

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Поступила в редакцию 21.06.2024 г.

Принята к публикации 22.08.2024 г.

EDN: BOOZTS

УДК 556.3:552.54:552.578(470.13)

Майдль Т.В., Митюшева Т.П., Ульныров И.Л., Нечаев М.С.

Институт геологии им. академика Н.П. Юшкина Федерального исследовательского центра «Коми научный центр Уральского отделения Российской академии наук» (ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН), Сыктывкар, Россия, maydl@geo.komisc.ru, mityusheva@geo.komisc.ru, ulnyrov_iv@mail.ru, m.s.nechaev@ro.ru

ВЛИЯНИЕ СОСТАВА ПЛАСТОВЫХ РАССОЛОВ НА ЭПИГЕНЕТИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ВЕРХНЕСИЛУРИЙСКО- НИЖНЕДЕВОНСКИХ КАРБОНАТНЫХ ПОРОД ВАЛА ГАМБУРЦЕВА (ТИМАНО-ПЕЧОРСКАЯ НЕФТЕГАЗОНОСНАЯ ПРОВИНЦИЯ)

Приведены результаты комплексной интерпретации литолого-геохимических исследований кернового материала и моделирования процессов геохимического взаимодействия в системе пластовая вода-порода для продуктивных толщ (S2-D1) нижнепалеозойского комплекса (O3-D1) вала Гамбурцева Варандей-Адзьвинской структурно-тектонической зоны. Впервые обсуждается воздействие на карбонатные, сульфатно-карбонатные породы хлоридно-натриевых рассолов. Проведенные расчеты степени насыщенности вод по отношению к карбонатным и сульфатным минералам, их сопоставление с эпигенетической минерализацией пород позволили выявить основные процессы, способствующие формированию минеральных новообразований в природном резервуаре (S2-D1). В результате получены новые данные, способствующие более точному прогнозу коллекторских свойств пород нижнепалеозойского карбонатного комплекса северо-востока Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции.

Ключевые слова: карбонатная порода, сульфатно-карбонатная порода, пластовый хлоридно-натриевый рассол, эпигенетическое изменение, вал Гамбурцева, Варандей-Адзьвинская структурно-тектоническая зона, Тимано-Печорская нефтегазоносная провинция.

Для цитирования: Майдль Т.В., Митюшева Т.П., Ульныров И.Л., Нечаев М.С. Влияние состава пластовых рассолов на эпигенетические изменения верхнесилурийско-нижнедевонских карбонатных пород вала Гамбурцева (Тимано-Печорская нефтегазоносная провинция) // Нефтегазовая геология. Теория и практика. - 2024. - Т.19. - №3. - https://www.ngtp.ru/rub/2024/22_2024.html EDN: BOOZTS

Породы-коллекторы продуктивных толщ нижнепалеозойского комплекса северо-востока Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции (ТПП) представлены в основном вторичными доломитами, в формировании пустотного пространства которых принимают участие поры, каверны и трещины. Карбонатные породы верхнесилурийско-нижнедевонских (S2-D1) отложений северо-востока Печорского седиментационного бассейна, как установлено ранее [Майдль, 1989; Душин и др., 2016; Майдль, Жемчугова, Наумчев, 2018; Жемчугова, Маслова, 2020; Ульныров, Майдль, 2023], подвергались эпигенетическим изменениям. Процесс доломитизации широко проявлен в изучаемых породах, преобразует интервалы разреза разной мощности, изменяющейся как по вертикали, так и по латеральному

простиранию толщи карбонатной платформы. Для разработки моделей эпигенеза, которые позволяли бы получать количественные, а не качественные оценки процессов, необходимы комплексные исследования и анализ взаимодействий флюидов и вмещающих их пород.

В статье обсуждаются возможные модели преобразования карбонатных пород в природном резервуаре верхнеордовикско-нижнедевонского нефтегазоносного комплекса по данным литологических наблюдений и по результатам моделирования равновесного распределения (степени насыщенности) минералов в подземных водах.

Фактический материал и методика исследований

В основу работы положены материалы, полученные при исследовании кернового материала 18 скважин вала Гамбурцева. Изучение морфологии пустотного пространства и характера вторичной минерализации 10 образцов пород проводились с помощью электронного микроскопа TESCAN VEGA3 LMN, оснащенного энергодисперсионным спектрометром (ЭДС) «Oxford Instruments X-Max 50 мм²» в Центре коллективного пользования УрО РАН «Геонаука» в ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН (г. Сыктывкар).

Химический состав вод S₂-D₁ водоносного комплекса вала Гамбурцева охарактеризован по 19 пробам 13 скважин. Результаты опробования пластовых вод за период 1983-1989 гг. собраны из различных фондовых работ.

Рассчитаны гидрохимические коэффициенты, характеризующие генетический тип вод и отражающие степень постседиментационных преобразований пластовых рассолов: rNa/rCl , Cl/Br , Ca/Mg , rMg^*/rCl (где $rMg^*=(rCa+rMg)-(rHCO_3+rSO_4)$), $rSO_4 \cdot 100/rCl$, $(rCl-rNa)/rMg$, $(rNa+rMg)/rCa$, Ca/Sr . Проведено термодинамическое моделирование процессов геохимического взаимодействия воды и горных пород с использованием программы SOLMINEQ-88 [Kharaka et al., 1988]. Оценена степень насыщенности рассолов по отношению к минералам: кальцит – CaCO₃, доломит – CaMg(CO₃)₂, магнезит – MgCO₃, ангидрит – CaSO₄, гипс – CaSO₄·2H₂O, а также при определении в пластовых водах Sr и Fe, содержащие их стронцианит – SrCO₃, целестин – SrSO₄ и железосодержащие минералы (FeS₂, FeCO₃, Fe₂O₃, Fe₃O₄). Компьютерная программа основана на алгоритмах расчета химических равновесий по константам стехиометрических уравнений реакций. Коэффициенты активности для пластовых рассолов рассчитаны на основе уравнений К. Питцера, pH и растворимости минералов при заданных температуре и давлении. Равновесность в системе вода-порода определена как разность в свободной энергии Гиббса между фактическим в данной пробе воды и равновесным состояниями минерала. Степень насыщения пластовых вод к минералам вмещающих пород оценена с помощью индекса ΔG_{diff} (в программе «DELG») в ккал/моль. Положительные значения указывают на то, что раствор пересыщен по отношению к заданному минералу и

возможно его осаждение, отрицательные – на недосыщение по отношению к минералу, возможно растворение.

Геологическое положение и литологическая характеристика разреза

В соответствии с принятым тектоническим районированием [Прищепа и др., 2011], рассматриваемая территория находится в пределах Варандей-Адзвинской структурно-тектонической зоны, расположенной на северо-востоке Печорской синеклизы (рис. 1).

Варандей-Адзвинская структурно-тектоническая зона характеризуется сложным строением и представлена приразломными валами: Сарембой-Леккейягинским, Гамбурцева и Сорокина, разделенными Мореюской и Верхнеадзвинской депрессиями. Структуры зоны на востоке частично перекрыты Вашуткина-Талотинской складчато-надвиговой зоной. В юго-восточной части они ограничены серией крупных взбросо-надвигов гряды Чернышева.

Вал Гамбурцева представляет собой линейную антиклинальную структуру, приуроченную к фронтальной части крупного надвига. С юга на север в пределах вала выявлено три нефтяных месторождения (Нядейюское, Хасырейское и Черпаюское), приуроченных к одноименным положительным структурам, осложненным более мелкими поднятиями (см. рис. 1). Промышленная нефтеносность установлена в отложениях верхнеордовикско-нижнедевонского нефтегазоносного комплекса, кровля которого на Нядейюской структуре залегает на глубинах 3-4 км, а на Черпаюской (южной части вала) - на глубине 1,8-2 км. На всех трех месторождениях залежи нефти выявлены в карбонатных отложениях нижнего девона, а на Черпаюском и Хасырейском месторождениях - и в верхнесилурийских породах. Преимущественным развитием в них пользуются карбонатные низко-среднеемкие коллекторы порово-трещинного типа с низкой и средней проницаемостью ($K_{пр}$ от $< 0,001$ до $0,01-0,1$ мкм²). В зонах сдвиговых деформаций прогнозируются структурные с тектоническим экранированием, сбросо-надвиговые типы ловушек [Сотникова, 2010].

Отложения верхнего силура вала Гамбурцева залегают на карбонатной толще нижнего силура и представлены лудловским и пржидольским отделами, в объеме которых выделяются гердьюский (S_{2gj}) и гребенской (S_{2gr}) горизонты с общей мощностью от 400 до 650 м. Снизу вверх по разрезу выделено пять пачек пород, отличающихся литологическим составом. Гердьюский горизонт представлен (снизу вверх) доломитовой и глинисто-доломитовой пачками, а гребенской - известково-глинистой, известково-доломитовой и глинисто-доломитовой пачками [Ульныров, Майдль, 2023]. Отложения верхнего силура плохо охарактеризованы керном, а верхнего ордовика бурением не вскрыты и выделяются лишь по сейсмической записи [Грунис, Ростовщиков, Богданов, 2016].

