развивающийся по пириту (элементный спектр справа), серый – Кц и темно-серый – Кв

нистыми Сид и Анк, заместившими исходный Пи (см. рис. 7, а, б).

Таким образом, в обоих опытах наблюдаются примерно одни и те же изменения в результате воздействия на КИ ГФ с невысокой концентрацией CO_2 , а именно: полное растворение с его поверхности Дл, частичное – Кц, в результате чего происходит ее окремнение. Пи также становится неустойчивым в этих условиях и постепенно замещается микрозернистыми железистыми карбонатами.

Серия СВ-2. Эта серия отличается от предыдущих высокими значениями χ_{CO_2} (от 0,21 до 0,5). Опыты проводились при $T = 245\text{ }^{\circ}\text{C}$ (см. рис. 3, таблицу).

После завершения первого эксперимента с $\chi_{\text{CO}_2} = 0,5$ наблюдалось интенсивное выщелачивание и слабое осветление поверхности образца. Отмечались новообразованные фазы белого (слабо магнезиальный Кц) и темно-зеленого (соединения никеля и хрома) цвета (см. рис. 7, в). Новообразо-

ванный слабо магнезиальный Кц присутствует на окремненной поверхности образца в виде многочисленных мелких (3–6 мкм) белых кристаллов (см. рис. 7, в, г).

Анализ минерального состава поверхности образца до и после опыта свидетельствует, что с его поверхности ГФ выщелочены Пи, Дл, частично Кц и в меньшей степени кремнезем, а образовались магнезиальный Кц с небольшой примесью Анг, а также соединения никеля и хрома. Преимущественное выщелачивание карбонатов привело к окремнению поверхности образца и образованию многочисленных пор.

Следующий эксперимент осуществлялся с $\chi_{\text{CO}_2} = 0,34$.

Цвет образца после опыта почти не изменился, однако его поверхность носила следы интенсивного выщелачивания (рис. 8, а, б). В результате воздействия ГФ на образец КИ в нем образовалось большое количество пор (см. рис. 8, б, г).

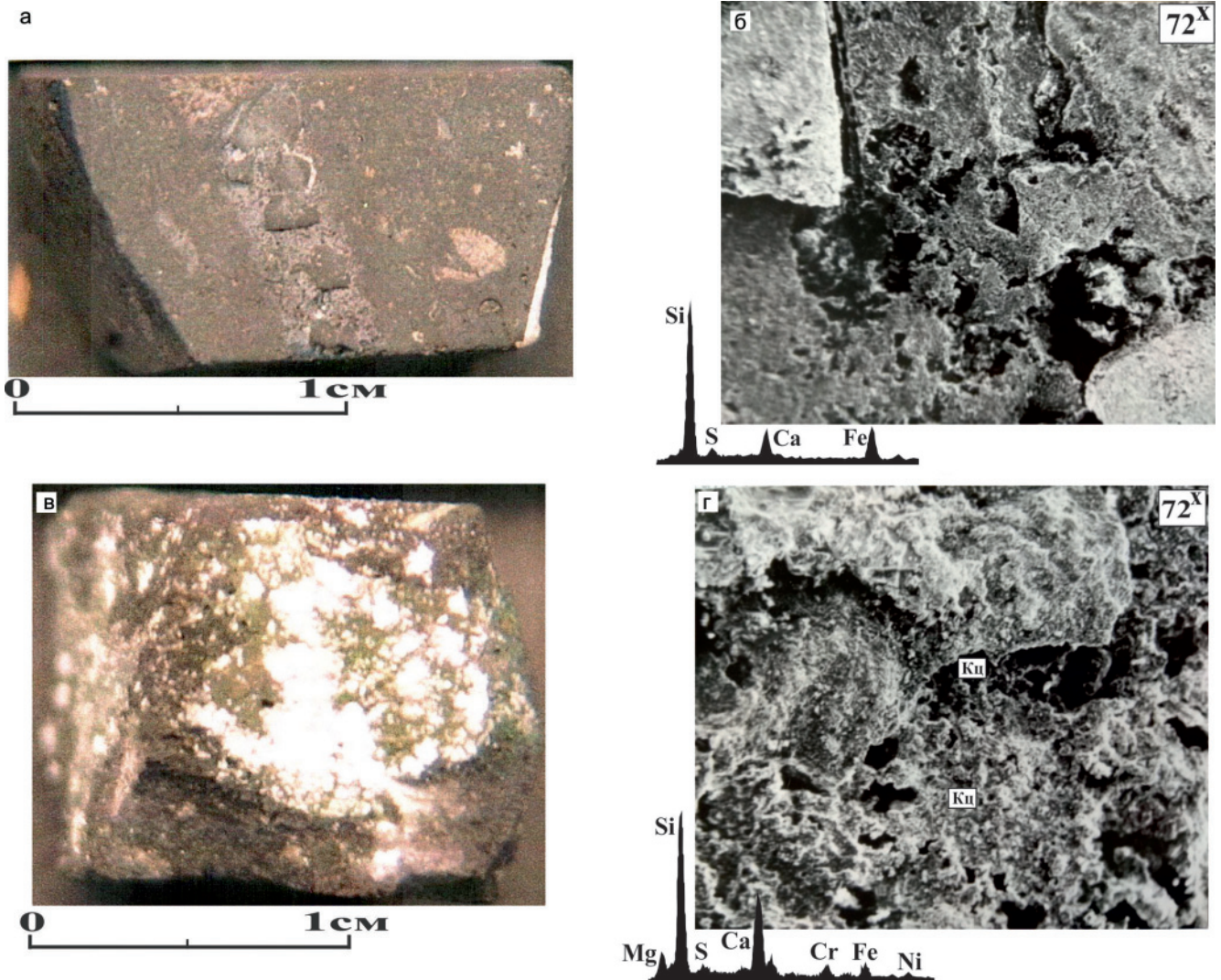


Рис. 7. Фотографии образцов КИ (а, в) и снимки РЭМ их поверхности (б, г) после воздействия на них ГФ $T = 290\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\chi_{\text{CO}_2} = 0,075$ (а, б, серия $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$); $T = 245\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\chi_{\text{CO}_2} = 0,5$ (в, г, серия СВ-2))

