

Факторы образования газовых скоплений в нефтеносных отложениях и затрубном пространстве нефтяных скважин

Р.Р. Хасанов¹, Р.И. Сафуанов¹, В.А. Судаков^{1*}, Д.И. Хасанов¹, Б.Г. Ганиев²,

А.А. Лутфуллин², Р.Р. Афлятунов²

¹Казанский федеральный университет, Казань, Россия

²ПАО «Татнефть», Альметьевск, Россия

Одной из важных задач нефтегазовой геологии является изучение газовой компоненты, которая в различных формах может присутствовать в толщах осадочных пород. Большой интерес представляет азот, газообразные скопления которого образуются в нефтеносных пластах, вызывая осложнения при разработке месторождений. Большую актуальность проблема аномальных скоплений азота приобрела на месторождениях Волго-Уральской нефтегазоносной провинции, относящейся к числу длительно разрабатываемых с большим фондом скважин различного назначения. В настоящей статье рассмотрены возможные источники газообразного азота и причины его скоплений в нефтеносных пластах. Основная цель статьи заключается в выяснении причин образования газообразного азота и его залежей. На основе анализа данных промысловых, гидрогеологических и геолого-геофизических исследований выявлены основные закономерности площадного распределения скоплений азотного газа в нефтеносных пластах. Установлено, что при формировании газовых шапок источником газообразного азота являются его растворенные соединения в подземных водах и нефти, биохимическое разложение которых приводит к накоплению в жидкой среде растворенного молекулярного азота. Выделение свободного газообразного азота и формирование его скоплений связано с декомпрессией пластовых вод по естественным (геологическим) или техногенным причинам (добыча углеводородного сырья). Нарушение естественного гидродинамического режима в нефтеносных пластах приводит к выделению газообразного азота и формированию его скоплений при благоприятных условиях (наличие коллекторов, структур и непроницаемых пород в кровле пласта).

Ключевые слова: газы, азот, нефтеносные пласты, растворенные формы, органические вещества, микробная деятельность

Для цитирования: Хасанов Р.Р., Сафуанов Р.И., Судаков В.А., Хасанов Д.И., Ганиев Б.Г., Лутфуллин А.А., Афлятунов Р.Р. (2020). Факторы образования газовых скоплений в нефтеносных отложениях и затрубном пространстве нефтяных скважин. *Георесурсы*, 22(4), с. 22–29. DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2020.4.22-29>

Введение. Газы являются естественным компонентом нефтегазоносных бассейнов, где они встречаются в растворенном виде в составе подземных вод и нефтей. К числу основных относятся углеводородные газы (метан, пропан, изобутан и др.), сероводород, водород, углекислый газ, а также азот, аргон и гелий (Зорькин, 1973, 2008). Они имеют различный генезис, характеризуются разными концентрациями, соотношениями, закономерностями распределения. Изучение формы нахождения и состава газовой компоненты в осадочных толщах нефтегазоносных территорий является важной задачей в связи с добычей попутного нефтяного газа (Суббота и др., 1980). В результате интенсификации разработки углеводородов все большее внимание привлекают также скопления газообразного (свободного) азота, которые характерны для многих палеозойских нефтегазоносных бассейнов с эвапоритовыми толщами, хлоридно-кальциевыми рассолами и высокосернистыми нефтями (Трунова, 2005; Тихомиров, 2014). Свободные газы находятся в пустотном пространстве пород под высокими давлениями и выделяются при их вскрытии скважинами (Тихомиров, 2014).

В большом количестве скопления (залежи) газообразного азота встречаются в пределах Волго-Уральской нефтегазоносной провинции (Республика Татарстан), где проблема их вскрытия при буровых работах приобрела большую актуальность. Данная территория относится к старым нефтепромысловым регионам с большим фондом скважин различного назначения и длительным периодом разработки месторождений.

Как показывает практика бурения, наличие газовых скоплений азота может создавать значительные трудности при геологоразведочных работах на нефть. Азотопроявления в ходе бурения скважин часто приводят к осложнениям и аварийным ситуациям, оказывают негативное воздействие на технологические процессы, ухудшая технологии кольматации газопроявляющих интервалов, создают проблемы при утилизации низкокалорийного попутного нефтяного газа (ПНГ). В связи с этим важной задачей является выяснение причин и факторов, способствующих формированию азотных газовых залежей в нефтеносных пластах.

В настоящей работе рассматриваются закономерности размещения газовых шапок, зональное распределение азотосодержащих пластов в продуктивных отложениях среднего карбона и нижнего карбона на территории Южно-Татарского свода, а также возможные причины их образования с целью разработки методологии выявления и локализации залежей азота.

* Ответственный автор: Владислав Анатольевич Судаков
E-mail: sudakovav@gmail.com

© 2020 Коллектив авторов

Объект и методы исследований. Интенсивные азотопроявления, представляющие собой скопления (залежи) газообразного азота, выявлены при бурении на участках Налимовского поднятия Ново-Елховского нефтяного месторождения. Исследуемый участок находится на востоке Европейской части России в юго-восточной части Республики Татарстан (рис. 1). Ново-Елховское месторождение локализовано на западном склоне Южно-Татарского свода и контролируется одноименной положительной структурой, приуроченной к одноименному блоку кристаллического фундамента. Ново-Елховский блок фундамента ограничен Кузайкинским (с запада) и Алтунино-Шунакским (с востока) субмеридиональными глубинными разломами (Геология Татарстана..., 2003, Войтович, 1998), которые в структуре осадочного чехла выражены как Кузайкинский и Алтунино-Шунакский прогибы. Эти прогибы оконтуривают Акташско-Ново-Елховский вал, который, в свою очередь, осложнен положительными, как правило, нефтеносными структурами третьего порядка – поднятиями. В геологическом строении Ново-Елховского месторождения принимают участие докембрийские, девонские, каменноугольные, пермские, неогеновые и четвертичные отложения. Нефтеносность Ново-Елховского месторождения охватывает терригенные и карбонатные отложения верхнего девона, карбонатные и терригенные толщи пород нижнего карбона, преимущественно карбонатные отложения среднего карбона. Основными продуктивными горизонтами на месторождении являются девонские отложения кыновского и пашийского горизонтов нижнефранского подъяруса. Отложения среднего и нижнего карбона, несмотря на их нефтеносность, до настоящего времени изучены слабо. В то же время структурно-тектонические, горно-геологические и гидрогеологические особенности отложений нижнего и среднего карбона имеют большое значение для

разработки месторождения. Структурный план отложений нижнего карбона более дислоцирован по сравнению с отложениями девона. Он включает в себя большое число нефтеносных поднятий с амплитудой 60–70 м, разделенных закономерно расположенной сетью прогибов третьего порядка, представляющих собой зоны повышенной проницаемости. В этих отложениях отмечаются проявления различных газов, из которых наибольшее значение имеет азот. По данным бурения, значительные по масштабам газовые скопления азота выявляются в нефтеносных пластах девона и карбона.