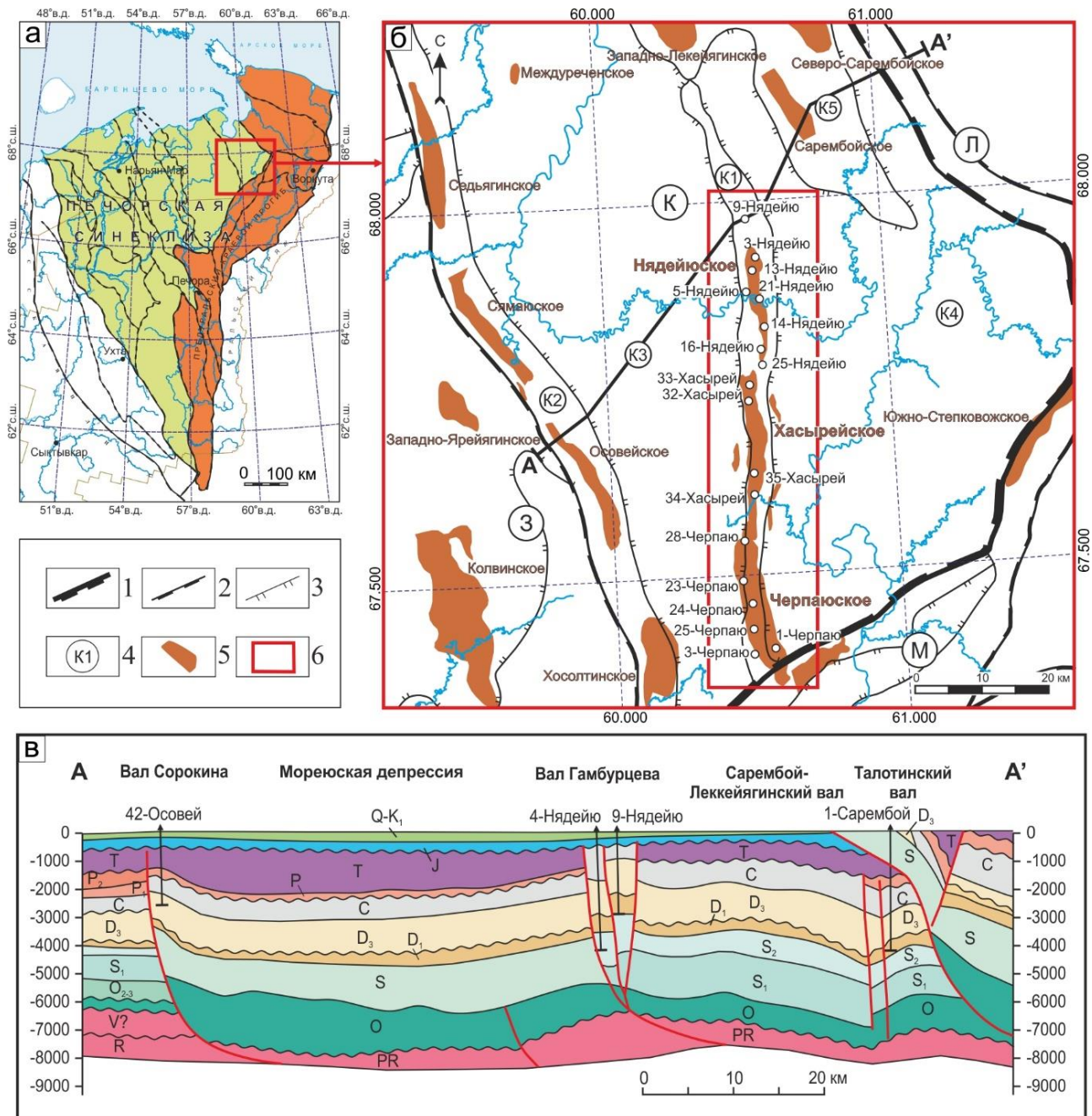


Рис. 1. Геологическое и тектоническое строение района исследований

а - обзорная карта Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции, *б* - фрагмент схемы тектонического районирования Варандей-Адзвинской структурно-тектонической зоны [Прищепа и др., 2011], *в* - геологический разрез через Варандей-Адзвинскую структурную зону по профилю 15-РС [Никонов и др., 2000].

1-3 - границы тектонических элементов: 1 - надпорядковых, 2 - первого порядка, 3 - второго порядка; 4 - номера тектонических элементов: К - Варандей-Адзвинская структурно-тектоническая зона: К1 - вал Гамбурцева, К2 - вал Сорокина, К3 - Мореюская депрессия, К4 - Верхнеадзвинская депрессия, К5 - Сарембой-Леккейгинская зона, 3 - Хорейверская впадина, М - гряда Чернышева, Л - Кортаихинская впадина; 5 - нефтяные месторождения; 6 - район работ.

Отложения: Q - четвертичные, K₁ - нижнемеловые; J - юрские; T - триасовые; P - пермские; P₁ - приуральские; P₂ - биармийские; C - каменноугольные; D₃ - верхнедевонские; D₁ - нижнедевонские; S - силурийские; S₁ - нижней подсистемы силура; S₂ - верхней подсистемы силура; O - ордовикские; O₂₃ - средне-верхнеордовикские; V - вендские; R - рифейские; RP - протерозойские.

Гердьюский горизонт вскрыт не всеми скважинами, но в полных разрезах представлен двумя пачками пород. В нижней первой пачке преобладают серые, коричневато-серые узорчатые и пятнистые доломиты с мелкообломочным детритом. Залегающая выше глинисто-карбонатная пачка характеризуется чередованием коричневато-серых и темно-серых, алевритово-глинистых, преимущественно слоистых доломитов и темно-серых с зеленоватым оттенком, тонкоплитчатых, известковых аргиллитов.

В нижней пачке гребенского горизонта преобладают зеленовато-серые желваковые глинистые известняки с прослоями «брахиоподовых ракушечников» и известняков биокластовых, перемижаемых прожилками и линзами зеленой и зеленовато-серой глины. Выше осаждается пачка коричневато-серых глинистых полибиокластовых желваковых известняков и серых комковатых доломитов. Разрез верхнего силура завершает пачка глинистых доломитов.

Отложения нижнего девона в центральной части вала Гамбурцева представлены в объеме овинпармского (D_{1op}) и сотчемкыртинского (D_{1sk}) горизонтов лохковского яруса с общей мощностью 220-640 м и расчленяются на три толщи (снизу вверх): известково-доломитовую, глинисто-доломитовую и сульфатно-карбонатную [Майдль, 1989].

В средней части вала известково-доломитовая толща имеет мощность 170-200 м, с преобладанием доломитовых пород. Нижняя часть пачки характеризуется глинисто-карбонатным составом, в котором содержатся иловые седиментационно-эпигенетические и вторичные доломиты, редкие прослои доломитов и мергелей. В породах присутствуют полосчатые, слоистые, пятнистые текстуры. Верхняя часть пачки представлена тонко-мелкозернистыми глинистыми и алевритистыми массивными, нечетко- и полосчато-слоичатыми иловыми, илово-остракодово-микробиальными доломитами, маломощными прослойками остракодовых ракушнякав и доломитовых мергелей.

Залегающая выше глинисто-доломитовая толща повсеместно вскрыта скважинами и достаточно хорошо выдерживается по мощности 70-80 м. В изученном разрезе она имеет мощность 60 м. В ее строении принимают участие иловые, илово-остракодово-микробиальные, узорчатые и полосчатые доломиты с прослоями доломитовых мергелей и аргиллитов.

Выше выделяется сульфатно-карбонатная толща мощностью 60 м. Она представлена переслаиванием ангидритов, доломитов, мергелей и аргиллитов. Сульфатно-карбонатная толща является, по всей видимости, рассеивающей, или выступает в качестве покрышки, так как секущие ее трещины отсутствуют или не эффективны. В разрезе ее мощность значительно сокращается или даже практически отсутствует.

Между фаунистически доказанными толщами нижнего девона и тиманского горизонта

верхнего девона, являющихся региональным флюидоупором, выделяется пачка глинисто-карбонатных и карбонатных брекчий. Она представлена ассоциацией линзовидно-комковатых, глинистых известняков и известняковых конгломерато-брекчий [Майдль, 1989]. Завершающие рассматриваемый разрез нижнего девона отложения брекчиевой пачки имеют мощность ~ 5 м.