а – внешний вид образца после эксперимента; б – выщелоченная микропористая и окремненная его поверхность со вспученными псевдоморфозами по Пи, замещенному железосодержащими карбонатами; в – внешний вид образца после эксперимента; г – микропустоты на его выщелоченной и окремненной поверхности с многочисленными мелкими кристаллами гидротермального магнезиального Кц

Интересно, что в отличие предыдущих экспериментов исходный биогенный кремнезем перекристаллизовался в очень плохо ограненные мелкие кристаллы Кв размером 1–5 мкм (см. рис. 8, в). Образовались также отдельные кристаллы и микродрозы Анк (см. рис. 8, д). Мелкокристаллические агрегаты кристаллов новообразованного Анк часто расположены вблизи или внутри микрокаверн, возникших за счет разложения присутствовавших в образце до эксперимента зерен Пи, т. е. Анк заместил исходный Пи.

Таким образом, в эксперименте с высоким содержанием CO_2 в составе ГФ произошло интенсивное растворение Кц и Дл, вследствие чего в нем сформировалась значительная по величине вторичная пористость и отмечается окремнение поверхности.

Рассмотрим результаты гидротермального воздействия на образец КИ из серии СВ-4 ($\chi_{\text{CO}_2} = 0,5$, $T = 295\text{ }^{\circ}\text{C}$ (см. рис. 3, таблицу).

После эксперимента наблюдалось осветление образца, разрыхление его поверхности, образование на нем тонких корочек вторичных минеральных фаз белого и светло-зеленого цвета, а также редких мелких желтых кристаллов (рис. 9, а, б). Отмечаются также новообразованные фазы, судя по элементному спектру, полученному с площади снимка, представленные Анг, Сид и соединениями никеля и хрома (см. рис. 9, б).

Результаты PCA свидетельствуют о том, что воздействие ГФ на поверхность КИ вызывает ее окремнение, исчезновение Пи и, напротив, появление кальцийсодержащего Сид, Анг, а также окислов никеля и хрома.

Серия CO_2 . Проанализируем результаты экспериментов, проведенных с флюидом, состоящим только из CO_2 ($\chi_{\text{CO}_2} 1,0$, $T 215$ и $410\text{ }^{\circ}\text{C}$ (см. рис. 3, таблицу).

Рассмотрим результаты высокотемпературного опыта. После его завершения поверхность образца

