

УДК 551.73:553

А.В. Краснова¹, Ю.В. Ростовцева², А.Е. Гаврилов³

ИЗОТОПНЫЙ СОСТАВ УГЛЕРОДА И КИСЛОРОДА ВТОРИЧНЫХ КАРБОНАТОВ В ВУЛКАНИТАХ ДОЮРСКОГО КОМПЛЕКСА ЗАПАДНО-СИБИРСКОЙ ПЛИТЫ

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»,
119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, 1

ООО «Газпромнефть НТЦ». 190000, Санкт-Петербург, наб. реки Мойки, д. 75–79, литер Д

Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geology. 119991, Moscow, GSP-1, Leninskiye Gory, 1

Gazpromneft STC, 190000, St. Petersburg, nab. River Moika, d. 75–79, let. D

Изучен изотопный состав углерода и кислорода вторичных карбонатов из кислых эффузивов в кровле доюрского комплекса Западно-Сибирской плиты (Томская область). Значения $\delta^{13}\text{C}$ (VPDB) и $\delta^{18}\text{O}$ (VSMOW) сидерита изменяются от $-6,6$ до $-2,4\text{‰}$ и от $7,8$ до $12,3\text{‰}$, кальцита — от $-8,9$ до $-8,4\text{‰}$ и от $2,5$ до $3,7\text{‰}$ соответственно. Облегченный изотопный состав кислорода указывает на образование изучаемых карбонатов из низко-среднетемпературных гидротермальных растворов.

Ключевые слова: Западная Сибирь, доюрский комплекс, эффузивы, вторичные карбонаты, изотопные исследования.

The carbon and oxygen isotopic composition of secondary carbonates from acidic effusives was investigated. $\delta^{13}\text{C}$ (VPDB) and $\delta^{18}\text{O}$ (VSMOW) values of siderite vary from $-6,6$ to $-2,4\text{‰}$ in the top of the Western Siberia pre-Jurassic complex (Tomsk Region) and from $7,8$ to $12,3\text{‰}$, while $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ values of calcite vary from $-8,9$ to $-8,4\text{‰}$ and from $2,5$ to $3,7\text{‰}$ respectively. Light oxygen isotopic composition indicates formation of studied carbonates from heated hydrothermal solutions.

Key words: Western Siberia, pre-Jurassic complex, effusives, secondary carbonates, isotope analysis.

Введение. Нефтегазоносность пород доюрского комплекса Западно-Сибирской плиты изучают уже несколько десятилетий [Шустер, 2010]. В связи с постепенным истощением запасов нефти и газа в отложениях мезозойско-кайнозойского осадочного чехла эти исследования представляются весьма актуальными. При этом особый интерес вызывает выявление нетрадиционных пород-коллекторов, к числу которых относятся вулканиды. Формирование коллекторов в вулканидах может происходить под влиянием ряда факторов: остывания магмы, тектонического воздействия, гидротермальной переработки, выветривания и др. Свойства коллекторов в таких породах во многих случаях связаны с вторичными изменениями. Карбонатизация — эпигенетическое преобразование, которое наблюдается довольно часто и приводит к ухудшению коллекторских свойств. Широкий диапазон условий формирования вторичных карбонатов затрудняет выявление их генезиса. Изучение процессов карбонатизации важно для эффективного проведения геолого-разведочных работ.

Целью нашей работы стало определение особенностей образования вторичных карбонатов, обнаруженных в кислых вулканидах-коллекторах, присутствующих в кровельной части доюрского комплекса Западно-Сибирской плиты.

Объект исследования. Изучены вторичные карбонаты в сильноизмененных кислых вулканидах (риолитах), вскрытых в кровле доюрского комплекса Западно-Сибирской плиты одной из разведочных скважин в Томской области. Рассматриваемые вулканиды несут следы выщелачивания, в них широко развиты вторичные образования кварца, слюдистых минералов, кальцита, сидерита, местами сочетающиеся с выделениями диоксида титана и фосфатов редкоземельных элементов (РЗЭ). Породы характеризуются трещиноватостью. Трещины в породах полые, частично открытые или заполнены преимущественно кварцем и/или карбонатными минералами.