Гидрохимическая характеристика водоносного комплекса и результаты моделирования процессов геохимического взаимодействия вод и горных пород

Водоносный комплекс S₂-D₁ отложений вала Гамбурцева залегает в зоне весьма затрудненного водообмена и опробован в интервале глубин от 2,3 до 3,2 км. Минерализация рассолов варьирует в пределах 113-189 г/л (табл. 1 и 2). Для сравнения, в скв. 1-Черпаюская (инт. 4444-4515 м), находящейся в опущенном блоке Черпаюской структуры, значение минерализации вод в отложениях верхнего силура (S_{2gr}) достигает 214,1 г/л. Состав исследуемых трещинных вод Нядейюской, Хасырейской и Черпаюской площадей - хлоридно-натриевый (Na 74-83 мг-экв.%, Cl 97-99 мг-экв.%), наблюдается двукратное превышение ионов Cl⁻ над Na⁺. Доля сульфат-иона в химическом составе вод не более 2,8, а гидрокарбонат-иона - менее 0,6 мг-экв.%. В рассолах выявлены высокие содержания кальция (11-20 мг-экв.%) и пониженные магния (2-8 мг-экв.%). Об этом свидетельствует также *Ca/Mg* гидрохимический коэффициент, значения которого изменяются по опробованным интервалам от 2,5 до 14,4. Величина рН вод (4,0-8,0) характеризует различие условий в водоносном комплексе от кислых до слабощелочных (табл. 3). В рассолах определен NH₄ (90-146 мг/л), отмечается присутствие сероводорода в невысоких концентрациях (0,2-1,5 мг/л), за исключением двух скважин - 9-Нядейюская (инт. 2698-2715 м) и 3-Черпаюская (инт. 2804-2848 м), где в рассолах D_{1ор} пород величина H₂S достигает 102 и 24 мг/л соответственно. Замеры температур в диапазоне 51-58°C на глубинах от 2348 до 2679 м имеются только по результатам опробования Нядейюской и Хасырейской площадей, геотермический градиент по этим данным составил 3,8°C/100 м.

Рассолы комплекса однотипны, относятся к хлоркальциевому типу по В.А. Сулину при $rNa/rCl < 1$, $(rCl-rNa)/rMg > 1$. По ряду гидрохимических коэффициентов, позволяющих судить о генезисе вод ($rNa/rCl = 0,74-0,84$; $Cl/Br = 183-305$; $rCl-rNa/rMg = 2,5-9,0$; $rMg^*/rCl = 0,15-0,24$), предполагается, что состав вод S₂-D₁ водоносного комплекса - унаследованный морской (талассогенный) с прямым типом метаморфизации. Одним из основных процессов формирования хлоридно-натриевых вод является концентрирование седиментационных вод. Наименьшие значения коэффициента метаморфизации (rNa/rCl) и, следовательно, большая степень изменения состава выявлены в рассолах верхнесилурийских пород.

Преобразования вод за счет взаимодействия с водовмещающими карбонатными и сульфатно-карбонатными породами приводят к потере менее устойчивых в растворе компонентов. При этом рассол накапливает кальций путем обмена магния рассола на кальций породы. Метаморфизация рассолов выражается в изменении катионной составляющей и происходит по схеме: $Mg_p^{2+} + Ca_{me}^{2+} \rightarrow Ca_p^{2+} + Mg_{me}^{2+}$. В некоторых интервалах осадочных S₂-D₁ пород возможен и обратный процесс, что отражают изменения гидрохимических коэффициентов $(rNa+rMg)/rCa$ и Ca/Mg (см. табл. 2). Поглощенный комплекс тонкодисперсных пород различных толщ комплекса служит источником натрия (в меньшей степени и других ионов), что в ходе реакций катионного обмена способствует формированию Cl-Na облика вод. Поведение стронция аналогично кальцию, отношение Ca/Sr (26,1-42,6) свидетельствует о связи с морскими водами (величина Ca/Sr для морской воды составляет около 33). Только для скв. 5-Нядейюская (инт. 3190-3204 м) этот показатель - менее 33. При взаимодействии пластовых вод с карбонатными и сульфатно-карбонатными вмещающими породами отношение может уменьшаться либо повышаться за счет растворения содержащих стронций минералов.

В водах S₂-D₁ отложений выявлены ценные компоненты: калий (0,9-1,8 г/л), бром (325-603 мг/л), бор (9-66 мг/л), йод (10-49 мг/л), стронций (170-324 мг/л), литий (7-12 мг/л). Повышенные содержания элементов позволяют считать их йодо-бромными литиеносными промышленными рассолами. Обогащение бромом относительно морских вод связывают с их длительным взаимодействием с органическим веществом пород. Особо следует выделить Хасырейскую площадь, где концентрация брома в водах наиболее высока (см. табл. 1). Необходимо отметить, что в рассолах хлоркальциевого типа вод для северных районов ТПП минерализацию свыше 100-150 г/л, высокие содержания брома более 150 мг/л и йода более 15 мг/л, аммония относят к положительным (благоприятным) гидрогеологическим показателям нефтегазоносности [Зытнер, Чибисова, 2013]. Сульфатный коэффициент ($rSO_4 \cdot 100/rCl$) также является одним из важных показателей нефтегазоносности территории, поскольку низкие содержания сульфатов в водах, приуроченных к месторождениям углеводородов, могут быть связаны с процессами восстановления сульфатов, при участии анаэробных бактерий в присутствии органического вещества [Зорькин, Суббота, Стадник, 1982]. Значения сульфатного коэффициента менее 1 считают положительным гидрогеологическим показателем, более 1 - негативным. Для исследованного водоносного комплекса диапазон значений - 0,64-2,89. С другой стороны, величина $rSO_4 \cdot 100/rCl$ может возрастать при обогащении карбонатных толщ ангидритом или гипсом.

Таблица 1

Химический состав рассолов S₂-D₁ водоносного комплекса вала Гамбурцева

Наименование скважины	Интервал исследования, м		Индекс геологического возраста отложений	Минерализация, г/л	Содержание, мг/л							
	от	до			Na ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Br	I
9-Нядейюская	2474	2500	D _{1sk}	113,80*	36503,53	1124,80	4800,00	68337,50	170,80	1105,70	324,81	10,85
9-Нядейюская	2516	2520	D _{1sk}	164,90	51969,42	2736,00	6700,00	100110,00	152,50	1418,85	327,80	15,86
9-Нядейюская	2536	2570	D _{1sk-op}	160,70	52497,96	1580,80	6300,00	96915,00	30,50	1391,28	432,74	14,81
25-Нядейюская	2670	2772	D _{1sk-op}	178,00	55019,00	2231,00	9020,00	108062,00	134,00	1638,00	581,00	18,00
9-Нядейюская	2698	2715	D _{1op}	152,27	46931,04	121,60	11000,00	90880,00	1000,00	1267,42	411,43	14,81
9-Нядейюская	2698	2779	D _{1op}	160,10	52585,05	1824,00	6950,00	96915,00	800,00	1354,25	441,28	15,86
13-Нядейюская	2411	2427	D _{1op}	144,70	46806,30	1732,00	6750,00	87508,00	116,00	1335,00	331,50	12,16
5-Нядейюская	3190	3204	D _{1op}	169,00	52141,00	2280,00	8450,00	103163,00	54,90	1039,00	546,00	19,00
14-Нядейюская	2348	2364	D _{1op}	171,00	52337,00	1094,00	11140,00	104086,00	146,00	1206,00	542,00	23,00
16-Нядейюская	2590	2615	D _{1op}	161,00	49343,00	2341,00	8400,00	98512,00	171,00	1148,00	521,00	15,00
16-Нядейюская	2626	2679	D _{1op}	164,00	49218,00	2280,00	9400,00	100004,00	262,00	996,00	513,00	12,00
33-Хасырейская	2549	2590	D _{1op}	151,00	47169,00	2085,00	7060,00	90667,00	372,00	2465,00	440,00	21,00
28-Черпаюская	2570	2615	D _{1op}	163,00	51654,00	1702,00	7600,00	98938,00	140,00	1292,00	539,00	14,00
3-Черпаюская	2804	2848	D _{1op}	152,00	47033,00	669,00	9600,00	90170,00	122,00	3533,00	444,00	15,00
21-Нядейюская	2481	2527	D _{1op-S₂gr}	166,00	53205,00	2188,00	6900,00	100678,00	79,00	1464,00	492,00	49,00
14-Нядейюская	2498	2529	S _{2gr}	165,20	50922,70	2766,40	7850,00	100642,50	79,30	1269,89	442,36	18,51
35-Хасырейская	2512	2522	S _{2gr}	189,00	55949,00	2675,00	12000,00	115979,00	104,00	1004,00	603,00	33,40
34-Хасырейская	2662	2672	S _{2gr}	172,00	53637,00	2371,00	8300,00	104831,00	281,00	1295,00	515,00	34,00
1-Черпаюская	4444	4515	S _{2gr}	214,11	65888,10	2004,75	12300,00	130286,00	256,20	692,55	508,91	10,57

Примечание: * - результат анализа рассола, не исключается разбавление пластовых вод комплекса.