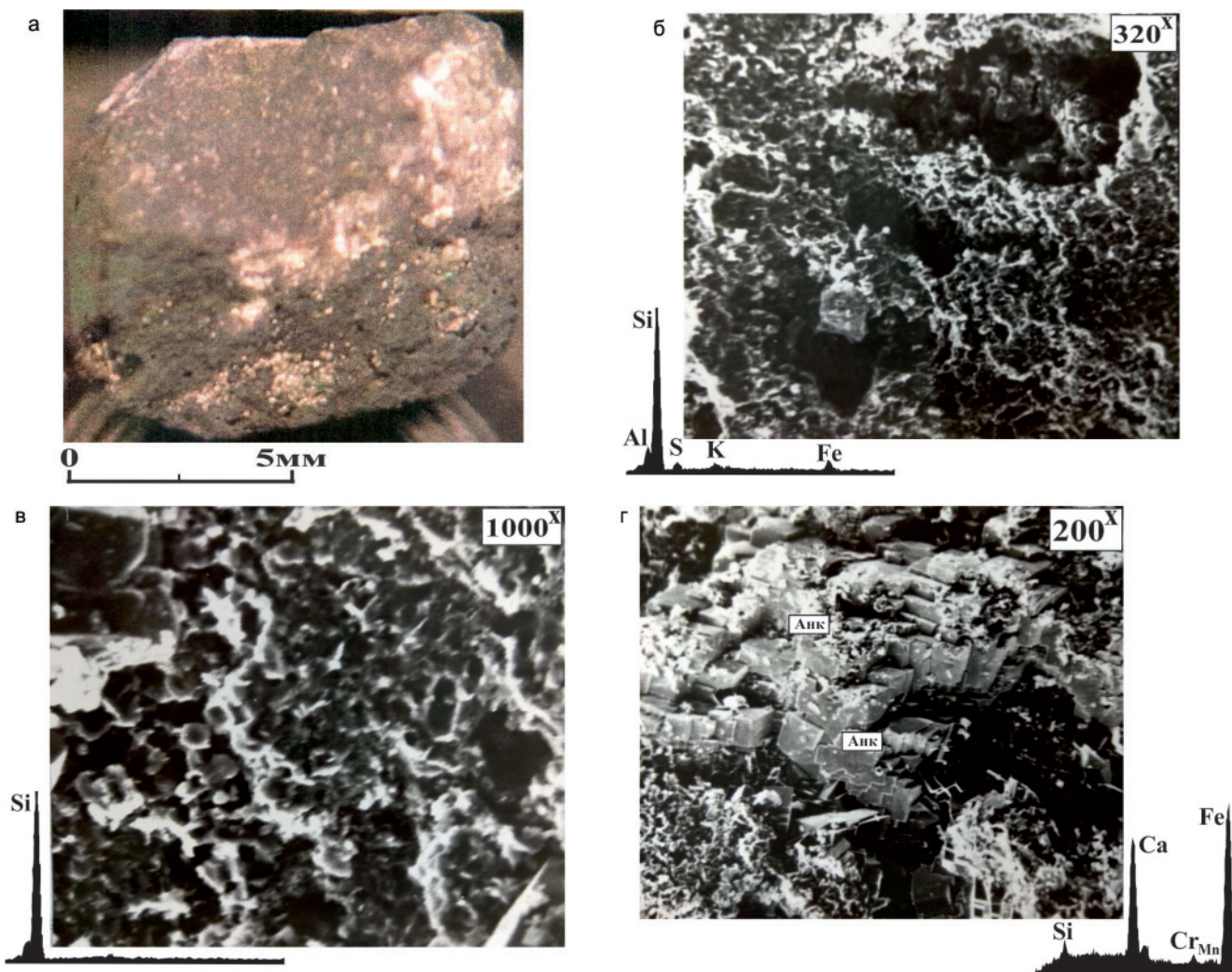


Рис. 8. Фотография КИ (а) и снимки РЭМ его поверхности (б–г) после воздействия на него ГФ ($T = 245\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\chi_{\text{CO}_2} = 0,34$ (серия СВ-2))

а – внешний вид образца после эксперимента; б – фрагмент с вторичными порами; в – еще более увеличенный участок его поверхности с многочисленными мелкими плохо ограниченными кристаллами Кв; г – агрегаты мелкокристаллического гидротермального Анк и его элементный спектр

КИ носила следы слабого выщелачивания, а цвет практически не изменился (см. рис. 9, в). Следует обратить внимание на то, что наиболее интенсивному выщелачиванию подверглись участки образца, сложенные Пи. Наблюдается интенсивное разложение Пи, входящего в его состав, и образование вторичных пустот за счет его растворения. Кроме того, первоначально массивный Пи превращается в серую землистую массу, сложенную кальцийсодержащим Сид. Над ними отмечаются вздутия, вследствие чего минеральная масса, покрывающая эти пиритовые зерна, поднимается над поверхностью образца, как в ранее рассмотренных экспериментах (см. рис. 7, а, б).

По данным РСА сравнительно с исходным составом поверхностной части образца после эксперимента Пи полностью исчез, концентрация Кц и Кв почти не изменилась.

Очень важно отметить, что в составе осадка встречены окись и закись меди, а также в небольшом количестве сульфиды меди и никеля.

После более низкотемпературного эксперимента поверхность образца носила следы очень слабого выщелачивания, а первоначальный цвет образца практически не изменился (см. рис. 9, г). По данным РСА на поверхности образца соотношение Кв и Кц сохранилось. Отмечается небольшое снижение доли Пи и резкое уменьшение содержания Дл. Кроме того, фиксируется присутствие Ам.кр.

По данным РСА в составе осадка, поднятого со дна автоклава после опыта, присутствуют Кц, Кв, миллерит, небольшое количество Сид, а также смесь Ам.кр.

Таким образом, несмотря на отсутствие в составе флюида воды, CO_2 , будучи полярным соединением, растворяет породообразующие минералы и осуществляет транспортировку слагающих их элементов с образованием новых фаз: Сид, сульфидов меди и никеля, Ам.кр, а в высокотемпературном эксперименте еще и куприта и тенорита. Неустойчивы в этих условиях Пи и Дл, которые разлагаются

в большей (при 410 °С) или меньшей (при 215 °С) степени.

Обсуждение полученных результатов

Необходимо отметить, что проводившиеся эксперименты с ГФ не вполне объективно отражали те же процессы в аналогичных природных условиях. Это объясняется следующими причинами.

Во-первых, эксперименты проводились в закрытой термодинамической системе и образующиеся в ней продукты различных реакций накапливались в ней, что рано или поздно приводило к насыщению ГФ растворенными компонентами, а значит, стабилизации системы и прекращению протекания в ней реакций. Напротив, природные процессы происходят в более или менее открытых системах, в которых существует возможность как поступления новых порций реагирующих компонентов, так и вывода части образующихся в ней продуктов реакций. Поэтому в природных условиях эти реакции протекают более полно и вызывают более значительные изменения или превращения содержащихся в ней минеральных фаз.

Во-вторых, в природных условиях реакции с участием ГФ протекают гораздо дольше, чем в лабораторных экспериментах, что позволяет формироваться равновесным минеральным ассоциациям, а слагающим их минералам – приобретать прекрасную кристаллическую огранку в отличие от тех же минералов, образующихся в экспериментах.

В-третьих, в автоклавах, в которых проводятся гидротермальные эксперименты, часто возникают так называемые конвекционные ячейки, благодаря которым осуществляется растворение минералов в одной части образцов и их переотложение (кристаллизация) в другой. В результате в первой происходит формирование вторичных пор, а во второй – кристаллов тех же минералов.

В-четвертых, в реакциях с участием ГФ различного состава в лабораторных условиях, к сожалению, почти всегда участвуют металлы, из которых сделан автоклав, что заметно искажает результаты экспериментов.

Кроме того, при охлаждении автоклавов от 200–400 °С из ГФ обязательно выделяются так называемые закалочные фазы, находившиеся в растворенном состоянии. Чаще всего они представлены Ам.кр, а также мелкими плохо ограненными кристаллами S^0 .

Учитывая все сказанное, попытаемся разобраться в процессах, протекавших в рассматриваемой системе с участием КИ.