Методы исследования. Вторичные преобразования вулканидов, включая карбонатизацию, изучали с помощью оптической (в шлифах) и электронной микроскопии (комплекс «Jeol JSM

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра нефтегазовой седиментологии и морской геологии, аспирант; e-mail: boxannak@gmail.com

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра нефтегазовой седиментологии и морской геологии, заведующая кафедрой, докт. геол.-минер. н.; e-mail: rostovtseva@list.ru

³ ООО «Газпромнефть НТЦ», главный специалист отдела ОПР; e-mail: Gavrilov.AE@gazpromneft-ntc.ru

6480LV»). Проведены также микрозондовые исследования, выполнены рентгено-структурный (дифрактометр «MiniFlex 600») и изотопный анализы. Изучение стабильных изотопов С и О в карбонатах проводили на комплексе оборудования для анализа стабильных изотопов легких элементов «Delta V Advantage». Измельченные образцы подвергались обработке полифосфорной кислотой на линии пробоподготовки «Gas Bench II», подключенной непосредственно к масс-спектрометру. Анализировали состав стабильных изотопов углерода ($\delta^{13}\text{C}$) и кислорода ($\delta^{18}\text{O}$) углекислого газа, выделившегося в результате реакции карбонатов с кислотой. Точность измерений контролировалась по международному стандарту NBS-19. Изотопные значения $\delta^{13}\text{C}$ указаны в ‰ относительно VPDB, значения $\delta^{18}\text{O}$ — в ‰ относительно VSMOW. Анализы выполнены в научных лабораториях кафедр нефтегазовой седиментологии и морской геологии, геологии и геохимии горючих ископаемых, петрологии геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

Температуру осаждения карбонатов рассчитывали с использованием изотопного калькулятора [Beaudoin, Therrien, 2009].

Результаты исследований и их обсуждение. Вторичные карбонаты представлены выделениями кальцита и сидерита, которые встречаются как в прожилках и частично открытых трещинах, так и в основной массе измененных риолитов (рис. 1, а, б). Их развитие в некоторых местах накладывается на другие вторичные изменения вулканитов, такие, как глинизация, окварцевание и растворение под давлением с образованием «зубчатых швов» (стилолитов). Кальцит встречается в виде спаритовых выделений и пойкилобластов (до 7–12 мм),

замещающих крупные участки породы (рис. 1, а). Кристаллы кальцита размером до 3–4 мм залечивают трещины. Сидерит представлен мелко- и среднезернистыми агрегатами. Встречаются сферолитовые образования сидерита (до 0,5 мм), иногда с битумными примазками (рис. 1, а, б). На участках интенсивной карбонатизации породы обнаружены сростки шестоватых кристаллов сидерита (длина до 1,2 мм) (рис. 1, а).

В ходе исследований установлено, что при совместном нахождении карбонатных минералов сидерит формировался позднее кальцита. По данным микрозондового анализа выявлено, что сидерит содержит Mg и Mn в разной концентрации. Содержание Mg в сидерите может достигать 7,28%, Mn — до 1,59%. Минералы диоксида титана и фосфатов редкоземельных элементов часто находятся в парагенезе с карбонатами (рис. 1, в, г). Их осаждение происходило позднее, чем железистых карбонатов, учитывая характер взаимоотношения кристаллических выделений.

В целях изучения изотопного состава углерода и кислорода вторичных карбонатов было проанализировано 9 проб из разных частей разреза, отобранных из тонких прожилков и основной массы измененных вулканитов. В результате исследований установлено, что кальцит характеризуется следующими значениями: $\delta^{13}\text{C} = -8,9$ и $-8,4$ ‰ и $\delta^{18}\text{O} = 3,7$ и $2,5$ ‰.

Значения $\delta^{13}\text{C}$ и $\delta^{18}\text{O}$ сидерита варьируют от $-6,6$ до $-2,4$ ‰ и от $7,8$ до $12,3$ ‰ соответственно. Результаты анализа изотопного состава углерода и кислорода вторичных карбонатов в изучаемых риолитах представлены в табл. 1.