Таблица 2

Гидрогеохимические показатели

Наименование скважины	Интервал исследования, м		Индекс геологического возраста отложений	rNa/rCl	Cl/Br	Ca/Mg	rMg*/rCl	rSO ₄ ·100/rCl	(rCl-rNa)/rMg	(rNa+rMg)/rCa	Ca/Sr
	от	до									
9-Нядейюская	2474	2500	D _{1sk}	0,82	210,39	4,27	0,16	1,19	3,67	7,03	–
9-Нядейюская	2516	2520	D _{1sk}	0,80	305,40	2,45	0,19	1,05	2,50	7,45	–
9-Нядейюская	2536	2570	D _{1sk-op}	0,84	223,96	3,99	0,15	1,06	3,46	7,69	–
25-Нядейюская	2670	2772	D _{1sk-op}	0,79	185,99	4,04	0,20	1,12	3,57	5,74	–
9-Нядейюская	2698	2715	D _{1op}	0,80	220,89	9,05	0,18	1,03	5,22	3,91	–
9-Нядейюская	2698	2779	D _{1op}	0,84	219,62	3,81	0,17	1,03	2,97	7,04	–
13-Нядейюская	2411	2427	D _{1op}	0,82	263,98	3,90	0,18	1,13	3,03	6,48	–
5-Нядейюская	3190	3204	D _{1op}	0,78	188,94	3,71	0,20	0,74	3,42	5,84	26,08
14-Нядейюская	2348	2364	D _{1op}	0,78	192,04	10,18	0,21	0,86	7,33	4,27	–
16-Нядейюская	2590	2615	D _{1op}	0,77	189,08	3,59	0,21	0,86	3,28	5,59	–
16-Нядейюская	2626	2679	D _{1op}	0,76	194,94	4,12	0,22	0,74	3,62	4,97	–
33-Хасырейская	2549	2590	D _{1op}	0,80	206,06	3,39	0,18	2,01	2,95	6,32	41,53
28-Черпаюская	2570	2615	D _{1op}	0,81	183,56	4,47	0,18	0,96	3,88	6,31	35,51
3-Черпаюская	2804	2848	D _{1op}	0,80	203,09	14,35	0,18	2,89	9,04	4,39	–
21-Нядейюская,	2481	2527	D _{1op-S₂gr}	0,81	204,63	3,15	0,17	1,07	2,92	7,26	34,33
14-Нядейюская,	2498	2529	S _{2gr}	0,78	227,51	2,84	0,20	1,87	2,73	6,25	–
35-Хасырейская	2512	2522	S _{2gr}	0,74	192,34	4,49	0,24	0,64	3,81	4,44	42,55
34-Хасырейская	2662	2672	S _{2gr}	0,79	203,56	3,50	0,20	0,91	3,20	6,12	33,20
1-Черпаюская	4444	4515	S _{2gr}	0,78	256,01	6,14	0,21	0,39	4,90	4,95	–

Примечание: $rMg^* = (rCa + rMg) - (rHCO_3 + rSO_4)$.

Таблица 3

Насыщение вод минералами по результатам термодинамического моделирования

Наименование скважины	Интервал исследования, м		Индекс геологического возраста отложений	pH	CO ₂ расчет	ΔG_{diff}							
	от	до				ангидрит	кальцит	доломит	гипс	магнезит	целестин	стронцианит	другие минералы
9-Нядейюская	2474	2500	D _{1sk}	7,0	12,25	-0,08	1,08	3,75	-0,07	0,37	–	–	–
9-Нядейюская	2516	2520	D _{1sk}	6,8	10,33	0,26	0,97	3,95	0,22	0,67	–	–	–
9-Нядейюская	2536	2570	D _{1sk-op}	4,0	1122	0,24	-4,07	-6,44	0,21	-4,69	–	–	FeS ₂ =7,35
25-Нядейюская	2670	2772	D _{1sk-op}	7,2	2,79	0,6	1,63	5,04	0,51	1,03	–	–	–
9-Нядейюская	2698	2715	D _{1op}	7,8	14,87	0,45	3,57	8,36	0,38	2,41	–	–	FeS ₂ =18,88 FeCO ₃ =4,18 Fe ₂ O ₃ =8,66 Fe ₃ O ₄ =11,97
9-Нядейюская	2698	2779	D _{1op}	4,0	28250	0,32	-1,87	-1,93	0,23	-2,44	–	–	FeS ₂ =7,04 FeCO ₃ =-1,13
13-Нядейюская	2411	2427	D _{1op}	7,0	7,64	0,17	0,91	3,59	0,2	0,31	–	–	–
5-Нядейюская	3190	3204	D _{1op}	7,0*	1,69	0,42	0,84	3,74	0,21	0,33	0,29	-1,07	–
14-Нядейюская	2348	2364	D _{1op}	7,2	4,04	0,39	1,62	4,26	0,39	0,38	–	–	–
16-Нядейюская	2590	2615	D _{1op}	7,0	5,52	-0,17	1,26	3,74	0,11	0,4	–	–	–
16-Нядейюская	2626	2679	D _{1op}	7,0	11,87	0,25	1,71	5,16	0,18	1,09	–	–	–
33-Хасырейская	2549	2590	D _{1op}	7,0	17,32	0,59	1,81	5,34	0,57	1,26	0,3	-0,25	–
28-Черпаюская	2570	2615	D _{1op}	7,0	5,24	0,29	1,33	4,28	0,26	0,63	0,1	-0,65	–
3-Черпаюская	2804	2848	D _{1op}	7,0	7,36	1,13	2,38	5,71	1,04	0,93	–	–	–
21-Нядейюская	2481	2527	D _{1op-S₂gr}	6,8	5,17	0,3	0,58	3,00	0,27	0,11	0,14	-1,37	–
14-Нядейюская	2498	2529	S _{2gr}	5,3	124,5	0,24	-1,42	-2,97	0,22	-1,82	–	–	FeCO ₃ =-3,23
35-Хасырейская	2512	2522	S _{2gr}	7,2	1,93	0,32	1,49	4,55	0,3	0,79	0,04	-0,69	–
34-Хасырейская	2662	2672	S _{2gr}	7,4	4,66	0,33	2,21	6,2	0,29	1,68	0,18	0,27	–
1-Черпаюская	4444	4515	S _{2gr}	7,0	13,37	0,83	2,02	6,22	0,227	1,18	–	–	–

Особенности эпигенетической минерализации карбонатных пород по данным гидрохимического моделирования и результатам электронно-микроскопических исследований

Оценка возможных факторов вторичной минерализации отложений комплекса в пределах вала Гамбурцева проводилась в направлении оценки результатов взаимодействия вод и пород. Химический состав подземных вод и результаты термодинамического моделирования могут быть использованы в качестве «промежуточной записи процесса» отражения постседиментационных преобразований, происходящих в результате взаимодействия в системе «вода-порода».

Расчеты степени насыщения пластовых вод к карбонатным минералам вмещающих пород вала Гамбурцева позволяют отметить, что в большинстве опробованных интервалов величины $\Delta G_{\text{diff}} \text{CaCO}_3$, $\Delta G_{\text{diff}} \text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ и $\Delta G_{\text{diff}} \text{MgCO}_3$ имеют положительные значения (см. табл. 3). Кроме того, в наибольшей степени рассолы насыщены по доломиту (3,0-8,36) и меньше по другим карбонатам. Величина $\Delta G_{\text{diff}} \text{CaCO}_3$ меняется от практически равновесного значения 0,58 до относительно высоких значений 3,57, допускающих кристаллизацию кальцита. Насыщения по магнезиту близки к равновесным значениям или немного их превышают. Зависимостей степени насыщения рассолов от возраста отложений или структурной принадлежности не выявлено. В пробе скв. 9-Нядейюская (инт. 2698-2715 м) проанализированной на содержание железа, отмечено также насыщение сидеритом. Однако в изученных породах вместо железистого кальцита отмечается железистый доломит. Отдельные генерации доломитовых кристаллов обладают повышенным содержанием железа и могут приближаться по составу к анкериту $\text{Ca}(\text{MgFe})(\text{CO}_3)_2$.

Доломитизация в изучаемых отложениях проявлена очень широко, особенно в продуктивных интервалах коллекторов. Среди вторичных доломитов выделяется несколько морфоструктурных разновидностей, сохраняющих реликты или полностью замещающих первичные структуры известняков.

Электронно-микроскопические исследования вторичных доломитов позволяют выделить две-три генерации доломитов, отличающихся составом (рис. 2). Доломиты первой и отчасти второй генерации характеризуются несколько повышенным молекулярным содержанием кальция (от 1 до 3,5 ат. %). Кристаллы второй генерации, слагающие зоны и участки рекристаллизации, демонстрируют незначительную примесь железа при недостатке магния. По данным микронзондового анализа содержания железа составляют десятые доли (0,2-0,5 ат. %). Третья генерация крупных эвгедральных кристаллов содержит уже от 1,4 до 3,8 ат. %. Железистые доломиты более распространены в породах Хасырейской площади. В ряде случаев они содержат также примесь (доли процента) натрия, калия и хлора, что

связывает их генезис с глубинными растворами, возможно, подпитываемыми рассолами залегающих ниже соленосных толщ ордовика. О глубинном характере и термальной конвекции как причине циркуляции вод также свидетельствует нахождение кристаллов галита, выполняющих микротрещины и микропоры в доломитах силурийских толщ (рис. 3).