Общим для всех экспериментов является преимущественное растворение карбонатов с поверхности образцов, вследствие чего происходит их окремнение. При насыщении ГФ карбонатами, особенно если в автоклаве возникла конвекционная ячейка, наблюдается их переотложение с возникновением хорошо ограненных гидротермальных

разновидностей (см. рис. 5, б, г, 6, а, 7, г). Из карбонатных минералов самый неустойчивый Дл: он полностью растворялся в ГФ во всех проводившихся экспериментах. Кроме того, Пи также во всех опытах подвергался частичному или полному растворению и/или псевдоморфному замещению железистыми карбонатами (см. таблицу, рис. 6, г, 7, а, б).

Кв, входящий в состав КИ, также растворяется ГФ, правда не так интенсивно, как карбонатные минералы, а в двух экспериментах биогенный кремнезем подвергся перекристаллизации с образованием мелких кристаллов Кв (см. рис. 4, г, 8, в). Находящийся в составе ГФ кремнезем при охлаждении автоклавов во всех опытах выделялся в аморфном виде и лишь в редких случаях в форме кристобалита.

Понятно, что в природных условиях, в отличие от лабораторных, охлаждение ГФ происходило очень медленно, поэтому находящийся в нем кремнезем успевал выкристаллизоваться в форме прекрасно ограненных мелких кристаллов (см. рис. 2, в–е).

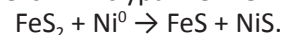
Очень часто после завершения экспериментов на поверхности образцов отмечается присутствие небольшого количества очень мелких кристаллов Анг, образование которых требует присутствия кислорода в составе ГФ. Можно предположить, что какая-то часть кислорода может попадать в реактор вместе с воздухом, который окисляет пиритную серу до серной кислоты, а она, в свою очередь, реагирует с Кц, давая в результате Анг (см. рис. 9, б). Не исключено также, что в высокотемпературных экспериментах, когда CO_2 проявляет свои окислительные свойства, она также могла окислять и Пи с последующим образованием Анг.

В рассмотренных экспериментах часто по Пи или за его счет образовывались железосодержащие карбонаты (см. рис. 4, б, 6, г, 7, а, б, 8, г, 9, б). В этом случае в ГФ появлялась сера, которая затем или связывалась в форме сульфидов, или выделялась в самородной форме (см. рис. 6, б).

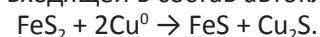
При взаимодействии КИ с ГФ, состоящим только из воды ($\chi_{CO_2} = 0$), отмечается образование фаз, возникновение которых требует протекания в системе окислительно-восстановительных реакций. В качестве окислителя может выступать сера, присутствующая в составе Пи в виде персульфида, которая окисляет металлы, например никель, входящие в состав автоклава, превращаясь в сульфидную форму:



Образование Пи и сульфида никеля также взаимосвязано и осуществляется за счет Пи, присутствующего в составе образцов КИ, и пиритовой шихты в соответствии с уравнением реакции



Аналогично реакция протекает с участием меди, также входящей в состав автоклава:



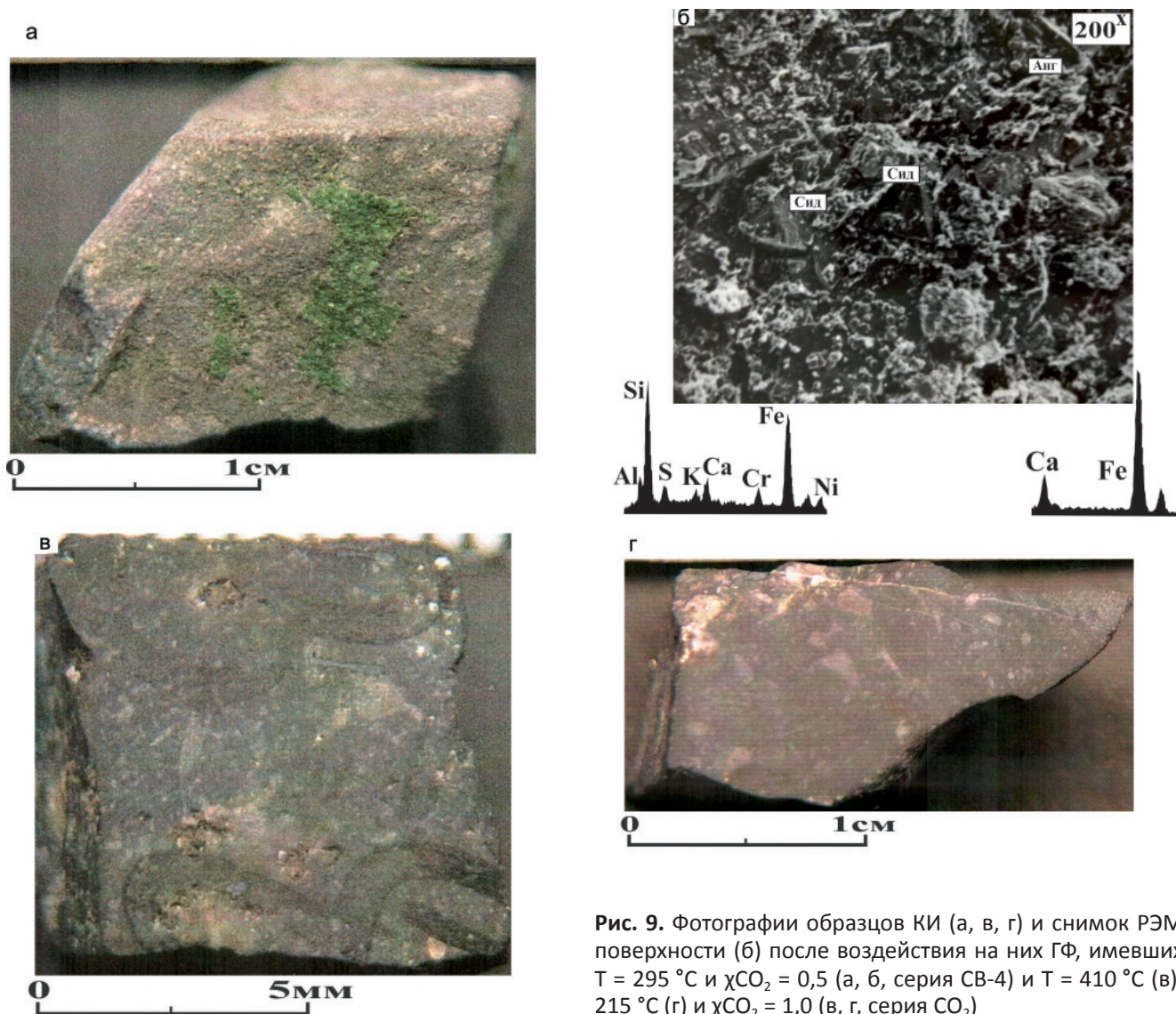


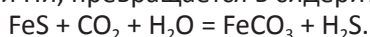
Рис. 9. Фотографии образцов КИ (а, в, г) и снимок РЭМ поверхности (б) после воздействия на них ГФ, имевших $T = 295\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $\chi\text{CO}_2 = 0,5$ (а, б, серия СВ-4) и $T = 410\text{ }^{\circ}\text{C}$ (в), $215\text{ }^{\circ}\text{C}$ (г) и $\chi\text{CO}_2 = 1,0$ (в, г, серия CO_2)

а – внешний вид образца после эксперимента; б – его выщелоченная микропористая и окремненная поверхность, на которой отложился гидротермальный кальцийсодержащий Сид в виде поликристаллических агрегатов и рассеянных мелких кристаллов (элементный спектр справа); в, г – внешний вид образцов после экспериментов

Возникновение S° происходит в результате превращения Пи в Пир в соответствии с уравнением реакции



Во многих проведенных экспериментах в системе $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ отмечается образование Пир, однако в составе ГС, возникших по КИ, он не был встречен, как, впрочем, и сам Пи [6, 7]. Можно предположить, что Пир, как и Пи в рассматриваемых гидротермальных условиях также неустойчив и является лишь промежуточной метастабильной фазой, которая затем, как и Пи, превращается в сидерит:

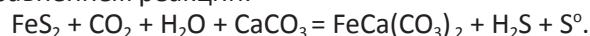


Из-за того что автоклав является закрытой системой, реакция может остановиться до полного превращения Пир в Сид из-за того, что для ее завершения не хватает CO_2 .

В ГС, встреченных в кровельной части ДК Западно-Сибирского бассейна, из полученных в рассмотренных экспериментах с участием ГФ мине-

ральных ассоциаций, присутствуют лишь мелкокристаллический Кв, Ил, Кт, изредка Анг и железосодержащие карбонаты, из которых преобладает Сид (см. рис. 2) [6, 7]. Следовательно, основная часть серы, освобождающейся при разложении Пи, присутствовавшего в составе КИ, выносилась гидротермами за пределы зон развития ГС в той или иной форме.

Образование железосодержащих карбонатов может происходить в соответствии со следующим уравнением реакции:



Неожиданные результаты были получены в высокотемпературных ($360\text{ }^{\circ}\text{C}$) экспериментах (серия 0.5-1), в которых при воздействии на образцы КИ ГФ с невысокой концентрацией в них CO_2 при разложении входящего в их состав Пи получались не железосодержащие карбонаты, а железистый или Mg-Fe Хл. При этом кроме Пи из состава КИ исчезал и Кт, который вместе с пиритным железом шел на образова-

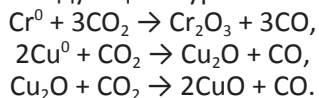
ние Хл. Напомним, что гидротермальный Хл в составе ГС полностью отсутствует [6, 7]. На основе установленного факта можно сделать два предположения:

1) температура природных ГФ была ниже 360 °С, а Сид устойчив, по крайней мере, до 315 °С (при этой температуре в серии СВ-3 отмечалось образование гидротермального Сид, а не Хл), т. е. фазовая граница между Хл и Сид + Кт лежит в интервале температур 315–360 °С;

2) установленная фазовая граница справедлива лишь для системы H_2O-CO_2 , а при других условиях, например рН или Eh, она может измениться.

Действительно, встреченные в кровельной части ДК гидротермальные силициты светло-серые, иногда почти белые (см. рис. 2), а образцы КИ после проведенных экспериментов с ГФ, имевших различную концентрацию в своем составе CO_2 , слабо изменяли цвет. Поскольку их темно-серая, почти черная окраска обусловлена присутствием в их составе ОВ, можно предположить, что в природных условиях, вероятно, в составе ГФ, воздействовавших на КИ, присутствовал O_2 , окислявший это ОВ.

В результате воздействия на образцы КИ высокотемпературных ГФ с высокой концентрацией в их составе CO_2 ($\chi_{CO_2} = 0,5$) на поверхности образца появлялись зеленые пленки окислов хрома (см. рис. 9, а), а при воздействии самого высокотемпературного флюида ($T = 410$ °С), состоящего только из CO_2 ($\chi_{CO_2} = 1,0$), отмечалось образование закиси и окиси меди. Из этих экспериментов следует, что CO_2 в высокотемпературных экспериментах является окислителем, так как других компонентов в составе флюида не было. Поэтому образование окиси хрома, а также закиси и окиси меди происходило в соответствии со следующими уравнениями реакций:



Хроматографический анализ газовой фазы, полученной в высокотемпературных экспериментах с CO_2 , подтвердил, что из нее в результате ее восстановления металлами образуется большое количество СО (рис. 10).