Таблица 1

Изотопный состав углерода и кислорода изучаемых вторичных карбонатов, ‰

№ п/п	Глубина отбора, м	$\delta^{13}\text{C}$, ‰ VPDB	$\delta^{18}\text{O}$, ‰ VPDB	$\delta^{18}\text{O}$, ‰ VSMOW
Кальцит из крупного прожилка вулканитов				
1	2961,06	-8,9	-26,4	3,7
2	2961,06	-8,4	-27,5	2,5
Сидерит из прожилков и основной массы вулканитов				
3	2950,07	-3,2	-19,7	10,6
4	2953,19	-5,5	-22,5	7,8
5	2953,25	-2,4	-19,4	11,0
6	2957,50	-6,4	-18,0	12,3
7	2961,06	-4,7	-20,7	9,6
8	2961,06	-5,6	-20,1	10,2
9	2964,20	-6,6	-21,0	9,2

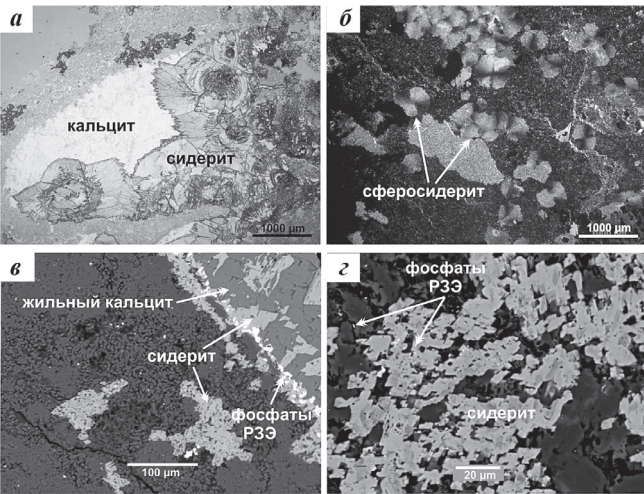


Рис. 1. Вторичные карбонаты в изучаемых вулканитах: а–б — микрофото без и с анализатором соответственно: пойкилобласты кальцита и шестоватые кристаллы сидерита в основной массе риолита (а), сферолитовые выделения сидерита (б); в–г — электронно-микроскопические снимки: трещина, залеченная кальцитом с более поздними выделениями сидерита и фосфатов РЗЭ и сидерит в основной массе породы (в), сидерит с фосфатами РЗЭ в основной массе породы (г)

Величины $\delta^{13}\text{C}$ и $\delta^{18}\text{O}$, полученные при анализе исследуемых карбонатов, были нанесены на сводные диаграммы с полями изотопных составов пород разного происхождения (рис. 2, 3). Изучаемые вторичные карбонаты характеризуются зна-