Процессы формирования аутигенного кальцита, отмечаемые в породах, связаны с процессами дедоломитизации – замещения доломитов кальцитом при растворении ангидритов в толщах с карстовыми брекчиями. Характерным проявлением кальцитизации являются также кальцитовые цементы, которые часто встречаются в доломитах. Кальцит заполняет трещины, а также цементирует пустоты, возникшие после растворения доломитов в измененных породах и/или в зонах взаимодействия контрастных по химизму вод, например, в зоне водогазонефтяных контактов. Морфология кальцитовых агрегатов свидетельствует о цементации полостей от стенок к центру и подразумевает предшествующие процессы выщелачивания доломита термальными растворами (рис. 4).

Оценка степени насыщения вод сульфатными минералами показала возможность растворения их из водовмещающих толщ или осаждения минералов из пластовых S_2 - D_1 рассолов (см. табл. 3). Во всех исследованных пробах подземных вод величина насыщения по гипсу, ангидриту и целестину имеет положительные значения. Исключением является наименее минерализованный рассол скв. 9-Нядейюская (инт. 2474-2500 м). Но и в нем вычисленные значения указывают на почти равновесное состояние в системе вода-порода. Положительные значения ΔG_{diff} свидетельствуют о возможности процесса осаждения вторичных сульфатных минералов в породах всей анализируемой толщи при высоких P-T параметрах. По величине ΔG_{diff} насыщенности рассолов и гипс, и ангидрит имеют равную вероятность к осаждению, целестин должен находиться с рассолами практически в равновесии. Однако в рассматриваемом случае при температурах в пласте 51-58°C ангидрит должен быть более устойчивым, чем гипс [Бахтин, Кольчугин, Есиков, 2012], что подтверждается и литолого-минералогическими исследованиями.

Отсутствие данных по концентрациям стронция и других микроэлементов во всех исследованных рассолах не позволило провести моделирование насыщенности стронцианитом и другими минералами для всех представленных проб. Тогда как по имеющимся данным можно отметить недосыщение вод стронцианитом при одновременном насыщении их по целестину, что, вероятно, фиксирует процесс замещения нестабильных стронциевых карбонатов сульфатами.

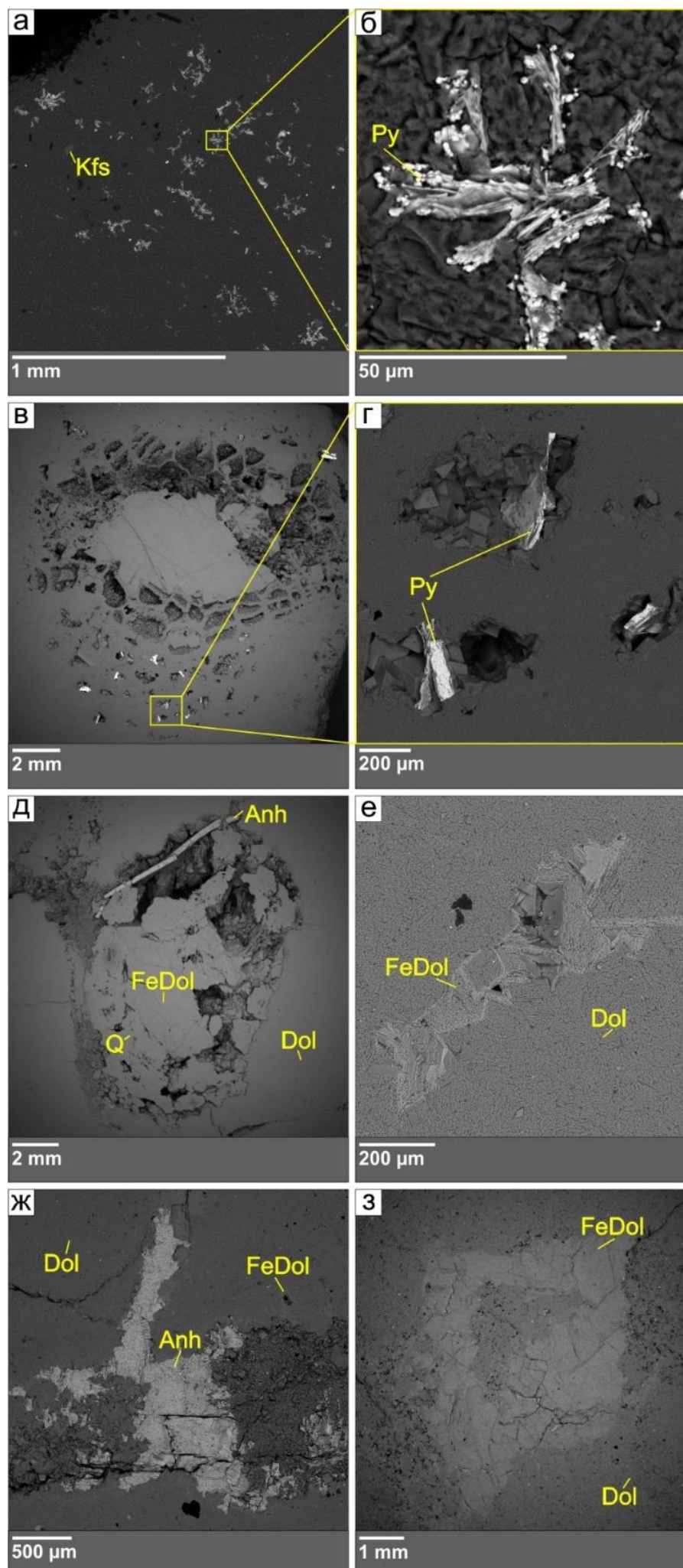


Рис. 2. Электронно-микроскопическое исследование процессов вторичной минерализации

а-б - скв. 25-Черпаюская, обр. ЧРП 3/3, гл. 2105-2110 м; в-г - скв. 35-Хасырейская, обр. ХСР 8/3, гл. 2343–2354 м; д-е - скв. 35-Хасырейская, обр. ХСР 4/2, гл. 2300-2309 м; ж-з - скв. 35-Хасырейская, обр. ХСР 7/6, гл. 2331-2343 м.

Проявления в породах: доломит мелко-среднезернистый с агрегатами пирита сфероидной, кристаллической и пластинчатой формы, приуроченного к межкристаллическим каналам доломитовой породы (а, б); крупная каверна по замещенной и выщелоченной колонии (в центре крупный кристалл доломита с искривленными гранями «седловидной» формы) (в); ромбоэдры доломита с гладкими гранями и пластинчатые кристаллы пирита в порах на периферии замещенной колонии (г); частично выщелоченная кремнистая колония табулят сохраняет тени органической ячеистой структуры. В центре цемент из крупных кристаллов доломита (д); доломит с примесью железа формирует кристаллы или зоны кристаллов с более ярким свечением, чем обычные доломиты с небольшим избытком ионов кальция (е, д, з); выделения ангидрита в кавернах (д) и трещинах с элювиальной глиной (ж).