Тем не менее установленные (возможно, впервые) в гидротермальных экспериментах окислительные свойства CO_2 представляют большой интерес, поскольку СО в природных условиях может активно реагировать с водородом, который, как известно, поступает из фундамента вместе с ГФ [11, 12, 16] и в соответствии с процессом Фишера–Тропша в результате взаимодействия СО и H_2 образуются углеводороды.

В выполненных высокотемпературных экспериментах осветления образцов КИ не наблюдалось, но вполне вероятно, из-за того, что металлы в составе автоклавов являлись более активными восстановителями CO_2 , чем ОВ в составе КИ. В природных условиях таких восстановителей нет, поэтому можно предположить, что при достаточно высокой

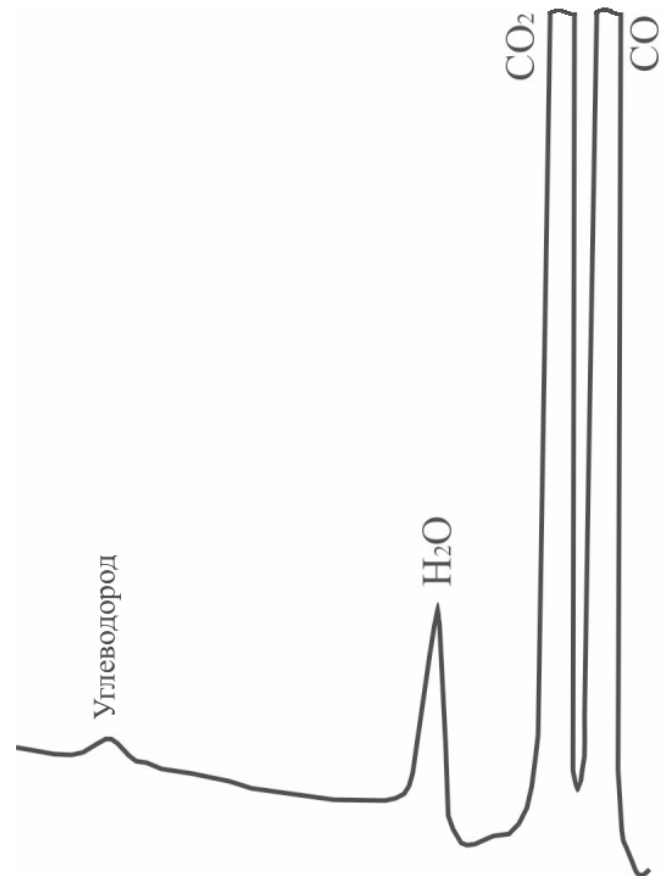


Рис. 10. Хроматограмма газовой фазы (детектор по теплопроводности), полученная после завершения эксперимента по воздействию на образец кремнистого известняка ГФ ($T = 275$ °С, $\chi_{CO_2} = 0,15$)

температуре и концентрации CO_2 она будет способна окислять и ОВ, присутствующее в составе КИ, осветляя их.

Наличие в КИ небольшого количества ОВ предполагает возможность генерации им УВ в результате воздействия на него ГФ. Чтобы проверить это предположение, в пробе газа, отобранного из автоклава после эксперимента, кроме H_2O , CO_2 и СО было определено содержание газообразных углеводородов. Оказалось, что газообразные УВ присутствуют в виде незначительной примеси (см. рис. 10). Это объясняется, во-первых, очень низким содержанием ОВ в составе КИ (в среднем немногим более 1 %) и, во-вторых, очень высокой степенью катагенетического преобразования КИ, побывавших на большой глубине и подвергавшихся высоким температурам и давлению. Потому ОВ в их составе практически полностью реализовало свой исходный нефтегазогенерационный потенциал.

Выводы

1. В системе H_2O-CO_2 при гидротермальном воздействии на образцы КИ происходит растворение карбонатов, входящих в их состав, и в первую очередь Дл.

2. Преимущественное растворение карбонатов приводит к окремнению поверхности образцов КИ,



формированию в них вторичной пористости, а в некоторых случаях даже перекристаллизации исходного биогенного кремнезема в мелкокристаллический Кв с различной степенью качества огранки образующихся кристаллов, чем они становятся очень похожими на природные ГС.

3. Пи также неустойчив в этих условиях и чаще всего замещается железосодержащими карбонатами при температурах до 315 °С.

4. При достаточно высокой температуре ГФ (360 °С и выше) Пи в составе КИ превращается не в железосодержащие карбонаты, которые присутствуют в составе ГС, а в Хл, при этом из состава КИ также исчезает Кт, который вместе с пиритным железом идет на образование гидротермального Хл. Поэтому встреченные в кровельной части ДК ГС, образующиеся по КИ в случае взаимодействия с ГФ, в составе которого содержится только CO₂, могли образоваться, если его температура была ниже 360 °С.

5. Даже при температуре флюида 410 °С в случае, если ГФ состоит только из CO₂, образование Хл не происходит, зато появляются железосодержащие карбонаты, что объясняется отсутствием воды, которая в форме OH⁻ входит в состав Хл.

6. При высоких температурах (275–410 °С) CO₂ начинает проявлять свойства *окислителя*, окисляя металлы, входящие в состав автоклава.

7. Вследствие высокой катагенетической преобразованности ОВ, входящего в состав КИ, они почти полностью потеряли исходный нефтегазогенерационный потенциал.

