

УДК 550.845(98)

ГИДРОГЕОХИМИЯ ПРОЦЕССОВ АУТИГЕННОГО МИНЕРАЛООБРАЗОВАНИЯ НА ПРИМЕРЕ ОКСФОРДСКОГО РЕГИОНАЛЬНОГО РЕЗЕРВУАРА НАДЫМ-ТАЗОВСКОГО МЕЖДУРЕЧЬЯ

Д.А. Новиков

Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, Новосибирск,

E-mail: NovikovDA@ipgg.sbras.ru

Впервые приведены материалы по численному физико-химическому моделированию взаимодействий в системе вода – горная порода на примере оксфордского регионального резервуара арктической зоны Западно-Сибирского мегабассейна. Установлено, что, несмотря на невысокую минерализацию подземных вод (до 67 г/дм³) и длительное взаимодействие их с горными породами (десятки, а возможно и сотни миллионов лет), равновесия с первичными (эндогенными) минералами альбитом, анортитом, микроклинном практически не наблюдается. В то же время подземные воды равновесны с такими минералами как парагонит, маргарит, иллит, мусковит, Са- и Na-монтмориллониты, каолинит и Mg-хлорит. На пути установления равновесия подземных вод с первичными алюмосиликатными минералами всегда выступает карбонатный барьер. Различия в составах подземных вод, равновесных с определёнными алюмосиликатами и карбонатами свидетельствуют о том, что минеральные новообразования формируются из раствора строго определённого химического состава в соответствующей геохимической среде.

Ключевые слова: гидрогеохимия, вода-порода, эволюция вод, катагенез, аутигенные минералы.

Выявление природы и гидрогеохимических механизмов преобразования осадочных пород нефтегазоносных отложений северных и арктических районов Западно-Сибирского мегабассейна (ЗСМБ) с учетом всестороннего изучения подземных вод, рассолов и вмещающих их пород с упором на постседиментационные изменения является одной из фундаментальных проблем современной геохимии. Методы и подходы к решению поставленных в настоящей работе задач были определены новыми теоретическими положениями, разработанными в недрах Сибирской гидрогеохимической школы профессором С.Л. Шварцевым, которые по глубине понимания механизмов эволюционного развития системы «вода-порода» не только не уступают мировому уровню, но и значительно превосходят зарубежные исследования аналогичного профиля. Долгое время эта проблема решалась чисто литологическими методами, но физико-химический механизм таких преобразований так и остался не раскрытым, поскольку эти исследования проводились в отрыве от состава подземных вод. В рамках настоящего исследования сделана попытка приблизиться к раскрытию этих механизмов через понятие гидрогенно-минерального комплекса [1].

Ключевую роль воде в геологических процессах и, как составной части минералов, играющей немаловажную роль в процессах их формирования и трансформации, отводил основатель гидрогеохимии – академик В.И. Вернадский. «Нет природного тела, которое могло бы сравниться с ней по влиянию на ход основных, самых грандиозных, геологических процессов. Нет земного вещества – минерала, горной породы, живого тела, которое бы ее не заключало. Все земное вещество – под влиянием собствен-

ных воде частичных сил, ее парообразного состояния, ее вездесущности в верхней части планеты – ею проникнуто и охвачено» [2].

Воды, независимо от генезиса и состава с момента попадания в осадочный бассейн вступают в сложнейшую цепь геохимических процессов в системе «вода – порода – газ – органическое вещество», которая носит четко выраженный равновесно-неравновесный характер [3]. Ее эволюция в течение длительного геологического времени приводит к формированию разных геохимических типов вод и минеральных фаз «...одни (первичные) минералы, растворяясь, дают начало другим (вторичным) минеральным фазам принципиально иного состава с переходом значительной части химических элементов в раствор. По мере изменения последнего меняется и состав вторичных минералов в строгом соответствии с законами термодинамики». «...взаимодействие воды с горными породами носит этапный характер, ...каждому этапу соответствует строго определенная ассоциация вторичных образований, концентрирующая соответствующий парагенетический комплекс химических элементов, и соответствующий геохимический тип воды. Этапы же взаимодействия определяются генетическим типом воды, характером ее круговорота, временем нахождения в горной породе и т.д.» [4].