В данной статье рассмотрены газовые скопления и залежи азота в нефтеносных пластах Налимовского поднятия (рис. 1), где они связаны с отложениями московского яруса, который на рассматриваемой территории представлен (снизу-вверх) верейским, каширским, подольским и мячковским горизонтами. Газовые скопления представлены практически чистым азотом с небольшой примесью углеводородных газов (содержание азота в газовой смеси превышает 90%).

Промышленной нефтеносностью обладают отложения верейского горизонта, которые имеют на месторождении мощность до 50 метров и сложены переслаиванием терригенных (алевролиты, аргиллиты) и карбонатных (известняки, доломиты, мергели) пород (Геология Татарстана..., 2003). В нижней части горизонта залегают серые органогенно-обломочные участками глинистые известняки с подчиненными прослоями глин и алевролитов. Породы обладают повышенными коллекторскими свойствами и являются нефтеносными. В верейском горизонте выделяются до семи пластов (снизу вверх: $C_{2вр-1}$ – $C_{2вр-7}$), из которых промышленная нефтеносность связана только с пластами $C_{2вр-2}$ и $C_{2вр-3}$. Остальные пласты на рассматриваемой территории сложены низкоёмкими разностями (глины и карбонатные породы) и не могут рассматриваться

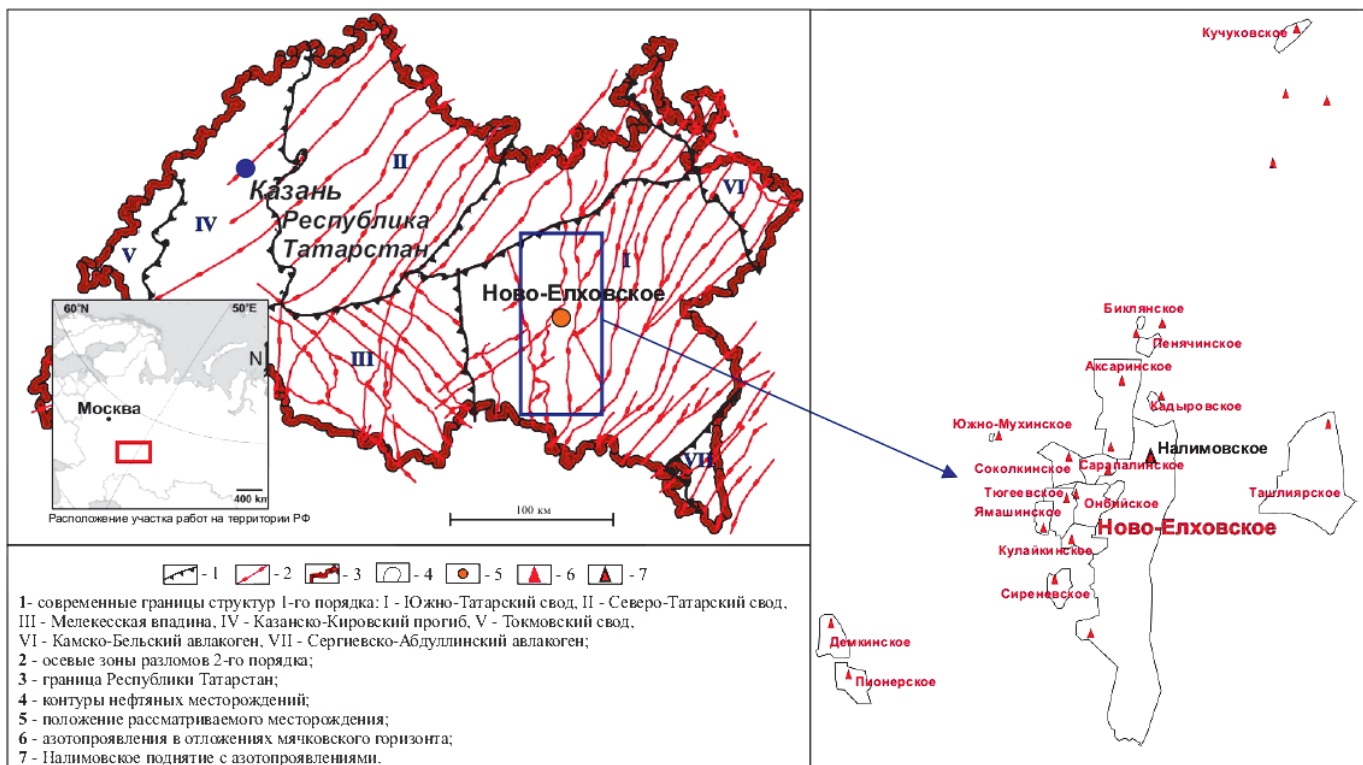


Рис. 1. Обзорная схема азотопроявлений на западном склоне Южно-Татарского свода

в качестве пластов-коллекторов. Каширский горизонт сложен органогенно-обломочными известняками и доломитами. Подольский горизонт представлен микро- и тонкозернистыми, плотными доломитами и известняками с прослоями аргиллитов. В сложении мячковского горизонта принимают участие неравномернозернистые, известняки и доломиты с включениями гнезд гипса, ангидрита и с прослойками аргиллита.

