

Поисковые работы на нефть и газ в Азии, Африке и Америке в естественно-трещиноватых коллекторах фундамента: лучший мировой опыт и усвоенные уроки

Т. Кёнинг

Старший геолог – Независимый консультант, Калгари, Канада
E-mail: tako.koning@gmail.com

Породы кристаллического фундамента имеют важное значение в качестве коллекторов нефти и газа в ряде бассейнов мира. Данная статья содержит технический обзор отдельных месторождений нефти и газа в Азии, Африке и Америке. Рассматривается лучший мировой опыт по поиску и разработке месторождений в образованиях кристаллического фундамента. Представлены предпочтительные типы пород кристаллического фундамента для обнаружения нефтяных и газовых скоплений. По мнению автора, лучшими типами пород являются трещиноватые кварциты или граниты, так как они хрупкие и следовательно разрушаются оптимально. Рассматривается как успешный опыт разработки месторождений в фундаменте, так и неудачный. Исходя из мирового опыта приводятся рекомендации по исследованию кристаллического фундамента на нефть и газ и разработки залежей в нем.

Ключевые слова: кристаллический фундамент, нефтяные и газовые месторождения, мировой опыт, поиск и разработка, трещиноватые коллектора, выветрелые породы

Для цитирования: Кёнинг Т. (2019). Поисковые работы на нефть и газ в Азии, Африке и Америке в естественно-трещиноватых коллекторах фундамента: лучший мировой опыт и усвоенные уроки. Георесурсы, 21(4), с. 10-18. DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2019.4.10-18>

Введение

Породы кристаллического фундамента имеют важное значение в качестве коллекторов нефти и газа в ряде бассейнов мира, включая Азию (Индонезия, Китай, Вьетнам и Индия), Россию, Ближний Восток (Йемен), Африку (Алжир, Ливию и Египет), Южную Америку (Венесуэла и Бразилия), США (Калифорния, Канзас, Техас) и Северное море (Великобритания к западу от Шетландских островов и Норвегии) (рис. 1). Коллекторы фундамента включают трещиноватые и выветрелые граниты, кварциты, метаморфические и вулканические породы.

В последнее десятилетие добыча нефти и газа в кристаллическом фундаменте активизировалась благодаря значительным открытиям в Великобритании (нефтяные месторождения Lancaster и Lincoln), Норвегии (нефтяное месторождение Rolvsnes), нефтяных месторождений в фундаменте в Чаде, Центральной Африке и крупных месторождений газа в кристаллическом фундаменте в 2019 году в Индонезии.

Автор пристально следит за этой темой более 35 лет с тех пор, как в 1982 году участвовал в разработке нефтяного месторождения Beruk Northeast в образованиях фундамента в Индонезии. Автор также принимал участие в оценке запасов нефти фундамента в Анголе и Уганде. В данной статье он делится своими знаниями и опытом.

Данная статья содержит технический обзор отдельных месторождений нефти и газа в Азии, Африке и Америке. Также рассматривается лучший мировой опыт по поиску и разработке месторождений в образованиях кристаллического фундамента. Хотя в этой статье рассматривается в основном успешный опыт, существуют

также и неудачи, так как залежи в фундаменте могут быть очень сложными и непредсказуемыми. Также рассматриваются также и два месторождения фундамента, которые оказались экономическими неэффективными: Dai Hung (Big Bear) во Вьетнаме и Beruk Northeast в Индонезии.

Самые крупные нефтяные и газовые месторождения в образованиях фундамента находятся в сильно трещиноватых породах. По мнению автора, лучшими типами пород являются трещиноватые кварциты или граниты, так как они хрупкие и следовательно легче разрушаются (Koning, 2019). Трещиноватые гнейсы являются низкопродуктивными коллекторами, так как они могут быть массивными, плотными или мощными с открытыми трещинами, параллельными направлению слоения пород. Гнейсы и сланцы являются пластичными и с тенденцией «размазываться» и не разрушаться под воздействием тектонического стресса. Филлиты и тонкослоистые сланцы наименее привлекательны, поскольку такие породы не являются хрупкими, они слоистые и пластичные, плохо разрушаются.

Выветрелые гранитные породы фундамента также могут быть отличными резервуарами, например, на нефтяном месторождении Auguila-Naafoga в Ливии.

Ниже приведена шкала наиболее предпочтительных типов пород кристаллического фундамента:

- трещиноватые кварциты (наиболее предпочтительный тип породы),
- трещиноватые граниты,
- трещинные карбонаты,
- выветрелые граниты,
- трещиноватые гнейсы,
- выветрелые гнейсы,
- трещиноватые сланцы,



Рис. 1. Примеры крупных месторождений нефти и газа в образованиях фундамента

- выветрелые сланцы (наименее предпочтительный тип породы).

Для нефтяных и газовых месторождений в фундаменте требуются те же геологические критерии, что и для традиционных нефтяных и газовых месторождений, которые включают коллектора (трещиноватый или выветрелый фундамент), нефтегазоматеринские породы, прилегающие к фундаменту или перекрывающие его, структурные покровы, изолирующие залежи фундамента.

Месторождения нефти и газа в образованиях фундамента в Азии ВЬЕТНАМ

Крупнейшим нефтяным месторождением во Вьетнаме в образованиях фундамента является гигантское нефтяное месторождение Bach Ho (White Tiger). Другие месторождения нефти в фундаменте включают месторождения Dai Hung (Big Bear), Ca Ngu Vang (CNV), Rong (Dragon), Rang Dong, Ruby и Su Ten Den с запасами нефти от 100 до 400 млн баррелей (Koning, 2019; Chung-Hsiang P'An, 1982).

Нефтяное месторождение Bach Ho (White Tiger)

Это гигантское нефтяное месторождение с предполагаемыми запасами от 1,0 до 1,4 млрд баррелей (Hung & Le, 2004). Месторождение открыто в 1975 году в бассейне Cuu Long (рис. 2) во Вьетнаме компанией Mobil. В олигоценовых отложениях была обнаружена нефть, в основном антиклинальном куполе фундамента. Из-за политической ситуации американская нефтяная компания Mobil не смогла освоить месторождение и покинула Вьетнам. Однако в 1988 году компания VietSovPetro обнаружила нефть в трещиноватых и выветрелых докембрийских гранитных породах фундамента. Добыча нефти достигла своего пика примерно в 280 000 баррелей нефти в день в 2005 году. 95 % нефти добывается из коллекторов фундамента и 5 % – из отложений олигоцена. В 2009 г. объем добычи нефти на месторождении снизился до 140 000 баррелей в сутки

и к 2018 г. объем добычи упал до 65 000 баррелей в сутки.