С начала поисково-разведочных работ на нефть и газ в Западной Сибири накоплен огромный фактический материал, отражающий, как химизм подземных вод, так и результаты литологических исследований вмещающих пород. Основные закономерности вторичных изменений водо-, нефте- и газомещающих пород установлены в работах А.Г. Коссовской, Н.В. Логвиненко, Г.Н. Перозио, Г.Э. Прозорович, Р.С. Сахибгареева, К.Р. Чепикова, В.Д. Шутова и многих других [5-6]. Исследования, направленные на выявление общих закономерностей гидрогеологического строения, стратификации, латеральной и вертикальной гидрогеохимической зональности, геохимии и генезиса подземных вод ЗСМБ отражены в работах Ю.Г.Зиминой, А.Э. Конторовича, Н.М. Кругликова, А.Р. Курчикова, В.М. Матусевича, В.В. Нелюбина, Д.А. Новикова, Н.Н. Ростовцева, О.В. Равдоникас, Б.П. Ставицкого, С.Л. Шварцева О.Н. Яковлева и других [7-10].

Было установлено, что, несмотря на невысокую соленость исследуемых вод оксфордского резервуара (до 67 г/дм³) и очень длительное время взаимодействия их с горными породами (десятки, а возможно и сотни миллионов лет), равновесия с первичными (эндогенными) минералами альбитом, анортитом, микроклином практически не наблюдается. В то же время подземные воды равновесны с такими минералами как парагонит, маргарит, иллит, мусковит, Са- и Na-монтмориллониты, реже с каолинитом и Mg-хлоритом.

Детальный анализ имеющихся литологических исследований установил постдиагенетические изменения минералов и пород (пелитизация ПШ, карбонатизация обломков пород и др.). Количество базального и порового цемента заметно снижается с глубиной. Состав цемента широко представлен глинистыми и карбонатными разновидностями. Результаты рентгеноструктурного анализа осадочных пород свидетельствуют о качественных и количественных минералогических изменениях в глинах/аргиллитах и в составе

глинистого цемента песчаников/алевролитов. В песчаниках/алевролитах и глинах/аргиллитах с глубиной увеличивается доля гидрослюд и смешанно-слоистых образований, содержания хлорита в целом также увеличиваются. Распределение и количественные расчёты по составу глинистой составляющей как в песчаниках/алевролитах, так и в глинах/аргиллитах свидетельствуют о процессах стадийного изменения пород. Интенсивность преобразования минералов увеличивается с глубиной и в тех, и в других породах, но в глинах/аргиллитах на любой стадии количественные масштабы преобразования минералов выше. Однако, преобразование глинистых минералов в зернистых породах идёт иным путём, нежели в глинах – путём синтеза, т.е. осаждением из раствора.

Анализ термодинамических диаграмм с нанесением точек активностей компонентов состава подземных вод оксфордского регионального резервуара показал, что данные точки локализируются в основном в полях устойчивости слюдистых (мусковит, парагонит, маргарит) и глинистых (каолинит, иллит, монтмориллонит) минералов (рисунок 1). Ограниченное число точек попадает в поля устойчивости полевых шпатов, за исключением анортита.

На диаграммах стабильности магниевых минералов наблюдается плотное, практически линейное расположение точек в поле Mg-хлорита и Mg-монтмориллонита. Все воды насыщены относительно карбонатных минералов. Воды современных морей и океанов равновесны со слюдистыми минералами различного состава, изученные седиментогенные воды частично унаследуют это, а частично находятся в равновесии с глинистыми минералами: в системах Si-Al-Na, Si-Al-Ca - с каолинитом и монтмориллонитами соответствующего состава, а в системе Si-Al-K - с иллитом. Причем в системах Si-Al-Na и Si-Al-K отчетливо наблюдается смещение точек состава вод более погруженных горизонтов в поле полевых шпатов (альбита и микроклина). Такая направленность процесса подтверждается и литологическими наблюдениями: с глубиной возрастает встречаемость и количество новообразованного альбита и иллита в песчано-алевролитовых породах изучаемых отложений.