Основная цель работы сводится к выяснению причин образования азотно-газовых скоплений на основе анализа их латерального распределения в продуктивных коллекторах каменноугольных отложений (верейский горизонт), связи с тектоническим строением территории и содержаниями растворенного азота в нефти и подземных водах в нефтяных пластах.

Для выявления особенностей площадного распределения газовых шапок и аномальных скоплений азота проведен анализ некоторых региональных закономерностей геологического и структурно-тектонического строения территории исследований и их возможного влияния на формирование пластов, содержащих азотопроявления в виде газовых скоплений и залежей.

Результаты и обсуждение. По результатам бурения скважин установлено, что газовые скопления азота приурочены к положительным структурам, осложняющим Налимовское поднятие. В целом зоны азотопроявления в отложениях московского яруса охватывают диапазон глубин 450–650 м, неравномерно распределяясь по разрезу. Их максимальные проявления связаны с отложениями верейского и мячковского горизонтов. В отложениях верейского горизонта газопроявления азота встречаются в пластах C_2 вр-2, C_2 вр-3, C_2 вр-4, и C_2 вр-5, где их интенсивность нарастает вверх по разрезу. Газовые скопления локализуются в купольных участках положительных нефтеносных структур. Газовые скопления представлены преимущественно смесью углеводородных газов с преобладанием азота. По данным нефтегазодобывающего управления «Елховнефть» ПАО «Татнефть», содержание азота в газовой смеси варьирует от 84,7 до 93,7%, с нарастанием вверх по разрезу. Накопление газов в купольной части структуры приводит к формированию газонефтяного контакта и оттеснению нефтяной оторочки, что, в свою очередь, препятствует разработке залежи в ее центральной части и вынужденной разработке по периферийным участкам.

В то же время следует отметить, что наибольшее количество азотопроявлений связано с отложениями мячковского горизонта, где они характеризуются большими масштабами. Для выяснения их природы рассмотрены геологические условия и площадное распределение участков скопления азотного газа.

Комплексный анализ факторов, которые могли оказать существенное влияние на формирование зон скопления азотного газа, показал, что наибольшее значение имеет структурно-тектонический фактор. Структурный план осадочного чехла Южно-Татарского свода является отражением блокового строения кристаллического фундамента (Войтович, 1998; Ларочкина, 1993), обусловленного наложением серий глубинных разломов двух ортогональных направлений: 1) северо-западного – северо-восточного и 2) субширотного – субмеридионального.

Пространственное размещение газовых скоплений находится в тесной зависимости от тектонического строения района исследований. На карте, где показана система разломов кристаллического фундамента (рис. 2), достаточно хорошо прослеживается связь расположения мест азотопроявлений (красные треугольники) с зонами разломов кристаллического фундамента.

В пределах Ново-Елховской структуры инциденты азотопроявлений наблюдаются почти вдоль всего Кузайкинского прогиба (разлома) и частично вдоль северной части Алтунино-Шунакского прогиба (разлома). Это объяснимо, если принять во внимание, что разломы представляют собой зоны повышенной трещиноватости пород, которые обладают высокой проницаемостью для флюидов. На это указывают признаки гидротермальной деятельности, обнаруженные в разломах кристаллического фундамента (Khasanov et al., 2017). Можно предположить возможность вертикальной миграции азота и его соединений в составе пластовых флюидов. По мнению (Хант, 1982), источником азота служит дегазация пород фундамента, о чем может свидетельствовать присутствие в природном газе в качестве сопутствующего компонента гелия. При этом, азотопроявления располагаются либо вне зон активного вертикального флюидообмена, либо на их периферии. Также обращает на себя внимание тот факт, что зона Алтунино-Шунакского прогиба, являющаяся геодинамически более активной, не содержит установленных азотопроявлений. Это может быть объяснено отсутствием благоприятных условий для формирования газовых скоплений (отсутствие соответствующих структур и флюидоупоров).

Отчасти такое предположение подтверждается результатами анализа карты линеаментов (рис. 3), которая построена по данным анализа цифровой карты рельефа и геологического дешифрирования спутниковых данных и отражает макропроницаемость осадочного чехла. Анализ карты позволяет провести прогноз областей с повышенной или пониженной проницаемостью осадочного чехла.

На карте видно, что практически все случаи азотопроявлений приурочены к областям с высокой плотностью линеаментов, что указывает на то, что для формирования

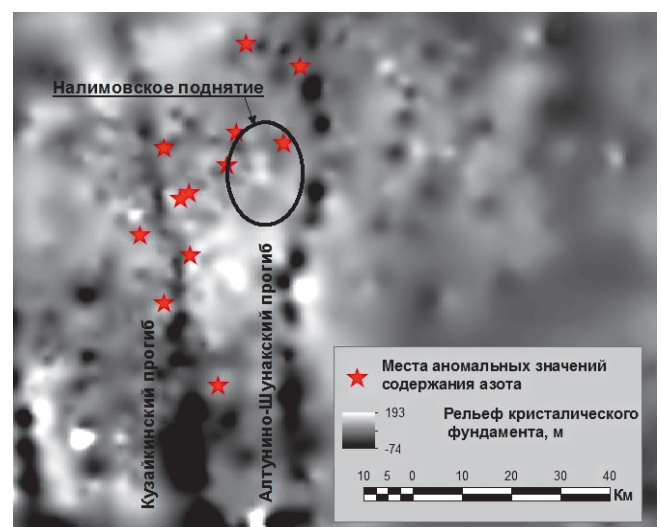


Рис. 2. Карта рельефа кристаллического фундамента на западном склоне Южно-Татарского свода

зон высокого содержания азота необходимо наличие хорошо развитых субвертикальных проводящих каналов (трещин) и наличие в верхних структурных этажах осадочного чехла латеральных водоупоров.

Связь проявлений свободного азота с зонами разломов указывает на нарушения гидродинамического режима и формирование проницаемых участков пород, способствующих миграции и накоплению при наличии флюидоупоров газовых скоплений и залежей.