8. С целью уточнения солевого состава ГФ, а также их рН и Eh, необходимы дополнительные исследования, результаты которых будут рассмотрены в следующей публикации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Геологическое** строение и перспективы нефтегазоносности палеозойских отложений левобережья Енисея (Тыйская параметрическая скважина) / В. А. Каштанов, А. И. Варламов, В. П. Данилова и др. – Новосибирск: ОИГГиМ СО РАН, 1995. – 54 с.

2. **Геохимические критерии** прогноза нефтегазоносности палеозойских отложений юго-востока Западной Сибирской плиты / А. Э. Конторович, И. А. Олли, В. И. Биджаков и др. // Перспективы нефтегазоносности Западной Сибири. – Новосибирск: СНИИГГиМС, 1980. – С. 4–24.

3. **Геохимия** и генезис палеозойских нефтей Западной Сибири / А. Э. Конторович, В. П. Данилова, Е. А. Костырева и др. // Геохимия. – 1998. – № 1. – С. 3–17.

4. **Закономерности** размещения залежей нефти и газа в фундаменте Западно-Сибирской плиты / В. С. Сурков, Л. В. Смирнов, А. Е. Еханин и др. // Нефтегазоносность фундамента осадочных бассейнов. – М.: Недра, 2002. – С. 132–143.

5. **Запивалов Н. П., Плуман И. И.** Геолого-геохимические предпосылки открытия залежей нефти

и газа в палеозое юга Западной Сибири // Проблемы геологии и нефтегазоносности доюрских отложений Западно-Сибирской плиты. – Новосибирск: СНИИГГиМС, 1977. – С. 39–45.

6. **Зубков М. Ю.** Вторичные коллекторы тектоно-гидротермального происхождения в кровельной части доюрского комплекса Западно-Сибирской плиты и способы их прогноза // Геология нефти и газа. – 2015. – № 6. – С. 78–95.

7. **Зубков М. Ю.** Гидротермальные силициты – перспективный нефтегазопоисковый объект доюрского фундамента Западно-Сибирской плиты // Геология и нефтегазоносность нижних горизонтов чехла Западно-Сибирской плиты. – Новосибирск, 1990. – С. 87–101.

8. **Зубков М. Ю., Васильев О. Е.** Перспективы нефтегазоносности доюрского комплекса Шаимского района // Геология и нефтегазоносность триас-среднеюрских отложений Западной Сибири. – Новосибирск: СНИИГГиМС, 1991. – С. 124–137.

9. **Зубков М. Ю., Шведенков Г. Ю.** Экспериментальное моделирование процесса формирования вторичных коллекторов под действием гидротермальных флюидов различного состава // Пути реализации нефтегазового потенциала ХМАО (Пятая науч.-практ. конф.). В 2 т. Т. I. – Ханты-Мансийск, 2002. – С. 323–332.

10. **Клещев К. А., Шеин В. С.** Перспективы нефтегазоносности фундамента Западной Сибири. – М.: ВНИГНИ, 2004. – 214 с.

11. **Мархинин Е. К.** Вулканы и жизнь. – М.: Мысль, 1980. – 198 с.

12. **Набоко С. И.** Формирование современных гидротерм и метаморфизм растворов и пород // Вопросы вулканизма. – М.: Изд. АН СССР, 1962. – С. 52–62.

13. **Об источнике** нефтей, обнаруженных в коре выветривания и кровле палеозойского фундамента на площадях Среднего Приобья / Н. В. Лопатин, Т. П. Емец, О. Н. Симоненкова и др. // Геология, геофизика и разработка нефтяных месторождений. – 1997. – № 7. – С. 7–22.

14. **Патент** на изобретение № 2085975 «Способ прогнозирования зон развития вторичных коллекторов в фундаменте» / М. Ю. Зубков. – Приоритет от 12.06.1994 г.

15. **Погорелов Б. С.** Геология и нефтегазоносность доюрских образований запада Западной Сибири. – М.: Наука, 1977. – 85 с.

16. **Соколов В. А.** Геохимия природных газов. – М.: Недра, 1971. – 336 с.

17. **Справочник** физических констант горных пород / под ред. С. Кларка-мл. – М.: Мир, 1969. – 544 с.

18. **Трушков П. А., Фомичев А. С.** Катагенез органического вещества доюрского комплекса юго-восточной части Западно-Сибирской плиты // Тр. СНИИГГиМС. – 1976. – Вып. 231. – С. 107–110.

19. **Фомин А. Н.** Катагенез органического вещества и нефтегазоносность мезозойских и палео-



зойских отложений Западно-Сибирского мегабассейна. – Новосибирск: ИИГГ СО РАН, 2011. – 332 с.

REFERENCES

1. Kashtanov V.A., Varlamov A.I., Danilova V.P., et al. *Geologicheskoye stroeniye i perspektivy neftegazonosnosti paleozoyskikh otlozheniy levoberezh'ya Yeniseya (Tyyskaya parametricheskaya skvazhina)* [Geological structure and prospects of oil and gas potential of Paleozoic deposits on the Yenisei left bank (Tyyskaya parametric well)]. Novosibirsk, OIGGM SB RAS Publ., 1995. 54 p. (In Russ.).

2. Kontorovich A.E., Olli I.A., Bidzhakov V.I., et al. [Geochemical criteria for predicting the oil and gas content of the Paleozoic deposits in the southeast of the West-Siberian plate]. *Perspektivy neftegazonosnosti Zapadnoy Sibiri* [Oil and gas potential of Western Siberia]. Novosibirsk: SNIIGGiMS Publ., 1980, pp. 4–24. (In Russ.).

3. Kontorovich A.E., Danilova V.P., Kostyreva E.A., et al. [Geochemistry and genesis of Paleozoic oils of West Siberia]. *Geokhimiya*, 1998, no. 1, pp. 3–17. (In Russ.).