Каолинит же, не являясь устойчивым минералом, в ходе позднего катагенеза и особенно метагенеза в конечном итоге преобразуется в другие глинистые и слюдистые минералы и практически не встречается в породах метаморфических фаций.

Среди причин неравновесности системы вода-порода присутствует вынос подземными водами продуктов реакции гидролиза. Одна из ее особенностей, как видно из примера: $2\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8 + 6\text{H}_2\text{O} = \text{Al}_4\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8 + 2\text{Ca}^{2+} + 4\text{OH}^-$, состоит в том, что при ее реализации в растворе образуется гидроксильная группа OH^- , уравнивающая заряд подвижных катионов.

Естественно, чем больше катионов переходит при гидролизе в раствор, тем больше концентрация OH^- и тем выше значение pH этого раствора. Следовательно, гидролиз сопровождается образованием щелочи в растворе. Однако практически вся образующаяся при гидролизе щелочность нейтрализуется параллельно формирующимися кислотными продуктами.

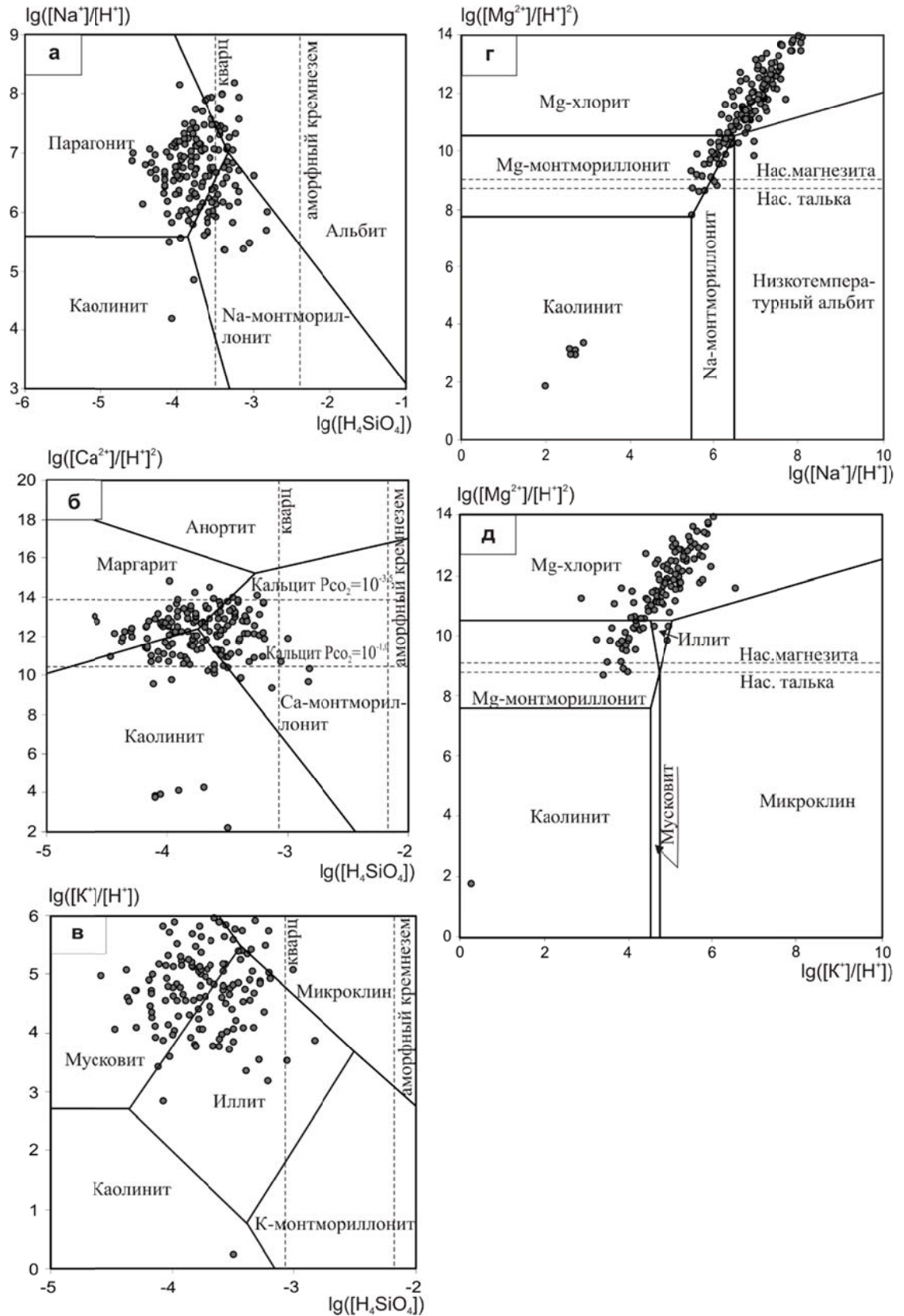


Рисунок 1. Диаграммы стабильности минералов в системах Si-Al-Na (а), Si-Al-Ca (б), Si-Al-K (в), $HCl-H_2O-Al_2O_3-CO_2-MgO-Na_2O-SiO_2$ (г), $HCl-H_2O-Al_2O_3-CO_2-MgO-K_2O-SiO_2$ (д) при $100^\circ C$ с нанесением точек состава подземных вод оксфордского регионального резервуара Надым-Тазовского междуречья

Прежде всего это углекислый газ, который, взаимодействуя с OH^- по реакции: $\text{CO}_2 + \text{OH}^- = \text{HCO}_3^-$, формирует гидрокарбонат-ион, что и подтверждается фактическими данными. Тем самым обеспечивается непрерывная нейтрализация одного из продуктов реакции гидролиза и формирование подземных вод гидрокарбонатного типа значительно более кислых, чем это было бы в отсутствие CO_2 . Образующийся ион HCO_3^- в конечном итоге связывается в форме карбонатов. Это обеспечивает непрерывный строго направленный процесс химического связывания продуктов гидролиза в виде инертной твердой фазы [11].