Однако открытым остается вопрос об источниках азота. В связи с этим рассмотрим его содержание во флюидной (нефть, вода) компоненте нефтеносных комплексов Ново-Елховского месторождения. Азот является распространенным компонентом подземных вод и нефтей Волго-Уральской нефтегазоносной провинции (Хамидуллин и др., 2000), где он присутствует в растворенном состоянии в виде N_2 . В составе пластовой нефти каменноугольных отложений в пределах Ново-Елховского месторождения его содержания колеблются в пределах 0,13–0,73 (масс.%) и в пределах 10,46–26,42 (% моль) в составе газа однократного разгазирования. Газосодержание в нефтях верейского горизонта составляет 3–7 м³/т при температуре 23°C в пласте.

Подземные воды каменноугольных отложений также содержат растворенные газы. По химическому составу пластовые воды верейского горизонта на Ново-Елховском месторождении относятся к рассолам хлоркальциевого типа (Сулин, 1948) с общей минерализацией в пределах 77–201 г/дм³, однако в отложениях того же горизонта на некоторых участках соседнего Ромашкинского месторождения распространены соленые воды с общей минерализацией 19–124 г/дм³. Газонасыщенность подземных вод в терригенно-карбонатных отложениях верейской свиты в пределах Южно-Татарского свода составляет 90–170 м³/м³ (воды) (Хисамов и др., 2009). Водорастворенный газ имеет преимущественно азотный состав. Содержания

водорастворенного азота в подземных водах изученных пластов варьирует от 50 до 150 м³ на 1 м³ воды (Хисамов и др., 2009). Азот характеризуется низкой растворимостью, и столь высокие его содержания в подземных водах обусловлены высоким пластовым давлением. Пластовое давление в подземных водах верейского горизонта по Ново-Елховскому месторождению достигает 6,0–8,0 МПа.

Азот является одним из наиболее распространенных химических элементов на Земле. В природе он может присутствовать в составе химических соединений с другими элементами и газообразном состоянии в виде двухатомной молекулы N_2 . Содержание газообразного азота в атмосферном воздухе составляет более 78% по объему. В растворенном состоянии азот присутствует в любых видах природных вод, где он также присутствует в виде ионов растворимых химических соединений или растворенного газа. Главными компонентами являются ионы аммония (NH_4), нитратов (NO_3), нитритов (NO_2) и молекулярного азота (N_2). Азот в виде N_2 присутствует в газообразной растворенной форме. Растворимость азота в воде низкая и составляет 23,6 мл/л (29,5 мг/л) при 0°C и парциальном давлении 0,1 МПа. При увеличении температуры растворимость азота уменьшается, а повышение давления приводит к росту растворимости. По закону Генри-Дальтона при постоянной температуре растворимость в данной жидкости каждого из компонентов газовой смеси, находящейся над жидкостью, пропорциональна их парциальному давлению (Глинка, 2003). Исходя из этого, растворенный в воде газ будет стремиться прийти в равновесие с парциальным давлением этого газа в атмосфере, а газ, растворенный в подземных водах, соответственно, стремится прийти к равновесию с давлением этого газа в газовых шапках. При содержании газа в воде меньше, чем это необходимо для обеспечения равновесия с газом в газовой среде, происходит поглощение газа водой, а при высоком содержании газа наблюдается его выделение (дегазация жидкости).

Азот в природе имеет смешанное биогенное и глубинно-абиогенное происхождение (Лукин, Донцов, 2009). В подземных водах верхних горизонтов земной коры азот в основном имеет атмосферное происхождение, и его содержание обусловлено парциальным давлением азота в атмосферном воздухе. Азот абиогенного (мантийного) генезиса поступает на поверхность в областях современного вулканизма, откуда он может попасть в состав подземных вод. В подземных водах нефтегазоносных районов азот имеет гетерогенную природу (азот, выделившийся из осадков при их уплотнении, атмосферный азот, биогенный азот, образовавшийся при разложении органических веществ). Однако, в силу специфики состава подземных вод его значительную долю составляет биогенный азот, образование которого связано с разложением как органического вещества осадочных пород, так и растворенных нефтяных фракций.

Чтобы понять источники появления и причины концентрации в подземных водах растворенного азота, рассмотрим формы его нахождения в подземных водах нефтеносных отложений. Как уже упоминалось, азот в природных водах присутствует в виде ионов аммония (NH_4), нитратов (NO_3), нитритов (NO_2) и молекулярного азота (N_2). В подземные воды они попадают в составе вод