Нефть содержится в макро- и микротрещинах и в кавернозных порах внутри трещин. Пористость матрицы внутри гранита ничтожна. Большинство трещин в породах фундамента находится под большими углами падения 40-75 градусов. Пористость в трещинах составляет всего 2-3 %, но проницаемость значительна – на уровне от десяти до тысяч мД. Дебиты составляли до 14 000 баррелей нефти в день на скважину. Огромные запасы месторождения Bach Ho обусловлены тем, что нефтяная часть залежи имеет значительную толщину – 1500 м.

Нефтяное месторождение Dai Hung (Big Bear)

История разработки и добычи нефти на месторождении Dai Hung резко контрастирует по сравнению с успехом месторождения Bach Ho. Нефть и газ на месторождении Dai Hung содержатся в похожей гранито-гранодиоритовой матрице. В 1993 году австралийская ВНР возглавила консорциум, который выиграл тендер на разработку этого месторождения и предсказал, что месторождение будет добывать 250 000 баррелей нефти в день. Была установлена полномасштабная производственная платформа, но, к сожалению, к середине 1990-х годов месторождение добывало только 25 000 баррелей нефти в день, а добыча быстро сократилась, и в 1997 году ВНР покинула консорциум, объявив, что месторождение не приносит прибыли.

Малайзийская государственная нефтяная компания Petronas вступила во владение в качестве оператора, но не смогла поднять добычу выше 10 000-15 000 баррелей нефти в сутки и ушла в 1999 году. В 2000 году VietSovPetro, оператор месторождений Bach Ho и Rong, стал оператором Dai Hung, но был только в состоянии производить около 5400 баррелей нефти в день. Уроки, усвоенные при разработке месторождения Dai Hung, заключаются в том, что очень важно понять геологические, геофизические и коллекторские сложности такого месторождения до начала полномасштабной добычи.

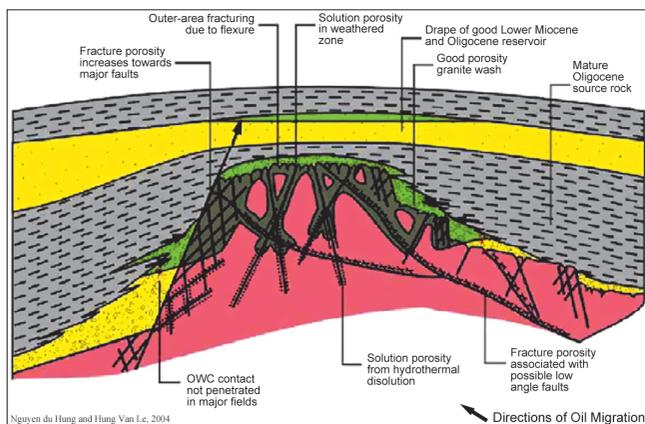


Рис. 2. Двумерная модель месторождения в бассейне Суу Лонг, Вьетнам (Hung and Le, 2004)

Нефтяное месторождение Ca Ngu Vang (CNV)

Месторождение Ca Ngu Vang (CNV) открыто в 2002 году и является самой глубокой нефтеносной структурой в бассейне Суу Лонг с кровлей кристаллического фундамента на глубине 3700 метров. CNV представляет собой месторождение с погребенным куполом (buried hill), как и месторождение Вах Но; нефть добывается из трещиноватых докембрийских гранитов. Оператор месторождения – британская компания SOCO International. Скважина CNV-3 была самой длинной из пробуренных глубинных скважин во Вьетнаме – 6123 метра, вскрывшая более чем 2000 метров пород фундамента, пробитого в почти горизонтальном стволе скважины (рис. 3). Замеры дебита произведены на уровне 13 040 баррелей условного топлива в день в пересчете на нефть и газ.

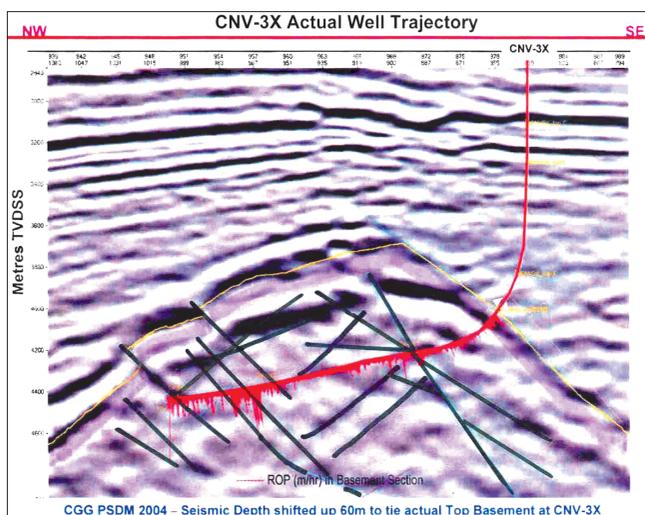


Рис. 3. Сейсмический разрез и траектория скважины CNV-3 на месторождении CNV, Вьетнам (SOCO Int. website, 2011)

ИНДОНЕЗИЯ

Газовое месторождение Suban, Южная Суматра

Месторождение Suban было открыто в 1999 году бурением вглубь фундамента. Приблизительно 1524 млрд кубических метров газа было обнаружено в трещиноватых гранитах. Бурение высокопродуктивных газовых скважин было проведено на основе сильно отклоненных скважин, ориентированных перпендикулярно доминирующей системе трещин. Успех Suban привел к дальнейшему

поиску и открытиям газа в фундаменте на Суматре. Экономика Индонезии продолжает расширяться, и потребность добычи газа возрастает. Газ с месторождения Suban был направлен по трубопроводу в крупный проект по добыче тяжелой нефти паровым воздействием в Duri в Центральной Суматре, а также в Сингапуре для производства электроэнергии. Американская нефтяная компания ConocoPhillips является оператором месторождения.

Газовое месторождение Kali Berau Dalam, Южная Суматра

В 2019 году испанская нефтяная компания Repsol объявила, что их разведочная скважина Kali Berau Dalam-2 вскрыла крупные залежи газа в трещиноватых до-третичных породах фундамента. Это открытие расширило разработку газа в фундаменте на 150 км к северо-западу от месторождения Suban. Сообщалось, что в скважине выдается газ со скоростью 45 млн кубических футов в сутки.