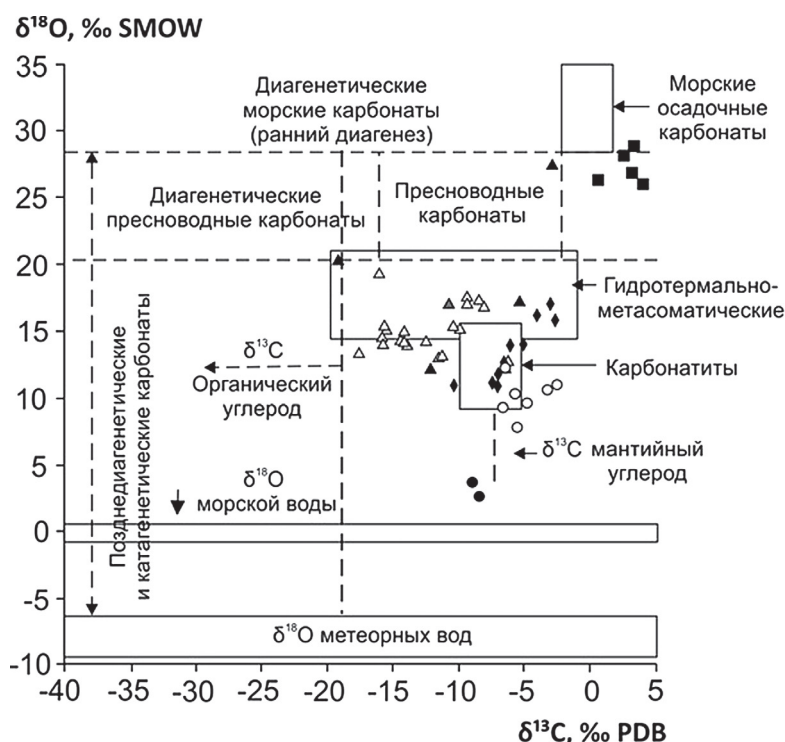


Рис. 2. Изотопный состав кислорода и углерода карбонатов разного генезиса (принципиальная схема по [Кулешов, 2001]): 1 — кальцит из прожилков в изучаемых вулканитах; 2 — сидерит из прожилков и основной массы в изучаемых вулканитах; 3 — жильный кальцит абалакской свиты, по [Юрченко, 2017]; 4 — жильный кальцит тюменской свиты (неопубликованные данные); 5 — жильный кальцит баженовской свиты, по [Юрченко, 2017]; 6 — юрские эпигенетические карбонаты из песчаников Мыльджинской площади, по [Голышев и др., 1981]; 7 — палеозойские морские известняки Лугинецкой площади, по [Голышев и др., 1981]

чениями $\delta^{13}\text{C}$, свойственными карбонатам разного генезиса, и отличаются облегченными величинами $\delta^{18}\text{O}$. На сводных диаграммах их изотопный состав наиболее сходен с таковым для магматических карбонатитов.

По сравнению с жильным кальцитом из мезозойских отложений тюменской, абалакской и

баженовской свит в центральной части Западно-Сибирской плиты, а также с эпигенетическим карбонатным цементом из юрских песчаников на соседней Мыльджинской площади изучаемые карбонаты имеют более легкий изотопный состав по кислороду, что может быть связано с более высокой температурой их осаждения (рис. 3).

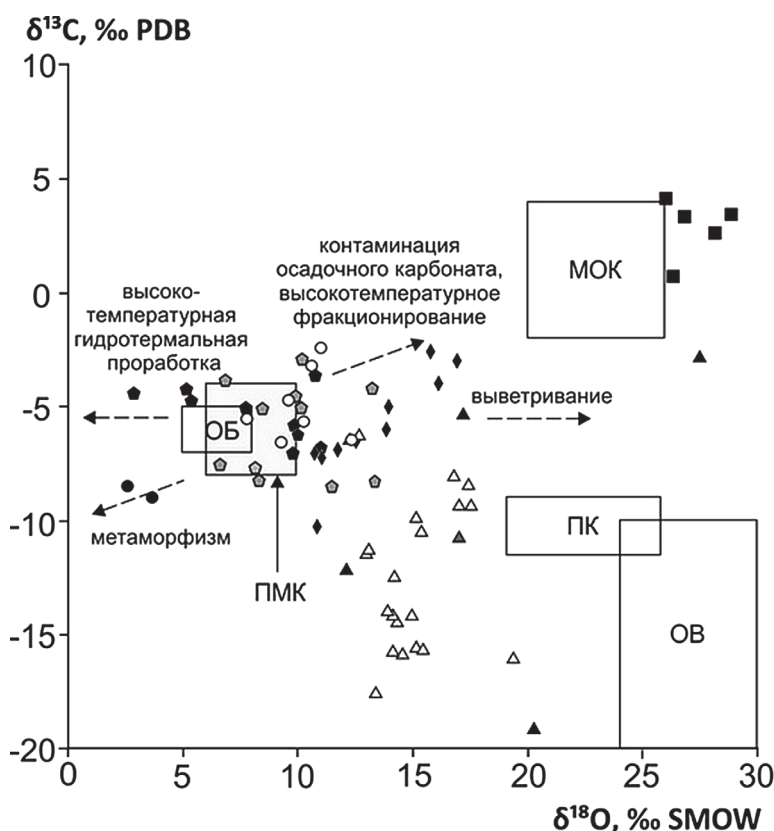


Рис. 3. Изотопный состав кислорода и углерода карбонатов разного генезиса: 1 — кальцит из прожилков в изучаемых вулканитах; 2 — сидерит из прожилков и основной массы в изучаемых вулканитах; 3 — жильный кальцит абалакской свиты, по [Юрченко, 2017]; 4 — жильный кальцит тюменской свиты (неопубликованные данные); 5 — жильный кальцит баженовской свиты, по [Юрченко, 2017]; 6 — юрские эпигенетические карбонаты из песчаников Мыльджинской площади, по [Голышев и др., 1981]; 7 — палеозойские морские известняки Лугинецкой площади, по [Голышев и др., 1981]; 8 — карбонаты из магматических и метаморфических пород зоны деформации разлома Сан-Габриэль (Калифорния), по [Pili et al., 2002]; 9 — жильные кальциты Мутновской гидротермальной системы, по [Таран и др., 1987]. Сплошные линии — поля: МОК — морских осадочных карбонатов, по [Valley, 1986]; ПК — почвенных карбонатов, по [Salomons, 1975]; ОБ — органического вещества осадочных пород, по [Hu et al., 2002]; ПМК — первичных магматических карбонатитов, по [Keller, Hoefs, 1995]; ОБ — мантийных океанических базальтов, по [Keller, Hoefs, 1995]; пунктирные стрелки — основные процессы, ответственные за изменения изотопного состава пород: тренд метаморфизма, по [Valley, 1986], тренд высокотемпературной гидротермальной проработки, выветривания, смешения с веществом осадочных карбонатов и высокотемпературного фракционирования, по [Demény et al., 1998]