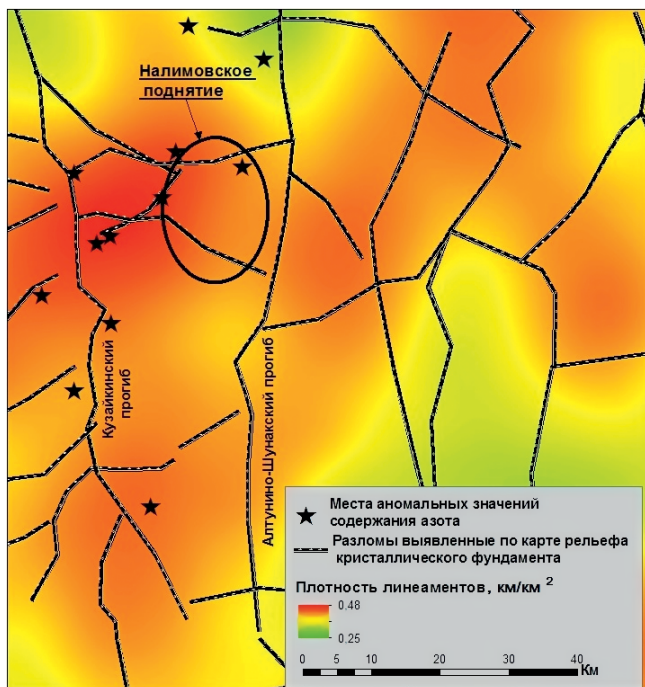


Рис. 3. Карта плотности линеаментов на западном склоне Южно-Татарского свода

верхних горизонтов земной коры, могут образовываться и непосредственно на месте. В последнем случае источником азота в подземных водах нефтегазоносных бассейнов являются в основном рассеянное органическое вещество (ОВ) осадочных пород, угольных пластов (Littke et al., 1995) и сами осадочные породы. В осадочных породах его содержание достигает 170–1200 г/т (Зорькин, 1973, 2008). Значительные количества угольных ресурсов в Татарстане связаны с отложениями нижнего карбона (визейский ярус). Кроме того в нефтеносных пластах источником азота может служить растворенное нефтяное вещество. Подземные воды нефтеносных пластов представляют собой крепкие хлор-кальциевые рассолы, которые способствуют разрушению органических молекул, в том числе протеиновых, в состав которых в основном входят атомы азота. В разложении органических молекул участвуют также микроорганизмы, распространенные на границе раздела воды и нефти. Для своей жизнедеятельности подобные бактерии могут использовать углеводороды различного типа, а также азотсодержащие органические вещества. В результате сложного химического и биохимического распада уменьшается содержание нормальных алканов (рост коэффициента «изобутан/бутан»), а состав азотсодержащих органических веществ упрощается до аммиака (NH_3) и аммония (NH_4), которые окисляются до нитратов и нитритов (Freedman, 1995). Этот процесс осуществляется нитрифицирующими бактериями в две стадии. Одна группа бактерий преобразуют аммиак в нитрит, а другая окисляет нитрит в нитрат. Продукты нитрификации (NO_3^-) и (NO_2^-) в дальнейшем подвергаются денитрификации. Процесс денитрификации также протекает в результате деятельности денитрифицирующих бактерий, которые осуществляют жизнедеятельность в бескислородной среде. Эти бактерии обладают способностью отнимать кислород от нитратов, восстанавливая нитрат через нитрит до газообразной закиси азота (N_2O) и газообразного азота (N_2) (Skiba, 2008).

Кроме этого, образование газообразного азота может быть связано с процессом анаммокса (анаэробное окисление аммония), который также осуществляется бактериальными сообществами (Reimann et al., 2005). В ходе анаммокса нитрит-ион и ион аммония превращаются непосредственно в молекулярный азот (Strous et al., 1999): $\text{NH}_4^+ + \text{NO}_2^- \rightarrow \text{N}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$. Анаммокс был описан в горячих источниках при температурах 36–52°C (Andrea Jaeschke et al., 2009) и в гидротермальных источниках вдоль Срединно-Атлантического хребта при температурах 60–85°C (Bugne et al., 2009). Эти условия близки к условиям пластовых вод верейского горизонта, минерализация которых составляет в среднем около 77–201 г/дм³ при температурах 23–25°C. В этой связи следует особо подчеркнуть, что Ново-Елховское месторождение разрабатывается в течение длительного периода времени. Закачка с целью интенсификации нефтедобычи в пласты поверхностной пресной воды, а также подготавливаемой сточной воды, содержащих инородную микробиоту и растворенный кислород, значительно меняет как состав бактериальных штаммов, так и физико-химические и термодинамические свойства подземных вод, что приводит к изменению их газового состава (Хисамов и др., 2009). В частности, происходит снижение общей минерализации

вод до уровня соленых (в пределах Ромашкинского месторождения отмечены значения до 19 г/дм³). Можно предположить, что локально изменившиеся условия являются благоприятными для развития различных микробиальных процессов, в т.ч. нитрификации и анаммокса, и способствуют образованию водорастворенного газообразного азота (N_2) в подземных водах нефтеносных отложений. Высокая концентрация азота в пределах Волго-Уральского нефтегазоносного бассейна в подземных водах и в составе попутных газов нефтей по данным (Зорькин, 1973, 2008) может быть связана преимущественно с высоким содержанием в органическом веществе протеина. Содержание растворенного аммония NH_4^+ в подземных водах верейского горизонта в пределах Ново-Елховского месторождения составляет 72,9–90,6 мг/дм³ (Хисамов и др., 2009).

Таким образом, источником азота для формирования азотных газовых шапок (содержание азота в газовой смеси составляет 84–93%) являются пластовые воды, где образование молекулярного азота связано с массовым разложением молекул органического вещества. Высокие концентрации растворенного азота в подземных водах нельзя объяснить его привнесом из нижележащих горизонтов земной коры (Хант, 1982) по зонам разломов ввиду того, что величина пластовых давлений в ненарушенных пластах выше, чем в зонах разломов.

Выделение газообразного азота из подземных вод и его накопление в виде самостоятельных залежей и шапок связано с декомпрессией пластовых вод. В зонах пониженного давления растворенный азот стремится к равновесию с давлением окружающей среды.

Причины возникновения локальных участков пониженного давления могут быть *геологическими* и *техногенными*.

К основным геологическим причинам относятся образование разломов в земной коре, опускание более плотных минерализованных растворов (в соленосных бассейнах) и др. Тектонический фактор контролирует расположение природных газовых залежей. Зоны разломов являются проницаемыми участками земной коры, где может происходить снижение гидростатического давления. В зоне пониженного давления происходит дегазация подземных вод с выделением избыточного количества газов. Основная часть газов удаляется в атмосферу, однако некоторая часть может задерживаться в естественных ловушках (наличие пород-коллекторов, положительных структур, флюидоупоров) и образовывать газовые шапки и скопления. Большая часть обнаруженных скоплений азотного газа приурочена к положительным структурам мячковского горизонта, в кровле которых залегают слабопроницаемые карбонатные комплексы верхнего карбона, представленные плотными доломитизированными известняками и доломитами с прослоями ангидритов. В верейском горизонте при формировании газовых скоплений роль покрышек могут выполнять низкоемкие породы пластов $\text{C}_2\text{vr-6}$ и $\text{C}_2\text{vr-7}$.

Техногенные причины связаны с нарушением естественного гидродинамического режима в нефтеносных пластах в процессе разработки месторождений нефти. Эмпирически установлено, что в процессе бурения скважин выделение газообразного азота наблюдается в зонах интенсивного поглощения промывочной жидкости, где

уровень жидкости в стволе не обеспечивает достаточного противодействия на газоносный пласт. Таким образом, разработка пласта приводит к образованию зоны пониженного давления в радиусе влияния скважины, где происходит дегазация (разгазирование) пластовых вод. Всплывание газовой компоненты в жидкой среде приводит к образованию газовых скоплений и залежей. При этом, давление газа в газовых шапках и скоплениях будет стремиться к состоянию равновесия с жидкостью и будет пропорционально давлению в подземных водах соответствующих пластов. Выделяемый при этом азотный газ при наличии соответствующих условий может образовывать скопления и шапки в пласте. В скважинах азот накапливается в «затрубном» пространстве и с попутным нефтяным газом выводится в систему нефтесбора.