Итогом физико-химических расчётов стало выявление различий в составе подземных вод оксфордского резервуара, равновесных с различными вторичными и в исключительных случаях с первичными алюмосиликатными минералами. Установлено, что основными контролирующими факторами при эволюционном развитии системы является pH среды и концентрация в растворе кремнезёма. На пути установления равновесия подземных вод с первичными алюмосиликатными минералами всегда выступает карбонатный барьер. Анализ изменения значений pH и содержаний H_4SiO_4 в подземных водах, равновесных с последовательно расположенными минералами от глинистых к эндогенным алюмосиликатам, свидетельствуют о закономерном возрастании величин этих показателей и в общем виде подчиняется схеме эволюции системы вода-порода в зоне гипергенеза. Установлено, что формирование широко распространённого каолинитового цемента протекает в около нейтральной среде (в среднем $\text{pH} = 7,2$) при концентрации кремнезёма в растворе 15-20 мг/дм³. Различные содержания катионов (K^+ , Na^+ и Mg^{2+}) в составе подземных вод, равновесных с алюмосиликатными минералами являются следствием количественных и качественных вариаций их вхождения в кристаллическую структуру глинистых и слюдистых минералов, а также ионно-обменными свойствами глин.

Таким образом, различия в составах подземных вод, равновесных с определёнными алюмосиликатами и карбонатами свидетельствуют о том, что минеральные новообразования формируются из раствора строго определённого химического состава в соответствующей геохимической среде. Решающее влияние на результат гидролиза силикатов оказывает содержание в пластовых водах соединений кремния. Более низкие концентрации H_4SiO_4 приводят к образованию иллита, более высокие к образованию хлоритов и проявления процессов вторичной альбитизации (рисунок 2).

Неравновесность системы вода – первичные алюмосиликаты приводит к непрерывному геологически длительному процессу их растворения с образованием все новых и новых разнообразных вторичных минералов. При этом в воде концентрируются те химические элементы, которые не связываются минеральными фазами (хлор, натрий, иногда кальций, фтор и др.). Все это определяет целенаправленное изменение состава подземных вод.