тренды высокотемпературной гидротермальной проработки, выветривания, смешения с веществом осадочных карбонатов и высокотемпературного фракционирования, по [Demény et al., 1998]

Отметим, что генезис части жильного кальцита из осадочных пород мезозойско-кайнозойского чехла Западно-Сибирской плиты с величинами $\delta^{18}\text{O}=12,3\div 19,4\text{‰}$ интерпретируется как катагенетический, происходивший при влиянии глубинных гидротермальных растворов, прогретых до $192\text{ }^{\circ}\text{C}$ [Юрченко, 2017].

Наблюдается четкая зависимость установленных величин $\delta^{13}\text{C}$ и $\delta^{18}\text{O}$ от минерального состава карбонатов. Кальцит характеризуется более легким изотопным составом углерода и кислорода, чем сидерит. Обогащенность сидерита ^{18}O , а также установленная последовательность его осаждения после кальцита при их совместном нахождении указывают на возможное влияние температурного фактора на особенности формирования карбонатов. Вероятно, кальцит отлагался при интенсивном водопритоке и при более высокой температуре, чем сидерит. Снижение температуры раствора могло сопровождаться незначительным увеличением концентрации CO_2 и уменьшением щелочности вод.

В изучаемых вулканитах наличие газово-жидких включений в продуктах вторичных преобразований, позволяющих оценивать прогретость и состав растворов, обнаружить не удалось. В связи с этим расчет возможных значений палеотемпературы кристаллизации вторичных карбонатов выполнен на основе ранее опубликованных данных об изотопном составе глубинных вод, циркулирующих в рассматриваемой области Западно-Сибирского нефтегазоносного бассейна. Подземные воды доюрского комплекса в юго-восточной части Западно-Сибирского нефтегазоносного бассейна характеризуются изменчивостью изотопного состава кислорода, значения которого варьируют от $-14,4$ до $-2,5\text{‰}$ для непродуктивных и от $-8,9$ до $-2,7\text{‰}$ для продуктивных площадей [Голышев, Иванов, 1983]. Температура вод достигает

$88\text{--}120\text{ }^{\circ}\text{C}$, минерализация в основном составляет $40\text{--}65\text{ г/л}$ (Нюрольская впадина, Томская область) [Шварцев и др., 2002].

Температура осаждения рассматриваемых карбонатов рассчитана по формулам изотопного фракционирования кислорода в системе кальцит — H_2O и сидерит — H_2O для $T=0\div 1200\text{ }^{\circ}\text{C}$, по [Zheng, 1999]. Полученные значения температуры осаждения изменяются от 99 до $330\text{ }^{\circ}\text{C}$ для кальцита и от 56 до $211\text{ }^{\circ}\text{C}$ для сидерита (табл. 2). Для продуктивных площадей возможные значения температуры кристаллизации варьируют в более узких пределах с наиболее высокими значениями для кальцита $321\text{ }^{\circ}\text{C}$ и сидерита $207\text{ }^{\circ}\text{C}$. На основании полученных данных можно предположить, что изучаемые вторичные карбонаты осаждались низко-среднетемпературными гидротермальными растворами, причем осаждение сидерита происходило позднее, чем кальцита, при остывании раствора и повышении парциального давления углекислоты.