Выводы. В результате проведенных исследований установлено, что выявленные бурением газовые скопления азота приурочены к зонам разломов, где образуются условия для его миграции и локализации в пустотном пространстве пород. Основным источником азота для формирования газовых скоплений являются его растворенные формы в жидкой среде нефтеносных пластов (подземные воды, нефть). Выделение газообразного азота из подземных вод и его накопление в виде самостоятельных залежей и шапок происходит в результате декомпрессии пластовых вод по естественным (геологическим) или техногенным причинам (разработка месторождений нефти).

Формирование газовых залежей азота, в которых содержание азота достигает более 90%, происходит при наличии благоприятных условий (наличие коллекторов, структур и флюидоупоров). В пределах Налимовского поднятия они приурочены к положительным структурам мячковского горизонта, перекрытых покрывками в виде слабopоницаемых карбонатных комплексов верхнего карбона. В отложениях верейского горизонта роль покрывок могут выполнять низкоемкие породы пластов C₂вр-6 и C₂вр-7. Локализация газовых скоплений азота в купольных участках положительных нефтеносных структур выше нефтяного пласта приводит к формированию залежи.

Финансирование/Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в соответствии с Соглашением № 075-11-2019-032 от 26.11.2019 г.

Авторы выражают благодарность рецензентам за проделанную работу, высказанные замечания и рекомендации, которые позволили улучшить статью.

Литература

- Войтович Е.Д., Гатиятуллин Н.С. (1998). Тектоника Татарстана. Казань: Изд. КГУ, 139 с.
- Геология Татарстана: Стратиграфия и тектоника. (2003). Отв. ред. Б.В. Буров, Н.К. Есаулова, В.С. Губарева. М.: ГЕОС, 402 с.
- Глинка Н.Л. (2003). Общая химия. 30-е изд., испр. М.: 728 с
- Зорькин Л.М. (1973). Геохимия газов пластовых вод нефтегазоносных бассейнов. М.: Недра, 224 с.
- Зорькин Л.М. (2008). Генезис газов подземной гидросферы (в связи с разработкой методов поиска залежей углеводородов). *Геоинформатика*, 1, с. 45–53.
- Ларочкина И.А., Гатиятуллин Н.С., Ананьев В.В. (1994). Тектоника кристаллического фундамента на территории Татарстана. *Геология, геофизика и разработка нефтяных месторождений*, 1, с. 15–18.
- Лукин А.Е., Донцов В.В. (2009). Геохимия газов Курумбинского

нефтегазоконденсатного месторождения (Восточная Сибирь) и общие закономерности формирования зон интенсивного газонакопления. *Геол. журн.*, 2, с. 7–17.

Суббота М.И., Клейменов В.Ф., Стадник Е.В. и др. (1980). Методы обработки и интерпретации результатов гидрогеологических исследований скважин. М.: Недра, 271 с.

Сулин В.А. (1948). Гидрогеология нефтяных месторождений. М.: Гостехиздат, 479 с.

Тихомиров В.В. (2014). Молекулярный азот в солях и подсолевых флюидах Волго-Уральского бассейна. *Геохимия*, 8, с. 689–703.

Трунова М.И. (2005). Влияние соленосных толщ на содержание неуглеводородных компонентов в залежах нефти и газа Прикаспийской впадины и юго-восточной части Волго-уральской антеклизы. *Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений*, 7, с. 15–17.

Хамидуллин Ф.Ф., Амерханов И.И., Шаймарданов Р.А. (2000). Физико-химические свойства и составы пластовых нефтей при дифференциальном разгазировании на месторождениях Республики Татарстан. Справочник. Казань: Мастер Лайн, 344 с.

Хант, Джон М. (1982). Геохимия и геология нефти и газа. М.: Мир, 706 с.

Хисамов Р.С., Гатиятуллин Н.К., Ибрагимов Р.Л., Покровский В.А. (2009). Гидрогеологические условия нефтяных месторождений Татарстана. Казань: Фэн, 254 с.

Andrea Jaeschke, Huub J.M. Op den Camp, Harry Harhangi, Adam Klimiuk, Ellen C. Hopmans, Mike S.M. Jetten, Stefan Schouten, Jaap S. Sinninghe Damsté. (2009). 16S rRNA gene and lipid biomarker evidence for anaerobic ammonium-oxidizing bacteria (anammox) in California and Nevada hot springs. *FEMS Microbiology Ecology*. 67(3), pp. 343–350. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6941.2008.00640.x>

Byrne N., Strous M., Crépeau V. et al. (2009). Presence and activity of anaerobic ammonium-oxidizing bacteria at deep-sea hydrothermal vents. *ISME J*, 3, pp. 117–123. <https://doi.org/10.1038/ismej.2008.72>

Freedman, B. (1995). Environmental ecology: the ecological effects of pollution, disturbance, and other stresses. 2nd ed. San Diego: Academic press.