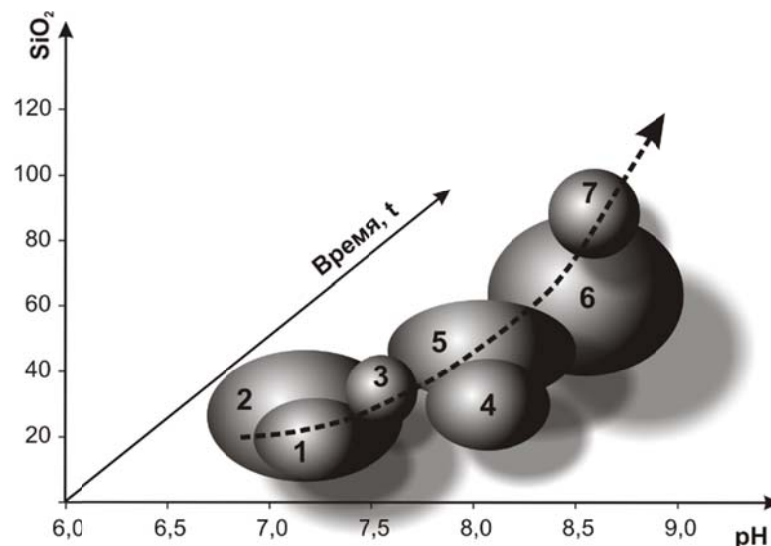


Рисунок 2. Модель последовательной смены гидрогенно-минеральных комплексов в пределах оксфордского регионального резервуара Надым-Тазовского междуречья

Гидрогенно-минеральный комплекс: 1 – каолиновый, 2 – монтмориллонитовый, 3 – иллитовый, 4 – слюдяной, 5 – хлоритовый, 6 – альбитовый, 7 – микроклиновый.

Постепенное концентрирование химических элементов в растворе по мере увеличения времени контактирования воды с породой приводит к неравномерному их накоплению. При этом каждому этапу взаимодействия воды с горными породами соответствует определенная ассоциация вторичных образований и определенный химический состав подземных вод.

Резюмируя вышесказанное можно сделать следующие выводы: 1) В пределах оксфордского регионального резервуара Надым-Тазовского междуречья развиты подземные воды от практически пресных до слабых рассолов (до 67 г/дм^3) преимущественно хлоридного натриевого, хлоридного гидрокарбонатного натриевого состава. Несмотря на очень длительное взаимодействие их с горными породами (десятки, а возможно и сотни миллионов лет), равновесия с первичными (эндогенными) минералами альбитом, анортитом, микроклином практически не наблюдается. В то же время подземные воды равновесны с такими минералами как парагонит, маргарит, иллит, мусковит, Са- и Na-монтмориллониты, реже с каолинитом и Mg-хлоритом. 2) Впервые выявлены различия в составе подземных вод, равновесных с различными вторичными и в исключительных случаях с первичными алюмосиликатными минералами. Установлено, что основными контролирующими факторами при эволюционном развитии системы является pH среды и концентрация в растворе кремнезёма. На пути установления равновесия подземных вод с первичными алюмосиликатными минералами всегда выступает карбонатный барьер. 3) Различия в составах подземных вод, равновесных с определёнными алюмосиликатами и карбонатами свидетельствуют о том, что минеральные новообразования формируются из раствора строго определённого химического состава в соответствующей геохимической среде. Решающее влияние на результат гидролиза