Компания Repsol упомянула, что в результате открытия газа было найдено не менее 2 трлн куб. В нефтяном эквиваленте это равно 330 млн баррелей нефти. Для Индонезии открытие Kali Berau Dalam является очень важным, поскольку оно является крупнейшим открытием нефти или газа за последние 18 лет после открытия Серу в 2001 г. Действительно, аналитики нефтяной промышленности заявили, что это открытие является одним из десяти крупнейших открытий в мире за последние 12 месяцев.

Нефтяной бассейн Beruk Northeast, Центральная Суматра

Бассейн Beruk Northeast в образованиях фундамента оказался очень многообещающим из-за дебита в 1680 баррелей нефти в день из разведочной скважины Beruk Northeast-1, пробуренной в 1976 году (Koning & Darmono, 1984) (рис. 4, 5). За открытием последовало бурение четырех эксплуатационных скважин, ни одна из которых не была пробурена глубоко в фундамент, таким образом, оператор Caltex (Chevron-Техасо) не знал о наличии многочисленных подстилающих водонефтяных контактов. На месторождении было добыто всего 2 млн баррелей нефти, когда быстрый приток воды загубил месторождение и сделал его коммерчески невыгодным. Усвоенные уроки заключались в том, что скважины должны быть пробурены достаточно глубоко в фундамент, а не просто затрагивать кровлю фундамента.

Нефтяное месторождение Tanjung, Калимантан

Крупнейшим скоплением нефти в фундаменте в Индонезии является месторождение Tanjung в бассейне Varito на юге Калимантана. На этом месторождении было добыто более 70 млн баррелей нефти из эоценовых песчаников и конгломератов, перекрывающих фундамент, осложненный разломами. Также добыто более 20 млн баррелей нефти из пород фундамента, включающие вулканические, пирокластические и метаосадочные отложения.

КИТАЙ

Нефтяное месторождение Yaegxia

Месторождение Yaegxia – это нефтяное месторождение на суше, открытое в 1959 году, и первое купольное месторождение фундамента, когда-либо обнаруженное в Китае. Нефть добывается из палеозойских филлитов,

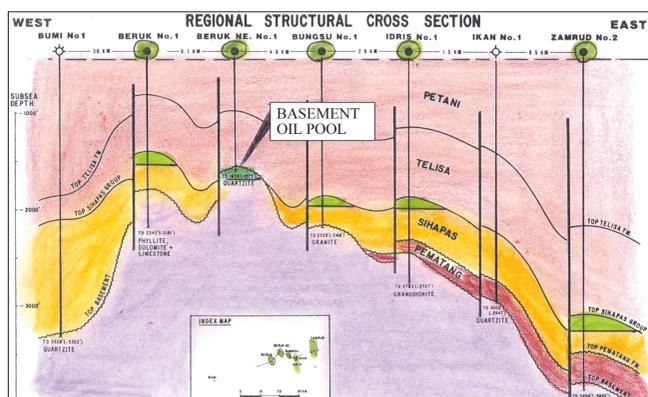


Рис. 4. Региональный разрез области Zamrud-Beruk, бассейна Центральной Суматры. *Sihapas* – это песчаник третичного возраста, из которого добывают нефть на всей территории. *Sihapas* выклинивается в фундаменте бассейна Beruk Northeast, где сланцы *Телиса* обеспечивают покрывкой нижележащий трещиноватый фундамент бассейна Beruk Northeast (Koning & Darmono, 1984).

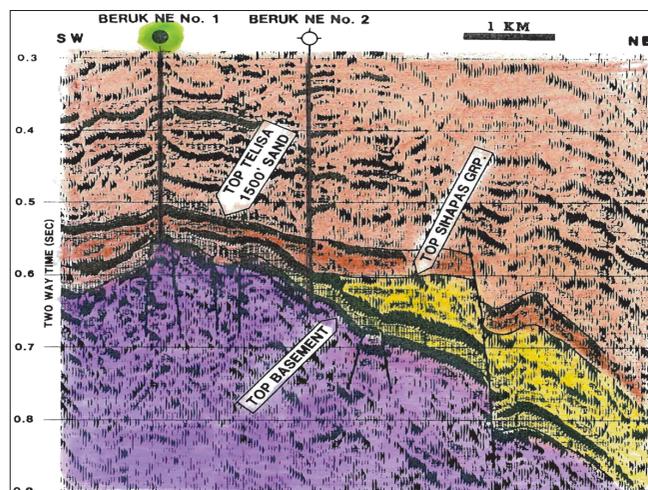


Рис. 5. Сейсмический профиль через бассейн Beruk Northeast. Можно обратить внимание на выклинивание песчаников *Sihapas* на боковой части фундамента. Соответственно, нефтеносный фундамент покрыт мощными сланцами формации *Telisa* (Koning & Darmono, 1984).

сланцев и метапесчаников. Скважины являются умеренно продуктивными: 12 скважин добывают менее 70 баррелей нефти в день, 3 скважины добывают 200 баррелей нефти в день, и 2 скважины добывают 875 баррелей нефти в день. Скважины не являются высокопродуктивными, так как филлиты и сланцы не подвергаются естественному разрушению оптимальным образом. Точно так же филлиты и сланцы не являются продуктивными коллекторами, когда они выветрелые.

Нефтяное месторождение Dongshenpu

Это месторождение расположено на суше в центральной части Китая, и, как нефтяное месторождение Yaegxia, является примером китайского нефтяного месторождения в фундаменте с погребенным куполом (buried hill). Месторождение Dongshenpu было открыто в 1983 году, и коллектор состоит из докембрийских гранитов, гранулитов, диабазов и роговых обманок гнейсов. Породы не имеют первичной пористости, но пористые коллекторы образовались в результате выветривания и естественной

трещиноватости. Произведенные замеры по скважине-первооткрывательнице показали 1570 баррелей нефти в день, и последующее эксплуатационное бурение выявило, что толщина нефтяной части залежи составляет 400 метров. Запасы на этом месторождении были оценены приблизительно в 190 миллионов баррелей нефти.

МАЛАЙЗИЯ

Нефтяное месторождение Adang Utara

Впервые нефть в образованиях фундамента в Малазии была открыта в 2005 году во время бурения компанией Petronas скважины Adang Utara-1 в южной части Малайского бассейна на шельфе Terengganu. Скважина была пробурена на общую глубину 2610 метров, в том числе 120 метров вглубь фундамента. Дебит скважины-первооткрывательницы не известен. Однако пробурено 6 оценочных и эксплуатационных скважин. Дебиты из пород фундамента составляли от 159 баррелей до 2116 баррелей нефти в день. Дебиты в значительной степени зависят от скважин, оптимально пересекающих нефтеносные трещины фундамента. По запасам месторождения Adang Utara не было опубликовано никакой информации.