Khasanov R.R., Mullakaev A.I., Galiullin B.M., Khayrtdinova L.R. (2017). The influence of hydrothermal processes in the crystalline basement on the oil-bearing capacity of the sedimentary cover of the Volga-Ural region (Russia). *SGEM2017 Conf. Proc.*, 17(11), pp. 631–636. DOI: 10.5593/sgem2017/11/S01.079

Littke R., Krooss B., Frielingsdorf J., Idiz E. (1995). Molecular nitrogen in natural gas accumulations: Generation from sedimentary organic matter at high temperatures. *AAPG Bulletin*, 79(3), pp. 410–430. <https://doi.org/10.1306/8D2B1548-171E-11D7-8645000102C1865D>

Reimann J., Jetten M.S.M., Keltjens J.T. (2015). Metal Enzymes in «Impossible» Microorganisms Catalyzing the Anaerobic Oxidation of Ammonium and Methane. In: Kroneck P., Sosa Torres M. (eds.). *Sustaining Life on Planet Earth: Metalloenzymes Mastering Dioxide and Other Chewy Gases. Metal Ions in Life Sciences*. Vol. 15. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-12415-5_7

Skiba, Ute. (2008). Denitrification. In: Jorgensen, Sven Eric; Fath, Brian D., (eds.). *Encyclopedia of Ecology*. Oxford: Elsevier, pp. 866–871. <https://doi.org/10.1016/B978-008045405-4.00264-0>

Strous M., Fuerst J., Kramer E. et al. (1999). Missing lithotroph identified as new planctomycete. *Nature*, 400, pp. 446–449. <https://doi.org/10.1038/22749>

Сведения об авторах

Ринат Радикович Хасанов – доктор геол.-мин. наук, доцент, заведующий кафедрой региональной геологии и полезных ископаемых, Казанский федеральный университет Россия, 420008, Казань, ул. Кремлевская, д. 4/5

Ринат Иолдузович Сафуанов – заместитель директора НОЦ «Моделирование ТРИЗ», Казанский федеральный университет Россия, 420111, Казань, ул. Большая Красная, д. 4

Владислав Анатольевич Судаков – заместитель директора по инновационной деятельности НОЦ «Моделирование ТРИЗ», Институт геологии и нефтегазовых технологий, Казанский федеральный университет Россия, 420111, Казань, ул. Большая Красная, д. 4

Дамир Ирекович Хасанов – канд. геол.-мин. наук, доцент, заведующий кафедрой геофизики и геоинформационных технологий, Казанский федеральный университет Россия, 420008, Казань, Кремлевская, д. 18

Булат Галиевич Ганиев – канд. тех. наук, начальник управления по разработке нефтяных и газовых месторождений, ПАО «Татнефть» Россия, 423450, Альметьевск, ул. Ленина, д. 75

Азат Абузарович Лутфуллин – канд. тех. наук, заместитель начальника управления по разработке нефтяных и газовых месторождений, ПАО «Татнефть» Россия, 423450, Альметьевск, ул. Ленина, д. 75

Ринат Ракипович Афлятунов – руководитель ГТЦ, ПАО «Татнефть» Россия, 423458, Альметьевск, пр. Г. Тукая, д. 33

Статья поступила в редакцию 26.10.2020;
Принята к публикации 19.11.2020; Опубликована 11.12.2020

IN ENGLISH

Factors of gas accumulations formation in oil-bearing sediments and in casing annulus of wells

R.R. Khasanov¹, R.I. Safuanov¹, V.A. Sudakov^{1}, D.I. Khassanov¹, B.G. Ganiev², A.A. Lutfullin², R.R. Aflyatunov²*

¹Kazan Federal University, Kazan, Russian Federation

²PJSC «Tatneft», Almetyevsk, Russian Federation

*Corresponding author: Vladislav A. Sudakov, e-mail: sudakovav@gmail.com

Abstract. Gas component study is one of the important tasks of petroleum geology. Gas component can exist in various forms in sedimentary rocks. Of great interest is nitrogen, the gaseous accumulations of which are formed in oil-bearing strata, causing complications during the oilfield development. The problem of abnormal nitrogen accumulations had great relevance in the fields of the Volga-Ural petroleum province, which is one of the long-term developed with a large stock of wells for various purposes.

This article discusses possible sources of gaseous nitrogen and the reasons for its accumulations in oil-bearing reservoirs. The main purpose of the article is to clarify the reasons for the gaseous nitrogen and its deposits formation. The main patterns of the areal distribution of nitrogen gas accumulations in oil-bearing strata are revealed on the basis of field, hydrogeological, geological and geophysical researches data analysis. It has been established that during the gas caps formation, the source of gaseous nitrogen is its dissolved compounds in groundwater and oil, biochemical decomposition of which leads to the dissolved molecular nitrogen accumulation in a liquid medium.

The release of free gaseous nitrogen and the formation of its accumulations is associated with the decompression of formation waters for natural (geological) or man-made reasons (hydrocarbons extraction). Disturbance of the natural hydrodynamic regime in oil-bearing formations leads to the release of gaseous nitrogen and the formation of its accumulations under favorable conditions (the presence of reservoirs, structures and impermeable rocks in the top of the formation).

Key words: Gases, nitrogen, oil-bearing strata, dissolved forms, organic matter, microbial activity

Recommended citation: Khasanov R.R., Safuanov R.I., Sudakov V.A., Khassanov D.I., Ganiev B.G., Lutfullin A.A., Aflyatunov R.R. (2020). Factors of gas accumulations formation in oil-bearing sediments and in casing annulus of wells. *Georesursy = Georesources*, 22(4), pp. 22–29. DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2020.4.22-29>

Acknowledgments

The work was carried out with financial support from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation in accordance with Agreement No. 075-11-2019-032 of 26.11.2019.

The authors are grateful to the reviewers for the work done, comments and recommendations made, which enabled to improve the article.