В результате петрографического изучения описываемых карбонатов установлено, что они формировались в толщах, погруженных на глубину, а не в поверхностных условиях при гипергенезе. На это указывает расположение карбонатных минералов поверх минералов кремнезема, залечивающих трещины, а также наличие «зубчатых швов» (стилолитов), развитых в основной массе эффузивов и образовавшихся при растворении под давлением. Кроме того, обнаружено замещение вулканитов крупными пойкилообластами кальцита, формирование которых отмечено в современных активных гидротермальных системах преимущественно на глубине за счет взаимодействия насыщенного CO_2 раствора с вмещающими породами при значениях температуры, предшествующих вскипанию [Simmons, Christenson, 1994].

Таблица 2

Расчетные значения температуры осаждения изучаемых вторичных карбонатов

№ п/п	Глубина отбора, м	$\delta^{18}\text{O}_{\text{мин}}$, ‰VSMOW	Расчетная температура осаждения карбонатов, °C			
			для непродуктивных площадей*		для продуктивных площадей*	
			$\delta^{18}\text{O H}_2\text{O} = -14,4$	$\delta^{18}\text{O H}_2\text{O} = -2,5$	$\delta^{18}\text{O H}_2\text{O} = -8,9$	$\delta^{18}\text{O H}_2\text{O} = -2,7$
Кальцит из крупного прожилка вулканитов						
1	2961,06	3,7	99	286	156	279
2	2961,06	2,5	109	330	172	321
Сидерит из прожилков и основной массы вулканитов						
3	2950,07	10,6	65	167	102	165
4	2953,19	7,8	82	211	126	207
5	2953,25	11,0	63	162	99	159
6	2957,50	12,3	56	146	89	144
7	2961,06	9,6	71	181	110	178
8	2961,06	10,2	68	173	105	170
9	2964,20	9,2	74	187	114	184

* Значения $\delta^{18}\text{O}$ для подземных вод из доюрского комплекса в юго-восточной части Западно-Сибирского нефтегазоносного бассейна, по [Голышев, Иванов, 1983].

Изотопный состав карбонатов позволяет рассматривать их как продукт осаждения из прогретых растворов.

Эти растворы могли быть подземными водами нижнего этажа артезианского бассейна, отжатыми из осадочных пород в процессе их преобразования, метаморфизованными и мигрирующими в вышележащие отложения, что в целом согласуется с общими представлениями. Однако можно предположить, что пластовые воды могли также иметь смешанный состав за счет участия магматогенных процессов.

В пользу последнего высказывания свидетельствует то, что по значениям $\delta^{13}\text{C}$ и $\delta^{18}\text{O}$ изучаемые карбонаты, особенно кальцит, отличаются от большей части изотопных составов первичных и эпигенетических мезозойско-кайнозойских и палеозойских карбонатов рассматриваемого района (рис. 2, 3). При этом наблюдается сходство изотопных характеристик изучаемых карбонатов и жильных карбонатов современной Мутновской гидротермальной системы Камчатки [Таран и др., 1987] и глубинной зоны деформации разлома Сан-Андреас в Калифорнии [Pili et al., 2011], формирование которых происходило при влиянии магматогенных флюидов. В пользу мнения о возможном участии в той или иной мере магматогенной составляющей свидетельствует и тектоническое строение района исследования, расположенного в зоне простиражения южной части Колтогорско-Уренгойского грабен-рифта, характеризующегося развитием гранитных

интрузий, одна из которых была вскрыта бурением на расстоянии 2–3 км от изучаемой скважины. Как известно, остывающие интрузии — потенциальный источник газодонных флюидов, включающих воду и углекислый газ [Giggenbach, 1997]. Хотя возраст гранитных батолитов в изучаемом районе оценивается как позднепалеозойский [Запивалов, Исаев, 2010], этапы повторной тектоно-магматической активизации региона в мезозое и кайнозое могли способствовать вертикальной миграции гидротермальных растворов по зонам крупных разломов. О поднятии вод из фундамента и подтоке глубинной углекислоты на юго-востоке Западной Сибири ранее упоминалось в гидрогеологических исследованиях Западно-Сибирского артезианского бассейна [Розин, 1977].

Заключение. Полученные результаты указывают на гидротермально-метасоматическое происхождение описанных вторичных карбонатов. Изотопный состав $\delta^{13}\text{C}$ и $\delta^{18}\text{O}$ изученных кальцитов и сидеритов свидетельствует о том, что они формировались при миграции низко-среднетемпературных растворов. Признаки гипергенных карбонатов, которые могли образоваться в коре выветривания на предъюрской поверхности, не обнаружены. При гидротермальной проработке осаждение карбонатов приводило к ухудшению коллекторских свойств рассматриваемых пород.