ИНДИЯ

Индия является третьим по величине потребителем сырой нефти в мире после США и Китая. Потребности Индии в нефти и газе значительно опередили ее внутреннюю добычу. В Индии разведка нефти в образованиях фундамента не является новой. Добыча нефти ведется из трещиноватых и выветрелых пород фундамента в бассейнах Assam и Assam Arakan, а также в бассейнах Mumbai, Krishna Godaveri, Cauvery и Cambay. С постепенным уменьшением больших, легко обнаруживаемых нефтяных залежей, акцент в геологоразведке сместился с традиционных осадочных коллекторов на разведку в кристаллическом фундаменте.

Примером индийского месторождения в фундаменте является Mumbai High, расположенное недалеко от западного побережья Индии. Это месторождение было открыто в 1976 году и разрабатывается как из базальных песков, так и из трещиноватых докембрийских гранитов. Скважины в фундаменте добывают с дебитом от 465 до 2575 баррелей нефти в день.

Другим примером индийского месторождения в фундаменте является месторождение Padra, на котором добывается нефть из вулканического фундамента Дессап Трапс. Он состоит из слоистых базальтов, образованных эпизодическими потоками лавы, вышедшими в верхнемелово-палеоценовом периоде. Раздробленные и выветрелые базальты содержат нефтяные залежи мощностью до 300 метров. Нефтяное месторождение Borhalla на северо-востоке Индии в бассейне Assa Araka разрабатывается в трещиноватом фундаменте и является еще одним примером нефтяного месторождения фундамента в Индии.

Месторождения нефти и газа в фундаменте Африки

ЛИВИЯ

Большие запасы нефти обнаружены в фундаменте Ливии. Месторождение Auguila-Naafora, обнаруженное в середине 1960-х годов в бассейне Sirte, содержит

скопление нефти в несколько миллиардов баррелей. Коллектор состоит из гидротермально измененных трещиноватых и выветрелых докембрийских гранитов. Месторождение представляет собой рельефный горстовый блок, созданный в начале рифтинга в период от среднего до верхнего мела (Harding, 1984) (рис. 6). Разведочная скважина, в которой была обнаружена нефть в фундаменте, была опробована на 7627 баррелей нефти в день. Превосходные мощные нефтематеринские породы выше перекрывают фундамент, а также выступают в качестве идеальной покрывки для аккумуляции нефти. Нефтематеринскими породами являются меловые морские темные сланцы.

Первичная пористость в граните низкая (2-3 %), но гидротермальные изменения и выветривание привели к пористости порядка 6 % в выветрелой зоне и максимальной пористости порядка 11 %. Выветривание в верхней части фундамента варьируется от 5 до 200 метров. В структуре фундамента достаточно открытых трещин, чтобы обеспечить эффективное сообщение флюидов на протяжении всей аккумуляции и гарантировать хорошую нефтеотдачу.

Запасы оцениваются в 9,0 млрд баррелей нефти, из которых 90 % находится в фундаменте и 10 % в вышележащих отложениях. Добыча к 1984 г. составила 820 млн баррелей нефти. Предполагается, что конечная добыча на месторождении составит 2,0 млрд баррелей, что эквивалентно коэффициенту извлечения 22 %. Доля добычи в породах фундамента оценивается в 1,8 млрд баррелей нефти.

Соответственно, по мнению автора, Auquila-Naafora является крупнейшим в мире месторождением в образованиях кристаллического фундамента и главным аналогом для ученых-геологов, которые ищут крупные скопления нефти или газа.

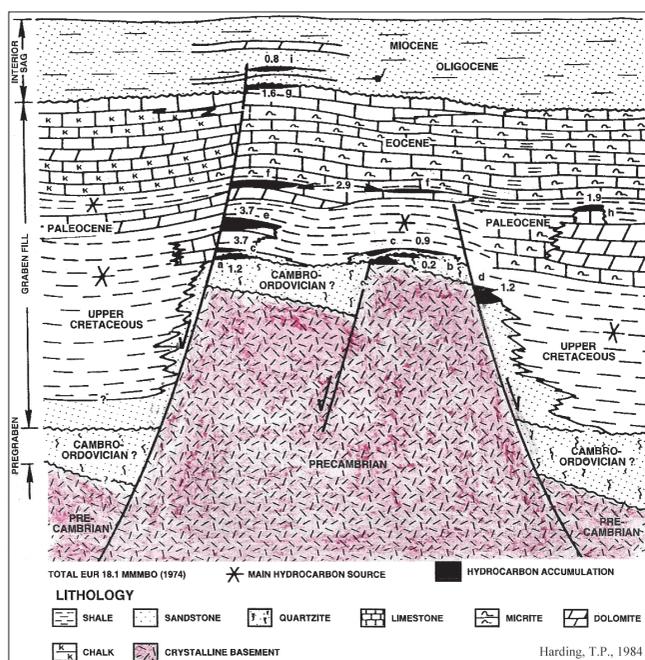


Рис. 6. Типичная структура горстового блока, бассейн Sirte, Ливия (Harding, 1984)

ЕГИПЕТ

Нефтяное месторождение Zeit Bay в образованиях фундамента расположено в Суэцком заливе и было открыто в

1981 году. Первоначальная разведочная скважина имела толщину нефтяной залежи в 260 метров. Примерно 1/3 запасов месторождения находится в фундаменте, а 2/3 - в вышележащих отложениях. Кристаллический фундамент состоит из гранитов, метавулканики, мета- и дайковых отложений. Дебиты в фундаменте варьируются от 700 до 9000 баррелей нефти в сутки.

Южный Судан

В бассейне Melut Rift было пробурено около 40 скважин, из которых в двух скважинах добывалась нефть из пород фундамента с неизвестными дебитами. Залежами являются граниты и гранитные гнейсы. Нижнемеловая формация Renk является основной нефтематеринской породой в этом бассейне. Существует мало общедоступной информации о нефтяной геологии Южного Судана, но исходя из региональной геологии, можно ожидать, что существует большой нефтегазовый потенциал в рифтовых бассейнах Южного Судана.