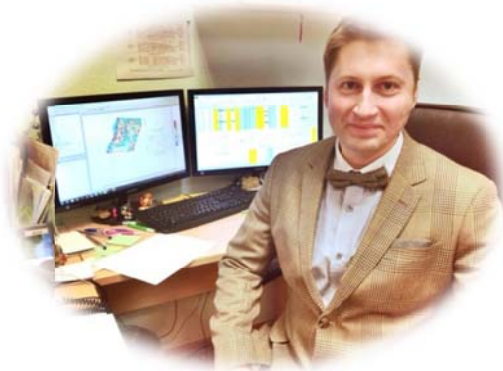
силикатов оказывает содержание в пластовых водах соединений кремния. Более низкие концентрации H_4SiO_4 приводят к образованию иллита, более высокие к образованию хлоритов и проявления процессов вторичной альбитизации. 4) Термодинамический анализ вместе с детальными исследованиями геохимии подземных вод позволил впервые создать концептуальную модель последовательной смены гидрогенно-минеральных комплексов в пределах верхнеюрских отложений Надым-Тазовского междуречья. Установлено, что в условиях неравновесно-равновесной системы вода-порода формирование аутигенных минералов происходит непрерывно и строго последовательно (каолинит – монтмориллонит – иллит – слюды – хлорит – альбит – микроклин) при строго определенных геохимических параметрах среды (рН, концентрации в растворе SiO_2 , Al, Na, K, Ca, Mg). Время в геологической эволюции системы вода – порода играет ключевую роль и по мере ее развития формируются более сложные гидрогенно-минеральные комплексы устойчивые к ужесточающимся термобарическим условиям зоны катагенеза.

Исследования проводились при финансовой поддержке Проекта IX.131.3.2. «Геохимия, генезис и механизмы формирования состава подземных вод арктических районов осадочных бассейнов Сибири» Программы IX.131.3. «Эволюция гидрогеологических систем осадочных бассейнов Сибири» Приоритетного направления IX.131. «Геология месторождений углеводородного сырья, фундаментальные проблемы геологии и геохимии нефти и газа, научные основы формирования сырьевой базы традиционных и нетрадиционных источников углеводородного сырья» и Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 14-05-00868-а, 16-05-00945-а).

ЛИТЕРАТУРА

1. Шварцев С.Л. Прогрессивно самоорганизующиеся абиогенные диссипативные структуры в геологической истории Земли // Литосфера. 2007. № 1. С.65-89.
2. Вернадский В.И. История минералов земной коры. // История природных вод. Т. II. Часть 1. Вып. 1. Л.: Госхимтехиздат. 1933, 202 с.
3. Шварцев С.Л. Взаимодействие воды с алюмосиликатными горными породами. Обзор // Геология и геофизика. 1991. № 12. С.16-50.
4. Шварцев С.Л. К динамике водного концентрирования и рассеивания химических элементов в земной коре // Геология и геофизика. 1993. № 6. С. 24-32.
5. Перозии Г.Н. Определение времени формирования месторождений нефти и газа на основании детального изучения региональных преобразований терригенных пород на примере Западно-Сибирской плиты // Время формирования залежей нефти и газа. М.: Наука. 1976. С. 72-84.
6. Сахибгареев Р.С. Вторичные изменения коллекторов в процессе формирования и разрушения нефтяных залежей. Л.: Недра. 1989. 260 с.
7. Гидрогеология СССР. Т. XVI: Западно-Сибирская равнина (Тюменская, Омская, Новосибирская и Томская области) / Нуднер В.А. М.: Недра. 1970. 368 с.
8. Кругликов Н.М., Нелюбин В.В., Яковлев О.Н. Гидрогеология Западно-Сибирского нефтегазоносного бассейна и особенности формирования залежей углеводородов. Л.: Недра. 1985. 279 с.

9. Шварцев С.Л., Новиков Д.А. Природа вертикальной гидрогеохимической зональности нефтегазоносных отложений (на примере Надым-Тазовского междуречья, Западная Сибирь) // Геология и геофизика. 2004. Т. 45. № 8. С. 1008-1020.
 10. Матусевич В.М., Рыльков А.В., Ушатинский И.Н. Геофлюидалльные системы и проблемы нефтегазоносности Западно-Сибирского мегабассейна. Тюмень.; ТюмГНГУ. 2005. 225 с.
 11. Шварцев С. Л., Рыженко Б.Н., Алексеев В.А. Геологическая эволюция и самоорганизация системы вода–порода. Т.2: Система вода–порода в условиях зоны гипергенеза. Новосибирск: СО РАН. 2007. 389 с.
-



Новиков Дмитрий Анатольевич. Кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией гидрогеологии осадочных бассейнов Сибири Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука (ИНГГ СО РАН), доцент кафедры геологии месторождений нефти и газа НГУ.