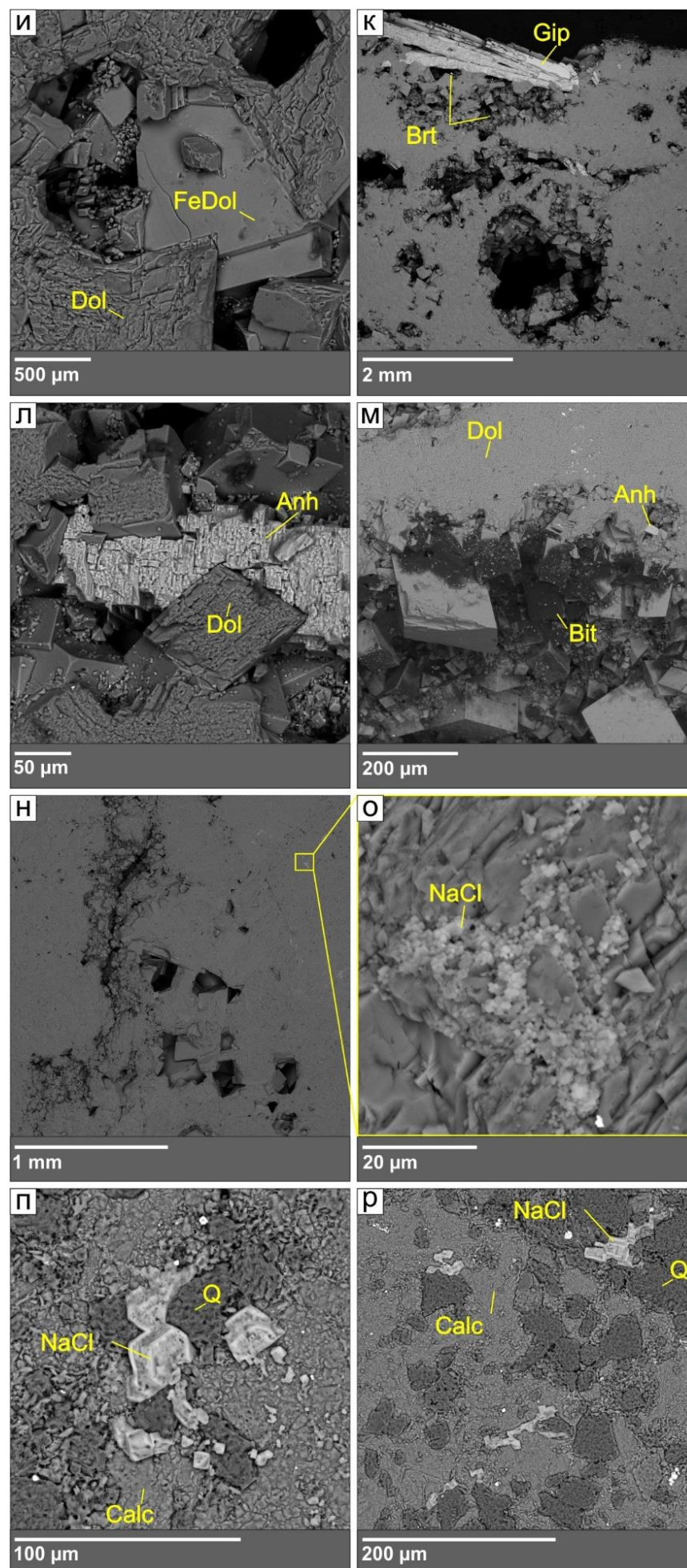


Рис. 3. Электронно-микроскопическое исследование процессов вторичной минерализации (продолжение)

и-к - скв. 25-Черпаюская, обр. ЧРП 10/4, гл. 2179-2187 м; л-м - скв. 35-Хасырейская, обр. ХСР 5/1, гл. 2309-2320 м; н-о - скв. 25-Черпаюская, обр. ЧРП 8/6, гл. 2159-2165 м; п-р - скв. 35-Хасырейская, обр. ХСР 14/2, гл. 2573-2578 м.

Проявления в породах: доломит, цементирующий пустоты, содержит примесь железа и отличается более ярким отражением (и); выделения в полостях каверн кристаллических агрегатов гипса (к), ангидрита (л) и пленок битума (л, м); доломитовые цементы в пустотах выщелачивания (м), вторичные поры доломитизации (н) и выделения хлористого натрия в матрице (о); цепочки кристаллов галита в межзерновых каналах имеют облик кластеров перколяции (просачивания) (п, р).

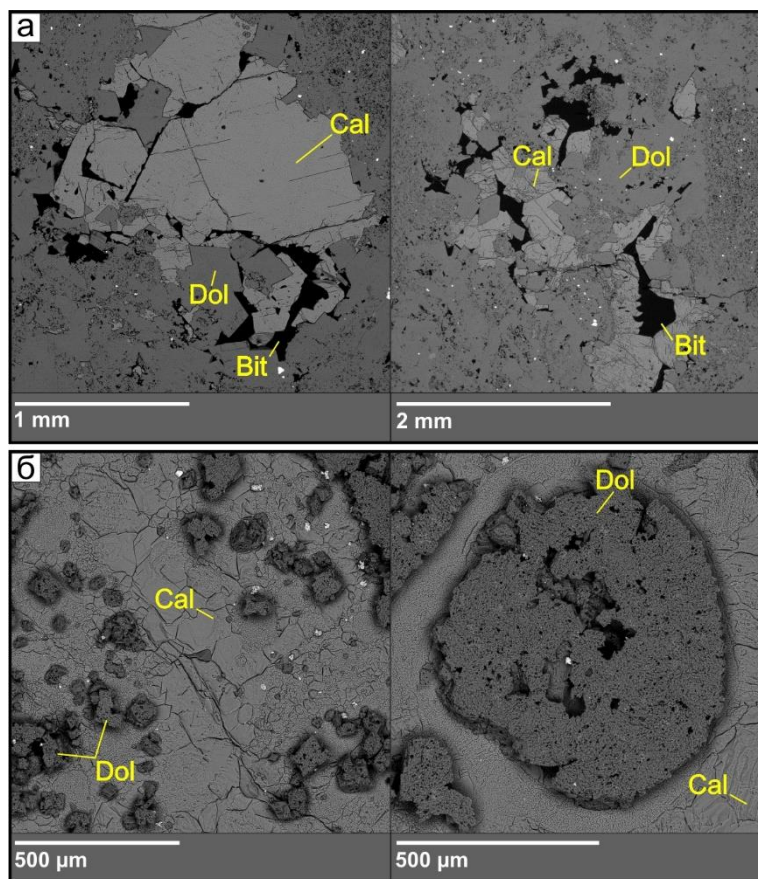


Рис. 4. Электронно-микроскопические фотографии каверн, залеченных доломитовым и кальцитовым цементом

а - скв. 25-Черпаюская, обр. 15371, гл. 2450-2456 м; б - скв. 23-Черпаюская, обр. 15856, гл. 2270-2283 м. Кальцитовый цемент заполнения пустот выщелачивания. Каверна, залеченная доломитовым и кальцитовым цементом. Пустоты заполнены окисленной нефтью или битумом (а). Морфология кальцитовых агрегатов в цементе разных генераций свидетельствует о цементации полостей от стенок к центру. Облик доломитовых кристаллов подразумевает предшествующие цементации процессы выщелачивания доломита (б).

Проведенные минералогические исследования сульфатных минералов бария, стронция и кальция в карстовых брекчиях скв. 28-Черпаюская и сульфатно-карбонатной пачки скв. 35-Хасырейская демонстрируют, что обогащение стронцием и барием пород не связано с ангидритом или доломитом. Формируются самостоятельные минеральные фазы целестина, обогащенного барием, или барита, обогащенного стронцием.

Из общей картины резко выбиваются данные трех проб воды из скважин 9 и 14 Нядейюской площади с повышенной кислотностью (рН 4,0-5,3) и высоким расчетным содержанием водорастворенного CO_2 . По ним получены отрицательные значения величин ΔG_{diff} по всем карбонатам, что предполагает их неустойчивость и растворение/замещение. Важно также отметить, что в этих пробах, как и в пробах из пластов, залегающих выше и ниже по разрезу, отмечается перенасыщение по пириту ($\Delta G_{\text{diff}} \text{FeS}_2$ до 7,0-18,9). Происхождение подобных «аномалий», вероятно, связано с геологическим строением толщи, так как пробы отобраны из зоны тектонического нарушения, где воды могли контактировать одновременно

и с ангидритами сочтемкыртинского горизонта, и с нефтью. Подобные обстановки, как известно, способствуют процессам сульфатредукции и биodeградации нефти, продуктами которых являются $\text{H}_2\text{S}(\text{HS}^-)$ и $\text{HCO}_3^-(\text{CO}_2)$, а насыщенные ими воды способны приводить к селективному растворению карбонатных пород [Machel, 2001]. Наблюдаемое в разрезе скв. 9-Нядейюская чередование ненасыщенных по карбонатам с перенасыщенными ими вод может вызывать во вмещающих породах процессы разуплотнения-уплотнения пород, отмечаемые на водонефтяных контактах крупных залежей углеводородов [Сахибгареев, 1983; Антипова, 2012].

Заключение

1. Изучаемый разрез верхнесилурийско-нижнедевонских толщ демонстрирует значительную латеральную и вертикальную изменчивость слагающих его пород. Вещественная неоднородность, отраженная в стратификации разрезов, позволяет локализовать зоны интенсивных эпигенетических преобразований, в частности уровни массивной вторичной доломитизации и развития в связи с этим процессом карбонатных коллекторов.

2. Литологические исследования пород демонстрируют преобладание среди эпигенетических процессов - процесса доломитизации, приводящего к увеличению в карбонатной породе содержания доломита и сокращению кальцита и, как результат, к некоторому увеличению вторичных пустот в породе при растворении одного минерала и осаждении другого.

3. Гидрохимические показатели исследованных рассолов $\text{S}_2\text{-D}_1$ комплекса вала Гамбурцева характеризуют однородный Cl-Na состав вод хлоркальциевого типа. Пластовые седиментационные воды морского генезиса испытали прямую метаморфизацию состава в процессе их концентрирования, при взаимодействии с водовмещающими сульфатно-карбонатными породами, катионного обмена, сульфатредукции и др. Наибольшая степень преобразования является результатом обмена ионов магния и кальция, при этом минеральный состав пород мог пополняться новыми минералами. Данный процесс катионного обмена, наряду с диффузной циркуляцией флюидов может рассматриваться как один из основных механизмов масштабной региональной вторичной доломитизации этих изначально известковых толщ.