Чад

В 2013 году Китайская национальная нефтяная компания (CNPC) открыла нефть в скважине Lanea-1 в бассейне Bogog в гранитном фундаменте с погребенным куполом (buried hill) с рельефом 1000 метров. За этим последовали еще 5 открытий нефти и газа в погребенных куполах (buried hill). Коллекторы представляют собой трещиноватые граниты и гидротермально выщелоченные граниты, последние из которых являются лучшим фациальным коллектором. Нефтематеринские породы и покрывки – раннемеловые озерные сланцы. Толщина нефтяной части залежи составляет 1500 метров, а средняя производительность скважины – 1500 баррелей нефти в сутки. Запасы были оценены примерно в 100 миллионов баррелей, из которых 70 % находится в фундаменте и 30 % в покрывающем слое гранита.

Ангола

В 1968 году американская компания Gulf Oil Corporation пробурила в Анголе первую успешную на нефть скважину на месторождении в образованиях фундамента – скважину 61-1 в прибрежной зоне ангольской провинции Cabinda (Koning, 2014) (рис. 7, 8). При расширенном испытании скважины было отработано 600 000 баррелей нефти. Второе открытие нефти в образованиях фундамента было сделано компанией Gulf при бурении скважины 37-3, испытания которой показали до 60 баррелей нефти в день из фундамента. Ни одно из открытий провинции Cabinda не было коммерчески успешным. Тем не менее, ни одна нефтяная компания целенаправленно не искала в Анголе нефть в фундаменте, и запасы нефти в нем остаются полностью недооцененными.

Северная Америка КАНАДА

Канада является четвертым крупнейшим производителем нефти в мире, добывающим 4,5 миллиона баррелей нефти в день. Крупнейшим мировым производителем нефти являются США с добычей 12,6 млн баррелей нефти в день, затем Саудовская Аравия с 11,8 млн баррелей нефти в день, а затем Россия с 11,4 млн баррелей нефти в день.



Рис. 7. Интенсивно трещиноватые докембрийские граниты в трещинном коридоре в недрах Анголы. Это коллектор в фундаменте (Koning, 2014).



Рис. 8. Докембрийские гранитные гнейсы в недрах Анголы. Можно обратить внимание на вертикальную и наклонную ориентацию трещин, которая указывает, что это потенциально сложный нефтеносный пласт. Отметим также, что он не сильно трещиноватый, как гранит на рис. 5. Соответственно, этот коллектор будет хуже, чем коллектор, выходящий на поверхность на рис. 5

Ввиду того, что Канада обладает такой значимой нефтяной геологией, тот факт, что нигде в Канаде не добывается нефть из фундамента является аномальным. Это может быть связано с отсутствием в Канаде продуктивных нефтяных или газовых залежей, перекрывающих фундамент, которые могли бы переносить нефть или газ в фундамент. Кроме того, в Канаде кристаллический фундамент изучен очень слабо, поэтому до настоящего времени не было предпринято целенаправленных усилий по разведке залежей нефти и газа в кристаллическом фундаменте.

В Саудовской Аравии также не добывается нефть или газ из фундамента. Отсутствие добычи нефти и газа в Саудовской Аравии может быть вызвано теми же причинами, что и в Канаде.

США КАЛИФОРНИЯ

Штат Калифорния в настоящее время производит около 0,5 млн баррелей нефти в день. Эта добыча почти полностью ведется из песчаников и конгломератов

третичного миоценового периода, за исключением следующих месторождений, которые разрабатываются в породах фундамента:

1. Месторождение Playa de Rey, район Santa Monica. Добыча из трещиноватых юрских сланцев.
2. Месторождение Santa Maria, район Santa Barbara. Добыча из трещиноватого юрского песчаника.
3. Месторождение Willmington, район Long Beach. Добыча 22 миллионов баррелей нефти из трещиноватых юрских сланцев.
4. Месторождение Edison, район Bakersfield. Добыча 20 миллионов баррелей нефти из трещиноватых юрских сланцев.
5. Месторождение El Segundo, западный район Los Angeles. Залежи состоят из трещиноватого юрского сланца в западной части месторождения и конгломерата трещиноватого юрского сланца в восточной половине с нефтью, испытанной до 4500 баррелей нефти в день из пород фундамента на глубине около 2150 метров.

КАНЗАС

Нефть добывается в штате Канзас с поверхности трещиноватых докембрийских кварцитов, которые встречаются в погребенных куполах. Нефтематеринскими породами являются вышележащие сланцы пенсильванского возраста, которые также образуют покрывки. В Канзасе существует приблизительно 10 маленьких бассейнов, на которых добывают приблизительно 150 000 баррелей нефти на скважину. Примером является бассейн Orth, где добывается около 1 миллиона баррелей нефти из 15 скважин.

Добыча нефти из этих небольших бассейнов является коммерчески рентабельной, поскольку малая глубина залежей фундамента приводит к небольшим затратам на бурение. Район, в котором находятся эти залежи, является районом с обширной добычей нефти на традиционных месторождениях и соответствующей необходимой инфраструктурой, включая трубопроводы и станции сбора нефти. Следовательно, подключение скважин, пробуренных в фундаменте, к существующей нефтяной инфраструктуре не является дорогостоящим.

ОКЛАХОМА

Структура Ames диаметром 15 километров, расположенная на северо-западе Оклахомы, вызвана падением метеорита в период среднего ордовика. Добыча нефти и газа ведется из брекчиевидного докембрийского гранита, а также из вышележащего кембро-ордовикского доломита Arbuckle.

ТЕХАС

В северном Техасе в районе Panhandle-Hugoton нефть добывается в бассейне Anadarko из трещиноватых докембрийских пород (Manwaring & Weimer, 1986). Эти нефтяные залежи, в том числе месторождение Arco, состоят из куполов фундамента, которые возникли в результате структурной деформации и палеовыветривания. Считается, что нефть мигрировала из девонских сланцев Woodford в фундамент вдоль повсеместных трещин и накапливалась в открытых зонах трещин, связанных с разломами.

Добыча ведется с глубины примерно 323 м (1060 футов). Добыча нефти из пород фундамента составляет от 1 барреля нефти в сутки до 700 баррелей нефти в сутки. Бурение в пределах зоны разлома не гарантирует добычу в фундаменте. Другие геологические факторы одинаково важны для накопления и добычи нефти в фундаменте, включая ориентацию разломов, тип трещин, минерализацию внутри трещин, степень выветривания, литологию, интенсивность разломов и близость к трещиноватым зонам, связанных с разломами. Правильные методики бурения в фундаменте также важны, как и соответствующая обработка залежей кристаллического фундамента во время заканчивания скважины.