Благодарности. Авторы выражают искреннюю признательность ООО «Газпромнефть-Восток» за предоставленные первичные материалы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Голышев С.И., Иванов В.Г. Изотопный состав водород, кислорода, углерода подземных вод юго-восточной части Западно-Сибирского нефтегазоносного бассейна // Геохимия. 1983. № 7. С. 1024–1028.

Голышев С.И., Черепнин А.В., Рожнев А.Н. Изотопный состав углерода и кислорода карбонатов нефтегазоносных отложений Западной Сибири // Геохимия. 1981. Т. 198. С. 1216–1226.

Запивалов Н.П., Исаев Г.Д. Критерии оценки нефтегазоносности палеозойских отложений Западной Сибири // Вест. Томск. гос. ун-та. 2010. № 341. С. 226–232.

Кулешов В.Н. Эволюция изотопных углекислородных систем в литогенезе. Сообщение 2. Катагенез // Литология и полезные ископаемые. 2001. № 6. С. 610–630.

Розин А.А. Подземные воды Западно-Сибирского артезианского бассейна и их формирование. Новосибирск: Наука, 1977. 101 с.

Таран Ю.А., Покровский Б.Г., Главатских С.Ф. Условия гидротермальных преобразований пород Мутновской гидротермальной системы (Камчатка) по изотопным данным // Геохимия. 1987. № 11. С. 1569–1579.

Шварцев С.Л., Силкина Т.Н., Жуковская Е.А., Трушкин В.В. Подземные воды нефтегазоносных отложений Нюрольского осадочного бассейна (Томская область) // Геология и геофизика. 2002. Т. 44. № 5. С. 451–464.

Шустер В.Л. Нефтегазоносность палеозойского фундамента Западной Сибири // Георесурсы, геознергетика, геополитика. 2010. № 2. С. 2–4.

Юрченко А.Ю. Формирование вторичных карбонатных пород верхнеабалакско-баженовской толщи Салымского, Правдинского и Малобалыкского нефтяных месторождений Западной Сибири: Автореф. канд. дисс. М., 2017.

Beaudoin G., Therrien P. The updated web stable isotope fractionation calculator // Handbook of stable isotope analytical techniques. 2009. Vol. 2. P. 1120–1122.

Demény A., Ahijado A., Casillas R., Vennemann T.W. Crustal contamination and fluid/rock interaction in the carbonatites of Fuerteventura Canary Islands, Spain: a C, O, H isotope study // Lithos. 1998. Vol. 44, N 3–4. P. 101–115.

Giggenbach W.F. The origin and evolution of fluids in magmatic-hydrothermal systems // Geochemistry of hydrothermal ore deposits. 3rd edit. N.Y.: John Wiley, 1997. P. 737–796.

Hu R.Z., Su W.C., Bi X.W. et al. Geology and geochemistry of Carlin-type gold deposits in China // Mineral. Deposita. 2002, Vol. 37, N 3–4. P. 378–392.

Keller J., Hoefs J. Stable isotope characteristics of recent natrocarbonatites from Oldoinyo Lengai // Carbonatite Volcanism. Berlin: Springer, 1995. P. 113–123.

Pili E., Poitrasson F., Gratier J.P. Carbon–oxygen isotope and trace element constraints on how fluids percolate faulted limestones from the San Andreas Fault system: partitioning of fluid sources and pathways // Chem. Geol. 2002. Vol. 190, N 1–4. P. 231–250.

Salomons W. Chemical and isotopic composition of carbonates in recent sediments and soils from West-

ern Europe // J. Sediment. Res. 1975. Vol. 45, N 2. P. 440–449.

Simmons S.F., Christenson B.W. Origins of calcite in a boiling geothermal system // Amer. J. Sci. 1994. Vol. 294, N 3. P. 361–400.

Valley J.W. Stable isotope geochemistry of metamorphic rocks // Stable isotopes in high temperature geological processes: Reviews in Mineralogy. 1986. P. 445–481.

Zheng Y.F. Oxygen isotope fractionation in carbonate and sulfate minerals // Geochem. J. 1999. Vol. 33, N 2. P. 109–126.

Поступила в редакцию 25.02.2019

Поступила с доработки 26.04.2019

Принята к публикации 26.04.2019