4. Surkov V.S., Smirnov L.V., Ekhanin A.E., et al. [Regularities of the location of oil and gas pools in the basement of the West-Siberian plate]. *Neftegazonosnost fundamenta osadochnykh basseynov* [Oil and gas content in the basement of sedimentary basins]. Moscow, Nedra Publ., 2002, pp. 132–143. (In Russ.).

5. Zapivalov N.P., Pluman I.I. [Geological and geochemical prerequisites for the discovery of oil and gas pools in the Paleozoic of the southern West Siberia]. *Problemy geologii i neftegazonosnosti doyruskikh otlozheniy Zapadno-Sibirskoy plity* [Problems of geology and oil and gas content of pre-Jurassic deposits of the West Siberian plate]. Novosibirsk, SNIIGGiMS Publ., 1977, pp. 39–45. (In Russ.).

6. Zubkov M.Yu. *Vtorichnye kollektory tektonogidrotermal'nogo proiskhozhdeniya v krovel'noy chasti doyruskogo kompleksa Zapadno-Sibirskoy plity i sposoby ikh prognoza* [Secondary reservoirs of tectonic-hydrothermal origin in the roof of the Pre-Jurassic complex in the West Siberian plate and its forecast methods]. *Geologiya nefti i gaza – Oil and gas geology*, 2015, no. 6, pp. 78–95. (In Russ.).

7. Zubkov M. Yu. [Hydrothermal silicites are a promising oil and gas prospecting target of the Pre-Jurassic basement of the West Siberian plate]. *Geologiya i neftegazonosnost nizhnikh gorizontov chekhla Zapadno-Sibirskoy plity* [Geology and oil and gas presence in the lower horizons of the cover of the West Siberian plate]. Novosibirsk, SNIIGGiMS Publ., 1990, pp. 87–101. (In Russ.).

8. Zubkov M.Yu., Vasilyev O.E. [Prospects for oil and gas potential of the Pre-Jurassic complex of the Shaimsk Region]. *Geologiya i neftegazonosnost trias-sredneyurskikh otlozheniy Zapadnoy Sibiri* [Geology and

oil and gas presence in the Triassic–Middle Jurassic deposits of West Siberia]. Novosibirsk, SNIIGGiMS Publ., 1991, pp. 124–137. (In Russ.).

9. Zubkov M.Yu., Shvedenkov G.Yu. [Experimental modelling of the formation of secondary reservoirs under the influence of hydrothermal fluids of various compositions]. *Puti realizatsii neftegazovogo potentsiala KHMAO» (Pyataya nauchno-prakticheskaya konferentsiya) v dvukh tomakh, tom I* [Ways of realizing the oil and gas potential of the Khanty-Mansi Autonomous Okrug. Proc. Fifth Scientific and Practical Conference. In 2 volumes, vol. I]. Khanty-Mansiysk, 2002, pp. 323–332. (In Russ.).

10. Kleshchev K.A., Shein V.S. *Perspektivy neftegazonosnosti fundamenta Zapadnoy Sibiri* [Prospects of oil and gas presence in the basement of West Siberia]. Moscow, VNIGNI Publ., 2004. 214 p. (In Russ.).

11. Markhinin Ye.K. *Vulkany i zhizn* [Volcanoes and life]. Moscow, Mysl Publ., 1980. 198 p. (In Russ.).

12. Naboko S.I. [Formation of modern hydrothermal fluids and metamorphism of solutions and rocks]. *Voprosy vulkanizma* [Problems of volcanism]. Moscow, AS USSR Publ., 1962, pp. 52–62. (In Russ.).

13. Lopatin N.V., Yemets T.P., Simonenkova O.N., et al. [On the oil source found in the weathering crust and roof of the Paleozoic basement in the areas of the Middle Ob]. *Geologiya, geofizika i razrabotka neftyanykh mestorozhdeniy*, 1997, no. 7, pp. 7–22. (In Russ.).

14. Zubkov M.Yu. *Sposob prognozirovaniya zon razvitiya vtorichnykh kollektorov v fundamente* [The way to predict development zones of secondary reservoirs in the basement]. Patent RF, no. 2085975. 1994. (In Russ.).

15. Pogorelov B.S. *Geologiya i neftegazonosnost doyruskikh obrazovaniy zapada Zapadnoy Sibiri* [Geology and petroleum potential of the Pre-Jurassic formations in the western West Siberia]. Moscow, Nauka Publ., 1977. 85 p. (In Russ.).

16. Sokolov V.A. *Geokhimiya prirodnykh gazov* [Geochemistry of natural gases]. Moscow, Nedra Publ., 1971. 336 p. (In Russ.).

17. Clark S., Jr., ed. *Spravochnik fizicheskikh konstant gornykh porod* [Reference book of physical constants of rocks]. Moscow, Mir Publ., 1969. 544 p. (In Russ.).

18. Trushkov P.A., Fomichev A.S. [Catagenesis of organic matter in the Pre-Jurassic complex of the southeastern West-Siberian plate]. *Tr. SNIIGGiMS* [Proc. SNIIGGiMS]. Novosibirsk, 1976, issue 231, pp. 107–110. (In Russ.).

19. Fomin A.N. *Katagenez organicheskogo veshchestva i neftegazonosnost mezozoyskikh i paleozoyskikh otlozheniy Zapadno-Sibirskogo megabasseyna* [Catagenesis of organic matter and oil and gas content of the Mesozoic and Paleozoic sediments of the West Siberian megabasin]. Novosibirsk, IPGG SB RAS Publ., 2011. 332 p. (In Russ.).