4. Расчеты степени насыщения пластовых вод к минералам позволяют отметить, что в большинстве опробованных интервалов рассолы насыщены по сульфатам, доломиту и значительно меньше по другим карбонатам.

5. В пробах, проанализированных на содержание железа, отмечено также

насыщение вод сидеритом и пиритом. В породах железистый кальцит не установлен, но наиболее поздние генерации кристаллов в доломитовых цементах обладают повышенным содержанием железа и могут приближаться по составу к анкериту $\text{Ca}(\text{MgFe})(\text{CO}_3)_2$, что рассматривается как признак гидротермальной природы формирующих их флюидов.

6. Наличие в пробах ненасыщенных карбонатами вод, обладающих повышенным содержанием растворенного CO_2 , характеризует процессы разуплотнения-уплотнения пород, отмечаемые на водонефтяных контактах крупных залежей углеводородов и/или в зонах тектонических нарушений. Подобные обстановки, как известно, способствуют процессам сульфатредукции и биодеградации нефтей, продуктами которых являются $\text{H}_2\text{S}(\text{HS}^-)$ и HCO_3^- (CO_2), а насыщенные ими воды способны приводить как к селективному растворению - углекислотному выщелачиванию карбонатных пород, так и образованию сульфидов железа.

7. Присутствие в изученных образцах выделений галита свидетельствует о минерализации в результате прорывов в пласт карбонатных пород хлоридных вод из погруженных соленосных ордовикских толщ при активных тектонических перестройках.

8. Проведенное гидрохимическое моделирование достаточно убедительно согласуется с данными литологических исследований керна и отражает современное состояние взаимодействия в системе Cl-Na рассол - карбонатные породы. Гидрогеологические исследования дают общую характеристику условий, но только в комплексе с детальным изучением литологии и минералогии отложений возможно объяснить значительную латеральную и вертикальную изменчивость слагающих комплекс пород и проводить ретроспективный анализ эпигенеза и формирования природного резервуара в рамках нефтегазоносного комплекса.

Литература

Антипова К.А. Реконструкция условий образования и залегания суперколлекторов на больших глубинах в результате фильтрации мультифазных флюидов // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. - 2012. - №6. - С. 27-33.

Бахтин А.И., Кольчугин А.Н., Есиков А.А. Геохимические особенности осаждения и устойчивости сульфатов кальция в природе // Ученые записки Казанского университета. - 2012. - Т.154. - №4. - С. 55-60.

Грунис Е.Б., Ростовщиков В.Б., Богданов Б.П. Соли ордовика и их роль в особенностях строения и нефтегазоносности северо-востока Тимано-Печорской провинции // Георесурсы. - 2016. - Т.18. - №1. - С. 13-23. DOI: [10.18599/grs.18.1.3](https://doi.org/10.18599/grs.18.1.3)

Душин А.С., Мельников А.В., Федоров А.И., Рыкус М.В. Новая флюидодинамическая модель карбонатного коллектора месторождения им. Р. Требса на основе синтеза геологических и промысловых данных // Нефтегазовое дело. - 2016. - Т.14. - №2. - С. 13-23.

Жемчугова В.А., Маслова Е.Е. Вторичная доломитизация как фактор, определяющий коллекторские свойства нижнедевонских отложений восточного борта Хорейверской впадины

(Тимано-Печорский нефтегазоносный бассейн) // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. - 2020. - № 3. - С. 47-56.

Зорькин Л.М., Суббота М.И., Стадник Е.В. Нефтегазопроисковая гидрогеология. - Москва: Недра, 1982. - 216 с.

Зытнер Ю.И., Чибисова В.С. Гидрогеологические критерии прогноза нефтегазоносности северных районов Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции // Нефтегазовая геология. Теория и практика. - 2013. - Т.8. - №3. - http://www.ngtp.ru/rub/4/35_2013.pdf
DOI: [10.17353/2070-5379/35_2013](https://doi.org/10.17353/2070-5379/35_2013)

Майдль Т.В. Литология и коллекторы продуктивных карбонатных отложений нижнего девона вала Гамбурцева // Геология и ресурсы горючих ископаемых европейского Севера СССР. - Сыктывкар: КФ АН СССР, 1989. - С. 34-46.

Майдль Т.В., Жемчужова В.А., Наумчев Ю.В. Геохимические предпосылки выделения префранского несогласия в девонском разрезе Тимано-Печорского осадочно-породного бассейна // Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН. - 2018. - № 285 (9). - С. 30-38.
DOI: [10.19110/2221-1381-2018-9-30-38](https://doi.org/10.19110/2221-1381-2018-9-30-38)

Никонов Н.И., Богацкий В.И., Мартынов А.В., Ларионова З.В., Ласкин В.М., Галкина Л.В., Довжикова Е.Г., Ермакова О.Л., Костыгова П.К., Куранова Т.И., Москаленко К.А., Панкратов Ю.А., Петренко Е.Л., Попова Е.В., Сурина А.И., Шабанова Г.А. Атлас геологических карт «Тимано-Печорский седиментационный бассейн». Масштаб 1:2500000. - Ухта: ТП НИЦ, 2000. - 63 с.

Прищепина О.М., Богацкий В.И., Макаревич В.Н., Чумакова О.В. Новые представления о тектоническом и нефтегазогеологическом районировании Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции // Нефтегазовая геология. Теория и практика. - 2011. - Т.6. - №4. - http://www.ngtp.ru/rub/4/40_2011.pdf EDN: OYOEMB

Сахибгареев Р.С. Изменение коллекторов на водонефтяных контактах // ДАН СССР. - 1983. - Т.271. - № 6. - С. 1456-1460.

Сотникова А.Г. Зоны нефтегазонакопления и приоритетные направления воспроизводства запасов нефти в карбонатных комплексах Варандей-Адзвинского авлакогена // Нефтегазовая геология. Теория и практика. - 2010. - Т.5 - №1. - http://www.ngtp.ru/rub/6/4_2010.pdf EDN: OYYSOP

Ульныров И.Л., Майдль Т.В. Литология, условия осадконакопления и формирование пород-коллекторов верхнесилурийских карбонатных отложений вала Гамбурцева (Тимано-Печорская нефтегазоносная провинция) // Нефтегазовая геология. Теория и практика. - 2023. - Т.18. - №3. - http://www.ngtp.ru/rub/2023/26_2023.html EDN: ZQRFWL

Kharaka Y.K., Gunter W.D., Aggarwal P.K., DeBraul J.D. SOLMINEQ.88: a computer program for geochemical modeling of water-rock interactions. - US: Geological Survey Water-Resources, 1988. - 420 p. DOI: [10.3133/wri884227](https://doi.org/10.3133/wri884227)

Machel H.G. Bacterial and thermochemical sulfate reduction in diagenetic settings-old and new insights // Sedimentary Geology. - 2001. - Vol. 140. - P. 143-175. DOI: [10.1016/S0037-0738\(00\)00176-7](https://doi.org/10.1016/S0037-0738(00)00176-7)

This is an open access article under the CC BY 4.0 license

Received 21.06.2024

Published 22.08.2024

Maydl' T.V., Mityusheva T.P., Ul'nyrov I.L., Nechaev M.S.

Institute of Geology of FRC Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (IG FRC Komi SC UB RAS), Syktyvkar, Russia, maydl@geo.komisc.ru, mityusheva@geo.komisc.ru, ulnyrov_iv@mail.ru, m.s.nechaev@ro.ru

THE INFLUENCE OF THE RESERVOIR BRINES COMPOSITION ON EPIGENETIC CHANGES IN THE UPPER SILURIAN-LOWER DEVONIAN CARBONATE ROCKS OF THE GAMBUTSEV SWELL (TIMAN-PECHORA PETROLEUM PROVINCE)

The results of a comprehensive interpretation of lithological and geochemical studies of core material and modeling of geochemical interaction processes in the formation water-rock system for Lower Paleozoic productive strata of the Gamburtsev swell Varandey-Adzva tectonic zone are presented. The effects of sodium chloride brines on carbonate, sulfate-carbonate rocks are discussed for the first time. The calculations of the degree of saturation of waters in relation to carbonate and sulfate minerals and their comparison with the epigenetic mineralization of rocks allowed us to identify the main processes contributing to the formation of neo-minerals in the Lower Paleozoic reservoir. As a result, new data were obtained that contribute to a more accurate prediction of the reservoir properties of rocks of the Lower Paleozoic carbonate strata in the north-east of the Timan-Pechora petroleum province.