Южная Америка ВЕНЕСУЭЛА

Гигантское нефтяное месторождение La Paz расположено в бассейне Maracaibo в центральной части Венесуэлы. Месторождение было открыто в 1944 году, и до 1992 года добывалось 830 миллионов баррелей нефти из известняков La Luna и 325 млн баррелей из нижележащей трещиноватой залежи фундамента (Landes et al., 1960; Talukdar & Marciano, 1994; Koning, 2003; Koning, 2018). После открытия месторождения, благодаря высоким эксплуатационным характеристикам коллектора La Luna, геологи и инженеры предположили, что коллектор подпитывается из более глубокой залежи. И через 30 лет после открытия месторождения была пробурена скважина в нижележащий фундамент, и было открыто месторождение La Paz.

Добыча в скважина-первооткрывательнице составляла 1000 баррелей нефти в сутки из известняка La Lunda. Начальные дебиты в скважинах, пробуренных на фундамент, составляют до 11 500 баррелей нефти в сутки, а средний начальный дебит – 3500 баррелей нефти в сутки (рис. 9).

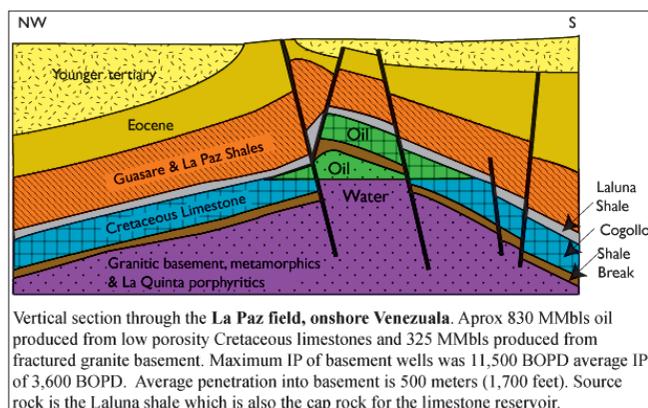


Рис. 9. Вертикальный разрез через месторождение La Paz, Венесуэла (Landes et al., 1960; Talukdar & Marciano, 1994; с изменениями (Koning, 2000))

БРАЗИЛИЯ

Единственное месторождение в Бразилии, которое добывает нефть или газ из пород кристаллического фундамента, – это месторождение Camropolis в суббассейне Sergipe. На этом месторождении добывалась нефть из меловых песчаников и нижележащего фундамента. Глубины залегания всех залежей очень малы, варьируя от 400 до 800 метров. Плотность нефти колеблется от 24 до 30,5

градусов по API. Приблизительно 85 % добычи нефти ведется из вышележащих отложений и 15 % из пород фундамента. Приблизительно 35 миллионов баррелей нефти добыто из фундамента.

АРГЕНТИНА

Месторождение Octogono – единственное месторождение в Аргентине, где добывается нефть или газ из пород фундамента. Это месторождение открыто в 1918 году в бассейне Neuquen, нефть добывалась из отложений, залегающих над фундаментом. Более глубокое бурение почти столетие спустя сосредоточилось на фундаменте и привело к обнаружению нефти в фундаменте, которая в 2015 году обеспечивала добычу нефти в 3000 баррелей в сутки (Velo, 2014).

Основной материнской породой в бассейне Neuquen является органически богатая формация Vaca Muerta (по-испански «Мертвая корова»), которая имеет возраст поздней юры и раннего мела. На месторождении Octogono основной породой фундамента является палеозойский гранит. Заполнения и скопления происходили в результате трещинообразования и реконструкции. Трещинообразование в фундаменте произошло в результате поднятия фундамента более чем на 1000 метров над глубинными породами. Было выявлено шесть зон реконструкции, соответствующих дифференциальному выветриванию.

Коэффициент нефтеизвлечения в фундаменте оценивается в 25 % из-за расширения газовой шапки на 300 метров. Высота нефтяной залежи в фундаменте составляет 300 метров. Разработка пород кристаллического фундамента и обнаружение нефти в них дало новую жизнь месторождению Octogono.

Европа

Компания Hurricane Energy, расположенная в Великобритании, сделала значительные открытия нефти на шельфе к западу от Шетландских островов. Коллекторы состоят из трещиноватых докембрийских гранитов. Дебиты до 9 800 баррелей нефти в сутки были получены в 2019 году на структуре Lincoln. Месторождение Lancaster введено в разработку в июне 2019 года, и добыча составляет 17 000 баррелей нефти в сутки из 2 добывающих скважин.

В последние годы нефть была обнаружена в фундаменте в Норвегии. В качестве примера можно привести месторождение Rolvsnes, которое вскоре будет запущено в эксплуатацию с добычей нефти из трещиноватых и выветрелых докембрийских гранитов.

Мировой опыт поиска и разработки нефти из трещиноватых и выветрелых пород-коллекторов фундамента

1) Разведочные скважины должны быть сильно отклоненными, а не вертикальными, чтобы оптимально пересечь доминирующую систему трещин. Добывающие скважины должны быть пробурены перпендикулярно или почти перпендикулярно преобладающей системе трещин.

2) Сильно сфокусированная трехмерная (3D) сейсмика, такая как CGG-CBM Veritas (Controlled Beam Migration), необходима для определения систем трещин на нефтегазовых месторождениях в фундаменте.

3) Бурение с отбором керна в трещиноватых породах фундамента затруднительно и не приветствуется буровыми инженерами. Тем не менее, обширный сбор керна необходим для предоставления критически важной информации о вещественном составе и параметрах пласта. Некоторые из типов керна должны быть датированы радиометрическим возрастом, чтобы геологи могли понять сложность геологического строения залежи.

4) Эксплуатационные скважины должны быть пробурены достаточно глубоко, чтобы полностью вскрыть залежь. Например, на нефтяном месторождении La Paz, Венесуэла, скважины пробурены на 500 метров в фундамент. На китайском месторождении Dongshenpu высота нефтяной залежи составляет 400 метров), и эксплуатационные скважины пробурены на большей части залежи.

5) Разведочные скважины не должны просто «помечать» верхнюю часть фундамента, поскольку это не позволит провести полную оценку фундамента и может привести к тому, что важное открытие «останется за бортом». Действительно, газовое месторождение Suban, Южная Суматра, не было открыто в середине 1980-х годов компанией Caltex (Chevron-Texaco), несмотря на крупную программу разведки, поскольку скважины были пробурены через осадочную часть пород, а затем просто заглублены в фундамент. Основное гигантское месторождение газа в фундаменте (5 трлн кубических футов газа) было впоследствии открыто в 1999 году компаниями Gulf Canada и Talisman Energy Canada с помощью бурения вглубь фундамента.