References

- Andrea Jaeschke, Huub J.M. Op den Camp, Harry Harhangi, Adam Klimiuk, Ellen C. Hopmans et al. (2009). 16S rRNA gene and lipid biomarker evidence for anaerobic ammonium-oxidizing bacteria (anammox) in California and Nevada hot springs. *FEMS Microbiology Ecology*, 67(3), pp. 343–350. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6941.2008.00640.x>
- Byrne N., Strous M., Crépeau V. et al. (2009). Presence and activity of anaerobic ammonium-oxidizing bacteria at deep-sea hydrothermal vents. *ISME J*, 3, pp. 117–123. <https://doi.org/10.1038/ismej.2008.72>
- Freedman, B. (1995). Environmental ecology: the ecological effects of pollution, disturbance, and other stresses. 2nd ed. San Diego: Academic press.
- Geology of Tatarstan: Stratigraphy and Tectonics. (2003). Eds. B.V. Burov, N.K. Esaulova, V.S. Gubareva. Moscow: GEOS, 402 p. (In Russ.)
- Glinka N.L. (2003). General Chemistry. Moscow: 728 p. (In Russ.)
- Hunt J.M. (1979). Petroleum geochemistry and geology. WH Freeman, San Francisco, 617 p.
- Khamidullin F.F., Amerkhanov I.I., Shaymardanov P.A. (2000). Physical-chemical properties and compositions of reservoir oils during differential gas release in the Tatarstan fields of the Republic of Tatarstan. Reference manual. Kazan: Master Layn, 344 p. (In Russ.)
- Khasanov R.R., Mullakaev A.I., Galiullin B.M., Khayrtidinova L.R. (2017). The influence of hydrothermal processes in the crystalline basement on the oil-bearing capacity of the sedimentary cover of the Volga-Ural region (Russia). *SGEM2017 Conf. Proc.*, 17(11), pp. 631–636. DOI: 10.5593/sgem2017/11/S01.079
- Khisamov R.S., Gatiyatullin N.K., Ibragimov R.L., Pokrovskiy V.A. (2009). Hydrogeological conditions of oil fields in Tatarstan. Kazan: Fen, 254 p. (In Russ.)
- Larochkina I.A., Gatiyatullin N.S., Ananiev V.V. (1994). Tectonics of the crystalline basement in the territory of Tatarstan. Geology, Geophysics and Oilfield Development. *Geologiya, geofizika i razrabotka neftyanykh mestorozhdeniy = Geology, Geophysics and Development of Oil and Gas Fields*, 1, pp. 15–18. (In Russ.)
- Lukin A.E., Dontsov V.V. (2009). Geochemistry of gases from the Kuyumbinskoe oil and gas condensate field (Eastern Siberia) and general patterns of formation of intense gas accumulation zones. *Geol. zhurn.*, 2, pp. 7–17. (In Russ.)

Littke R., Krooss B., Frielingsdorf J., Idiz E. (1995). Molecular nitrogen in natural gas accumulations: Generation from sedimentary organic matter at high temperatures. *AAPG Bulletin*, 79(3), pp. 410–430. <https://doi.org/10.1306/8D2B1548-171E-11D7-8645000102C1865D>

Reimann J., Jetten M.S.M., Keltjens J.T. (2015). Metal Enzymes in «Impossible» Microorganisms Catalyzing the Anaerobic Oxidation of Ammonium and Methane. In: Kroneck P., Sosa Torres M. (eds.). *Sustaining Life on Planet Earth: Metalloenzymes Mastering Dioxygen and Other Chewy Gases. Metal Ions in Life Sciences*. Vol. 15. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-12415-5_7

Skiba, Ute. (2008). Denitrification. In: Jorgensen, Sven Eric; Fath, Brian D., (eds.). *Encyclopedia of Ecology*. Oxford: Elsevier, pp. 866–871. <https://doi.org/10.1016/B978-008045405-4.00264-0>

Strous M., Fuerst J., Kramer E. et al. (1999). Missing lithotroph identified as new planctomycete. *Nature*, 400, pp. 446–449. <https://doi.org/10.1038/22749>

Subbota M.I., Kleymenov V.F., Stadnik E.V. et al. (1980). Methods for processing and interpreting the results of hydrogeological studies of wells. Moscow: Nedra, 271 p. (In Russ.)

Sulin V.A. (1948). Hydrogeology of oil fields. Moscow: Gostoptekhzidat, 479 p. (In Russ.)

Tikhomirov V.V. (2014). Molecular nitrogen in salts and subsalt fluids of the Volga-Ural basin. *Geochem. Int.*, 52, pp. 628–642. (In Russ.) <https://doi.org/10.1134/S0016702914080096>

Trunova M.I. (2005). Influence of salt-bearing strata on the content of non-hydrocarbon components in oil and gas deposits of the Caspian depression and the southeastern part of the Volga-Ural anticline. *Geologiya, geofizika i razrabotka neftyanykh mestorozhdeniy = Geology, Geophysics and Development of Oil and Gas Fields*, 7, pp. 15–17. (In Russ.)

Voytovich E.D., Gatiyatullin N.S. (1998). Tectonics of the Tatarstan. Kazan: KSU Publ., 139 p. (In Russ.)

Zorkin L.M. (1973). Geochemistry of gases in formation waters of oil and gas basins. Moscow: Nedra, 224 p. (In Russ.)

Zorkin L.M. (2008). Genesis of gases in the underground hydrosphere (in connection with the development of methods for hydrocarbon deposits search). *Geoinformatika = Geoinformatics*, 1, pp. 45–53. (In Russ.)

Manuscript received 26 October 2020;

Accepted 19 November 2020; Published 11 December 2020

About the Authors

Rinat R. Khasanov – Dr. Sci. (Geology and Mineralogy), Associate Professor, Head of the Regional Geology and Mineral Resources Department, Kazan Federal University
4/5, Kremlevskaya st, Kazan, 420008, Russian Federation

Rinat I. Safuanov – Deputy Director of «Hard-to-Recover Reserves Simulation» Research and Educational Center, Kazan Federal University

4, Bolshaya Krasnaya st., Kazan, 420111, Russian Federation

Vladislav A. Sudakov – Deputy Director for Innovations of «Hard-to-Recover Reserves Simulation» Research and Educational Center, Kazan Federal University

4, Bolshaya Krasnaya st., Kazan, 420111, Russian Federation

Damir I. Khassanov – Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), Associate Professor, Head of the Department of Geophysics and Geoinformation Technologies, Kazan Federal University
18, Kremlevskaya st., Kazan, 420008, Russian Federation

Bulat G. Ganiev – Cand. Sci. (Engineering), Head of the Oil and Gas Fields Development Department, PJSC «Tatneft»
75, Lenin st., Almetyevsk, 423450, Russian Federation

Azat A. Lutfullin – Cand. Sci. (Engineering), Deputy Head of Oil and Gas Fields Development Department, PJSC «Tatneft»

75, Lenin st., Almetyevsk, 423450, Russian Federation

Rinat R. Affyatunov – Head of the Geological-Technological Center, PJSC «Tatneft»

33, G. Tukay ave., Almetyevsk, 423458, Russian Federation