Keywords: *carbonate rock, sulfate-carbonate rock, reservoir sodium chloride brines, epigenetic change, Gamburtsev swell, Varandey-Adzva tectonic zone, Timan-Pechora petroleum province.*

For citation: Maydl' T.V., Mityusheva T.P., Ul'nyrov I.L., Nechaev M.S. Vliyanie sostava plastovykh rassolov na epigeneticheskie izmeneniya verkhnesiluriysko-nizhnedevonskikh karbonatnykh porod vala Gamburtseva (Timano-Pechorskaya neftegazonosnaya provintsiya) [The influence of the reservoir brines composition on epigenetic changes in the Upper Silurian-Lower Devonian carbonate rocks of the Gamburtsev swell (Timan-Pechora petroleum province)]. *Neftegazovaya Geologiya. Teoriya i Praktika*, 2024, vol. 19, no. 3, available at: https://www.ngtp.ru/rub/2024/22_2024.html EDN: BOOZTS

References

Antipova K.A. Rekonstruktsiya usloviy obrazovaniya i zaleganiya superkollektorov na bol'shikh glubinakh v rezul'tate fil'tratsii mul'tifaznykh flyuidov [Reconstruction of the conditions of formation and occurrence of supercollectors at great depths as a result of filtration of multiphase fluids]. *Stroitel'stvo neftyanykh i gazovykh skvazhin na sushe i na more*, 2012, no. 6, pp. 27-33. (In Russ.).

Bakhtin A.I., Kol'chugin A.N., Esikov A.A. Geokhimicheskie osobennosti osazhdeniya i ustoychivosti sulfatov kal'tsiya v prirode [Geochemical features of precipitation and stability of calcium sulfates in nature]. *Uchenye zapiski Kazanskogo universiteta*, 2012, vol. 154, no. 4, pp. 55-60. (In Russ.).

Belonin M.D., Budanov G.F., Danilevskiy S.A., Prishchepa O.M., Teplov E.L. *Timano-Pechorskaya provintsiya: geologicheskoe stroenie, neftegazonosnost' i perspektivy osvoeniya* [Timan-Pechora province: geological structure, oil and gas potential and development prospects]. St. Petersburg: Nedra, 2004, 396 p. (In Russ.).

Dushin A.S., Mel'nikov A.V., Fedorov A.I., Rykus M.V. Novaya flyuidodinamicheskaya model' karbonatnogo kollektora mestorozhdeniya im. R. Trebsa na osnove sinteza geologicheskikh i promyslovykh dannykh [A new fluid dynamic model of the carbonate reservoir of the R. Trebs field based on the synthesis of geological and field data]. *Neftegazovoe delo*, 2016, vol. 14, no. 2, pp. 13-23. (In Russ.).

Grunis E.B., Rostovshchikov V.B., Bogdanov B.P. Soli ordovika i ikh rol' v osobennostyakh stroeniya i neftegazonosnosti severo-vostoka Timano-Pechorskoy provintsii [Ordovician salts and their role in the structure and oil and gas potential of the northeast of the Timan-Pechora province]. *Georesursy*, 2016, vol. 18, no. 1. pp. 13-23. (In Russ.). DOI: [10.18599/grs.18.1.3](https://doi.org/10.18599/grs.18.1.3)

Kharaka Y.K., Gunter W.D., Aggarwal P.K., DeBraal J.D. *SOLMINEQ.88: a computer program for geochemical modeling of water-rock interactions*. US: Geological Survey Water-Resources, 1988, 420 p. DOI: [10.3133/wri884227](https://doi.org/10.3133/wri884227)

Machel H.G. Bacterial and thermochemical sulfate reduction in diagenetic settings-old and new insights. *Sedimentary Geology*, 2001, vol. 140, pp. 143-175. DOI: [10.1016/S0037-0738\(00\)00176-7](https://doi.org/10.1016/S0037-0738(00)00176-7)

Maydl' T.V. Litologiya i kollektory produktivnykh karbonatnykh otlozheniy nizhnego devona vala Gamburtseva [Lithology and reservoirs of productive carbonate strata of the Lower Devonian of the Gamburtsev swell]. *Geologiya i resursy goryuchikh iskopaemykh evropeyskogo Severa SSSR*, Syktyvkar: KF AN SSSR, 1989, pp. 34-46. (In Russ.).

Maydl' T.V., Zhemchugova V.A., Naumchev Yu.V. Geokhimicheskie predposylki vydeleniya predfranskogo nesoglasiya v devonskom razreze Timano-Pechorskogo osadochno-porodnogo basseyna [Geochemical prerequisites for the isolation of the pre-Frasnien unconformity in the Devonian section of the Timan-Pechora sedimentary rock basin]. *Vestnik Instituta geologii Komi NTs UrO RAN*, 2018, no. 285(9), pp. 30-38. (In Russ.). DOI: [10.19110/2221-1381-2018-9-30-38](https://doi.org/10.19110/2221-1381-2018-9-30-38)

Nikonov N.I., Bogatskiy V.I., Martynov A.V., Larionova Z.V., Laskin V.M., Galkina L.V., Dovzhikova E.G., Ermakova O.L., Kostygova P.K., Kuranova T.I., Moskalenko K.A., Pankratov Yu.A., Petrenko E.L., Popova E.V., Surina A.I., Shabanova G.A. *Atlas geologicheskikh kart «Timano-Pechorskiy sedimentatsionnyy basseyn»*. *Masshtab 1:2500000* [Atlas of geological maps "Timan-Pechora sedimentary basin". Scale 1:2500000]. Ukhta: TP NITs, 2000, 63 p. (In Russ.).

Prischepa O.M., Bogatskiy M.I., Makarevich V.N., Chumakova O.V., Nikonov N.I., Kuranov A.V., Bogdanov M.M. Novye predstavleniya o tektonicheskom i neftegazogeologicheskom rayonirovanii Timano-Pechorskoy neftegazonosnoy provintsii [The Timan-Pechora petroleum province - new tectonical insight]. *Neftegazovaya Geologiya. Teoriya I Praktika*, 2011, vol. 6, no. 4, available at: http://www.ngtp.ru/rub/4/40_2011.pdf (In Russ.). EDN: OYOEMB

Sakhibgareev R.S. Izmenenie kollektorov na vodonefityanykh kontaktakh [Changing collectors on oil and water contacts]. *DAN SSSR*, 1983, vol. 271, no. 6, pp. 1456-1460. (In Russ.).

Sotnikova A.G. Zony neftegazonakopleniya i prioritetye napravleniya vosproizvodstva zapasov nefiti v karbonatnykh kompleksakh Varandey-Adz'vinskogo avlakogena [Oil and gas accumulation zones and the priority directions of renewal of oil reserves in the carbonate complexes, Varandey-Adz'vinsky aulacogen]. *Neftegazovaya Geologiya. Teoriya I Praktika*, 2010, vol. 5, no. 1, available at: http://www.ngtp.ru/rub/6/4_2010.pdf (In Russ.). EDN: OYYSOP

Ul'nyrov I.L., Maydl' T.V. Litologiya, usloviya osadkonakopleniya i formirovanie porod-kollektorov verkhnesiluriyskikh karbonatnykh otlozheniy vala Gamburtseva (Timano-Pechorskaya neftegazonosnaya provintsiiya) [Sedimentation conditions, petrography and formation of reservoir rocks of the Upper Silurian Carbonate strata of the Cherpayu area on the Gamburtsev Swell (Timan-Pechora petroleum province)]. *Neftegazovaya Geologiya. Teoriya I Praktika*, 2023, vol. 18, no. 3, available at: http://www.ngtp.ru/rub/2023/26_2023.html (In Russ.). EDN: ZQRFWL

Zhemchugova V.A., Maslova E.E. Vtorichnaya dolomitizatsiya kak faktor, opredelyayushchiy kollektorskie svoystva nizhnedevoevskikh otlozheniy vostochnogo borta Khoreyverskoy vpadiny (Timano-Pechorskiy neftegazonosnyy basseyn) [Secondary dolomitization as a factor determining the reservoir properties of the Lower Devonian sediments of the eastern side of the Khoreyver depression (Timan-Pechora petroleum basin)]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 4: Geologiya*, 2020, no. 3, pp. 47-56. (In Russ.).

Zor'kin L.M., Subbota M.I., Stadnik E.V. *Neftegazoposkovaya gidrogeologiya* [Petroleum prospecting hydrogeology]. Moscow: Nedra, 1982, 216 p. (In Russ.).

Zytner Yu.I., Chibisova V.S. Gidrogeologicheskie kriterii prognoza neftegazonosnosti severnykh rayonov Timano-Pechorskoy neftegazonosnoy provintsii [Hydrogeological criteria for petroleum potential forecast (northern areas of Timan-Pechora petroleum province)]. *Neftegazovaya*

Geologiya. Teoriya I Praktika, 2013, vol. 8, no. 3, available at:
http://www.ngtp.ru/rub/4/35_2013.pdf (In Russ.). DOI: [10.17353/2070-5379/35_2013](https://doi.org/10.17353/2070-5379/35_2013)