6) В мире существует ряд случаев, таких как гигантское месторождение La Paz в Венесуэле, где нефть в фундаменте была обнаружена гораздо позже (через 30 лет) в течение срока эксплуатации месторождения, причем внимание изначально было сосредоточено на добыче нефти из вышележащих осадочных пород. Вторым примером является нефтяное месторождение Ostogono в бассейне Neuquen, Аргентина, которое было открыто в 1918 году; добыча нефти велась из неглубоких отложений, лежащих над фундаментом. Наконец, почти столетие спустя, фундамент был пробурен и оценен, и теперь он обеспечивает запасы и потенциал роста добычи. В 2015 году добыча из фундамента составляла в среднем 3000 баррелей нефти в сутки и продолжает расти, что дало новую жизнь этому стареющему месторождению. Месторождения La Paz и Ostogono показывают, что операторам нефтегазовых месторождений, добывающих из отложений, перекрывающих кровлю фундамента, следует рассмотреть возможность бурения скважин вглубь фундамента. Трехмерная сейсмика с высоким разрешением поможет определить наилучшее местоположение для оптимального пересечения трещиноватых или выветрелых пород фундамента.

7) Выветрелые «слабые» граниты также могут служить отличными коллекторами, поскольку можно наблюдать их выходы на поверхность в тропических областях, где сильные дожди могут вымывать полевые шпаты и менее стойкие минералы и оставить после себя превосходный резервуар. Высокое содержание базальтовых минералов в сланцах, филлитах и тонкослоистых сланцах сводит на нет вторичную пористость в результате выветривания. Аналогично, граниты и кварциты с большей вероятностью

дают привлекательные, высокопористые гранитные пески, тогда как эродированные сланцы и гнейсы не являются хорошими коллекторами.

8) Геологи, геофизики, инженеры-нефтяники и экономисты должны изучить аналоги месторождений нефти и газа в образованиях фундамента по всему миру, чтобы понять, как разрабатывать такие месторождения.

Выводы

В прошлом нефтяные и газовые месторождения в фундаменте были открыты в основном случайно. Традиционный способ мышления состоял в том, что фундамент в основном плотный и не требует изучения. Тем не менее, сегодня есть несколько компаний, которые сосредоточены на исследовании кристаллического фундамента и преуспели в поиске нефти в нем. Это SOCO International во Вьетнаме и Йемене и Hurricane Exploration на западе Шетландской области в Соединенном Королевстве. Недавно компания Hurricane Exploration показала успешное восстановление зрелого бассейна в Северном море.

Автор считает, что значительные месторождения нефти и газа еще предстоит найти в Азии, Африке, Америке и во всем мире. Нетрадиционное геологическое мышление и принятие риска привели ко многим крупным мировым открытиям нефти и газа, и такие стратегии вознаградят исследователей, ищущих нефть и газ в фундаменте.

Изучение коллекторов кристаллического фундамента важно не только для нефти и газа, но и для сокращения выбросов парниковых газов в мире. Углекислый газ (CO₂) может улавливаться при закачивании в трещиноватые или выветрелые породы фундамента и, таким образом, может безопасно и постоянно захороняться. Также существует потребность в гелии, которого все больше не хватает в мире. Хозяйственный гелий получается в результате радиоактивного распада урана и тория в породах фундамента и гранитных смывах. В канадской провинции Saskatchewan в Канаде началась разработка программ по поиску гелия в фундаменте.

Наконец, читателю предлагается ознакомиться с одной из первых классических работ, опубликованных по нефти и газу в фундаменте К.К. Landes (Landes et al., 1960), в которой было сказано: «Промышленные залежи нефти в породах фундамента не являются геологическими «случайными событиями», а являются скоплениями нефти, которые подчиняются всем правилам происхождения нефти, миграции и формирования ловушек; поэтому в областях не слишком глубоко залегающего фундамента залежи нефти в фундаменте следует исследовать с тем же профессиональным мастерством и усердием, что и скопления в вышележащих отложениях».

Литература

- Chung-Hsiang P'An. (1982). Petroleum in Basement Rocks. *American Association of Petroleum Geologists, Bulletin*, 66, pp. 1597-1642. <https://doi.org/10.1306/03B5A994-16D1-11D7-8645000102C1865D>
- Harding, T.P. (1984). Graben Hydrocarbon Occurrences and Structural Style. *American Association of Petroleum Geologists*, vol. 68. <https://doi.org/10.1306/AD460A21-16F7-11D7-8645000102C1865D>
- Hung, N.D. & Le, H.V. (2004). Petroleum Geology of the Cuu Long Basin, Offshore Viet Nam. *American Association of Petroleum Geologists. Search and Discovery*, Article #10062.
- Koning, T. & Darmono, F.X. (1984). The Geology of the Beruk Northeast Field, Sumatra, Indonesia-Oil Production from Pre-Tertiary Basement Rocks.

Proceedings of the 13th Annual Convention of the Indonesia Petroleum Association, Jakarta, vol. 1, pp. 385-406.

Koning, T. (2003). Oil and Gas Production from Basement Reservoirs-Examples from Indonesia, USA, and Venezuela. *Special Publication 214 on "Hydrocarbons in Crystalline Rocks"*, Geological Society of London, pp. 83-92. This paper was also presented at the 16th World Petroleum Congress, Calgary, June 11-15, 2000. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2003.214.01.05>

Koning, T. (2014). Fractured and Weathered Basement Reservoirs in West and East Africa-a High Risk but Potentially High Reward Oil & Gas Play. *GeoConvention – the Joint Annual Convention of the Canadian Society of Petroleum Geologists*, the Canadian Society of Exploration Geophysicists, and the Canadian Well Logging Society, Calgary, Canada.

Koning, T. (2014). Global Accumulations of Oil and Gas in Fractured and Weathered Basement-Best Practices for Exploration and Production. *American Association of Petroleum Geologists, International Conference*, Istanbul, Turkey. Search and Discovery Article #20281.

Koning, T. (2019). Exploring in Asia for Oil & Gas in Naturally Fractured and Weathered Basement Reservoirs. *GeoConvention – the Joint Annual Convention of the Canadian Society of Petroleum Geologists, the Canadian Society of Exploration Geophysicists, and the Canadian Well Logging Society*, Calgary, Canada.

Landes, K.K., Amoroso, J.J., Charlesworth, L.J., Heany, F., & Lesperance, P.J. (1960). Petroleum Resources in Basement Rocks. *American*

Association of Petroleum Geologists, Bulletin, 44, pp. 1682-1691. <https://doi.org/10.1306/0BDA622D-16BD-11D7-8645000102C1865D>

Manwaring, M.S., & Weimer, B.A. (1986). Exploration for Fractured Reservoirs in Precambrian Basement Rocks of Texas Panhandle: An Integrated Approach. *American Association of Petroleum Geologists, Bulletin*, May, 1986.

Talukdar, S.C. & Marcano, F. (1994). The Petroleum Systems of the Maracaibo Basin, Venezuela. *American Association of Petroleum Geologists, Memoir 60*, pp. 463-481.

Velo, D.E., Ugarte, R., Pioli, O., Rey, F., Narrillos, D., Pascual, M., Creus, F., & Castillo, O. (2014). Oil from Granitoid Rocks-Reservoir Characterization of Fractured Basement in Neuquen Basin, Octogono Field, Argentina. *American Association of Petroleum Geologists International Conference*, Istanbul, Turkey.

Сведения об авторе

Т. Кёнинг – Старший геолог – Независимый консультант
Калгари, Канада

E-mail: tako.koning@gmail.com

Статья поступила в редакцию 02.09.2019;

Принята к публикации 23.10.2019; Опубликована 30.10.2019

IN ENGLISH

Review article

Exploring in Asia, Africa and the Americas for oil & gas in naturally fractured basement reservoirs: best practices & lessons learned

T. Koning

Calgary, Canada

E-mail: tako.koning@gmail.com

Abstract. Oil and gas occurs in basement reservoirs in many parts of the world. The reserves of basement fields are as small as one or two million barrels of oil or gas-equivalent to as much as almost 2.0 billion barrels of oil as in Libya's Auguila-Naafora field. Exploration for oil and gas in basement has been remarkably successful in the past decade with important discoveries in basement in Indonesia, United Kingdom, Norway, Chad, and Argentina. In order to successfully develop basement oil and gas fields and also to avoid costly mistakes, all available geological, geophysical, reservoir engineering and economic data must be closely studied. Also, it is very important to study analogues of basement oil and gas fields worldwide in order to understand why some fields are very successful and others turn out to be failures.

Keywords: crystalline basement, oil and gas fields, fractured reservoirs, weathered rocks, world best practices, exploring, developing

Recommended citation: Koning T. (2019). Exploring in Asia, Africa and the Americas for oil & gas in naturally fractured basement reservoirs: best practices & lessons learned. *Georesursy = Georesources*, 21(4), pp. 10-18. DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2019.4.10-18>

References

Chung-Hsiang P'An. (1982). Petroleum in Basement Rocks. *American Association of Petroleum Geologists, Bulletin*, 66, pp. 1597-1642. <https://doi.org/10.1306/03B5A994-16D1-11D7-8645000102C1865D>

Harding, T.P. (1984). Graben Hydrocarbon Occurrences and Structural Style. *American Association of Petroleum Geologists*, vol. 68. <https://doi.org/10.1306/AD460A21-16F7-11D7-8645000102C1865D>

Hung, N.D. and Le, H.V. (2004). Petroleum Geology of the Cuu Long Basin, Offshore Viet Nam. *American Association of Petroleum Geologists, Search and Discovery*, Article #10062.

Koning, T. & Darmono, F.X. (1984). The Geology of the Beruk Northeast Field, Sumatra, Indonesia-Oil Production from Pre-Tertiary Basement Rocks. *Proceedings of the 13th Annual Convention of the Indonesia Petroleum Association*, Jakarta, vol. 1, pp. 385-406.

Koning, T. (2003). Oil and Gas Production from Basement Reservoirs-Examples from Indonesia, USA, and Venezuela. *Special Publication 214 on*

"Hydrocarbons in Crystalline Rocks", Geological Society of London, pp. 83-92. This paper was also presented at the 16th World Petroleum Congress, Calgary, June 11-15, 2000. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2003.214.01.05>

Koning, T. (2014). Fractured and Weathered Basement Reservoirs in West and East Africa-a High Risk but Potentially High Reward Oil & Gas Play. *GeoConvention – the Joint Annual Convention of the Canadian Society of Petroleum Geologists*, the Canadian Society of Exploration Geophysicists, and the Canadian Well Logging Society, Calgary, Canada.

Koning, T. (2014). Global Accumulations of Oil and Gas in Fractured and Weathered Basement-Best Practices for Exploration and Production. *American Association of Petroleum Geologists, International Conference*, Istanbul, Turkey.

Koning, T. (2019). Exploring in Asia for Oil & Gas in Naturally Fractured and Weathered Basement Reservoirs. *GeoConvention – the Joint Annual Convention of the Canadian Society of Petroleum Geologists*, the Canadian Society of Exploration Geophysicists, and the Canadian Well Logging Society, Calgary, Canada.

Landes, K.K., Amoroso, J.J., Charlesworth, L.J., Heany, F., & Lesperance, P.J. (1960). Petroleum Resources in Basement Rocks. *American Association of Petroleum Geologists, Bulletin*, 44, pp. 1682-1691. <https://doi.org/10.1306/0BDA622D-16BD-11D7-8645000102C1865D>

Manwaring, M.S., and Weimer, B.A. (1986). Exploration for Fractured Reservoirs in Precambrian Basement Rocks of Texas Panhandle: An Integrated Approach. *American Association of Petroleum Geologists, Bulletin*, May, 1986.

Talukdar, S.C. & Marcano, F. (1994). The Petroleum Systems of the Maracaibo Basin, Venezuela. *American Association of Petroleum Geologists, Memoir 60*, pp. 463-481.

Velo, D.E., Ugarte, R., Pioli, O., Rey, F., Narrillos, D., Pascual, M., Creus, F., & Castillo, O. (2014). Oil from Granitoid Rocks-Reservoir Characterization of Fractured Basement in Neuquen Basin, Octogono Field, Argentina. *American Association of Petroleum Geologists International Conference*, Istanbul, Turkey.

About the Author

Tako Koning – Senior Geologist – Independent Consultant
Calgary, Canada

E-mail: tako.koning@gmail.com

Manuscript received 02 September 2019;

Accepted 23 October 2019;

Published 30 October 2019