



DOI 10.22363/2312-8143-2022-23-3-254-262
УДК 551.73/.78

Научная статья / Research article

Закономерности и геоисторические предпосылки нефтегазовой специализации рифтогенных осадочных бассейнов Африки

В.М. Усова

Российский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация

usova-vm@rudn.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 4 июля 2022 г.
Доработана: 20 сентября 2022 г.
Принята к публикации: 22 сентября 2022 г.

Ключевые слова:

рифтогенные бассейны, поздний фанерозой, нефтегазовая специализация, рифтовые бассейны, Африка, офшорные бассейны, гранулитовые пояса

Аннотация. В Африке и на ее подводных окраинах расположены осадочные бассейны позднего фанерозоя рифтового происхождения. Причины нефтегазовой специализации бассейнов данного класса остаются во многом неясными. Выявлены закономерности, которые могли иметь в этом отношении определяющее значение. Внутриконтинентальные бассейны характеризуются почти исключительно месторождениями нефти. В периконтинентальных бассейнах значение месторождений газа уменьшалось, а нефти увеличивалось в соответствии с уменьшением времени их рифтового заложения и прогибания (от С3, Р-11, К1 до J5-K12). Дифференциация бассейнов на тектонотипы «незавершенного» и «завершенного» развития, а также асинхронность прогибания вторых, ответственно с размерами и возрастом панафриканских гранулитовых поясов, в которых бассейны заложались. Поскольку эти пояса являлись наиболее активными коровыми структурами, данная закономерность может рассматриваться как свидетельство влияния их унаследованных или возрожденных глубинных «энергосистем» на процессы рифтогенеза и генерации углеводородов. Привлечение данных сейсмотомографии показало, что преимущественно нефте- и газоносные рифтогенные бассейны расположены в областях менее и более разогретой мантии соответственно. Приведен пример вероятного влияния на нефтегазовые системы бассейнов центров кайнозойского островного вулканизма. Сравнительный анализ геолого-геофизических данных, в том числе и по тепловым потокам, приводит к заключению, что температурные условия образования углеводородов в рифтогенных бассейнах Африки определялись сочетанием глубинных тепловых систем разных масштабов: региональных (континент – океан), субрегиональных (корово-структурных) и локальных (вулканических центров).

Благодарности

Автор выражает благодарность доктору геолого-минералогических наук Е.А. Долгинову за советы при подготовке статьи к публикации.

Для цитирования

Усова В.М. Закономерности и геоисторические предпосылки нефтегазовой специализации рифтогенных осадочных бассейнов Африки // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2022. Т. 23. № 3. С. 254–262. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2022-23-3-254-262>

© Усова В.М., 2022



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

Regularities and geohistorical prerequisites of oil and gas specialization of rift sedimentary basins of Africa

Valentina M. Usova 

Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), Moscow, Russian Federation

✉ usova-vm@rudn.ru

Article history

Received: July 4, 2022

Revised: September 20, 2022

Accepted: September 22, 2022

Keywords:

rift basins, late Phanerozoic, oil, gas, specialization, rift basins, Africa, offshore basins, granulite belts

Abstract. Sedimentary basins of Late Phanerozoic rift origin are located in Africa and on its underwater margins. The reasons for the oil and gas specialization of basins of this class remain largely unclear. Patterns have been identified that could be of decisive importance in this regard. The intracontinental basins are characterized almost exclusively by oil deposits. In the pericontinental basins, the value of gas deposits decreased, and oil increased in accordance with the decrease in the time of their reef laying and deflection (from C3, P-J1, K1 to J5-K12). The differentiation of basins into tectonotypes of “incomplete” and “completed” development, as well as the asynchronous deflection of the latter reflected in their oil and gas specialization, correlate accordingly with the size and age of the Pan-African granulite belts in which the basins were laid. Since these belts were the most active core structures, this pattern can be considered as evidence of the influence of their inherited or reborn deep “energy systems” on the processes of rifting and generation of hydrocarbons. The use of seismography data showed that mainly oil and gas-bearing rift basins are located in areas of less and more heated mantle respectively. An example of the probable influence of Cenozoic island volcanism centers on oil and gas basin systems is given. A comparative analysis of geological and geophysical data, including heat flows, leads to the conclusion that the temperature conditions of hydrocarbon formation in the rift basins of Africa were determined by a combination of deep thermal systems of different scales: regional (continent – ocean), subregional (cow-structural) and local (volcanic centers).

Acknowledgements

The author expresses gratitude to the Doctor of Geological and Mineralogical Sciences E.A. Dolginov for advice in preparing the article for publication.

For citation

Usova VM. Regularities and geohistorical prerequisites of oil and gas specialization of rift sedimentary basins of Africa. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2022;23(3):254–262. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2022-23-3-254-262>

Введение

В Африке и на ее подводных окраинах расположены осадочные бассейны позднего фанерозоя рифтового происхождения (внутри- и переконтинентальные), большинство которых являются нефтегазоносными. При сравнительно высокой степени изученности бассейнов остается нераскрытыми причины их углеводородной специализации. Целью проведенного исследования, главные результаты которого изложены в настоящей статье, явилось выяснение этого актуального в региональном и теоретических планах,

вопроса. Он базировался на указанных в тексте публикациях по геологии бассейнов, их коровой инфраструктуры и региональной сейсмотомографии. Главное направление исследования было ориентировано на установленное ранее совпадение рифтогенных бассейнов с гранулитовыми поясами являвшимися наиболее выраженными и длительно развивавшимися (то есть активными) структурами самой молодой, так называемой панафриканской коры [1]. Именно это позволило выявить ряд важных закономерностей развития рифтогенных бассейнов, имевших отношение к их нефтегазовой специализации.

В Африке осадочные бассейны позднего фанерозоя рифтового происхождения (внутри- и переконтинентальные) характеризуются разной нефтегазовой специализацией, причины чего остаются неясными. Проведенные исследования позволили подойти к решению этого вопроса. Выявлено влияние на условия нефтегазообразования в бассейнах данного типа тепловых источников из глубинных систем их коровых интрасруктур, а вдоль подводных окраин Африки «тепловых полей» океанов.

1. Рифты «незавершенного» и «завершенного» типа

В «Большой Африке», включающей ее наземную часть и подводные окраины в позднем

фанерозое формировались рифтовые бассейны нескольких генераций двух главных типов: сохранившие свое изначально материковое положение; оказавшиеся под водами рожденных в них океанов и комплексами морских отложений. В литературе такие бассейны именуются рифтами «незавершенного» и «завершенного» развития (типов) соответственно. Для удобства изложения материала бассейны обоих типов рассматриваются под общим термином «рифтогенные».

В рифтогенных внутри- и периконтинентальных бассейнах выявлены многочисленные промышленные скопления углеводородов [2] с различным соотношением месторождений нефти и газа (рис. 1).



Рис. 1. Расположение рифтогенных бассейнов с различной нефтегазовой специализацией:

1 – рифтовые внутриконтинентальные бассейны – почти исключительно нефтеносные; 2–5 – эпирифтовые периконтинентальные бассейны: 2 – преимущественно нефтеносные, 3 – преимущественно газоносные, 4 – почти исключительно газоносные, 5 – бассейны Морондава с термально разрушенными месторождениями нефти; C – Сирте; T – Термит; My – Муджлад

Figure 1. Location of rift basins with different oil and gas specialization:

1 – rift intracontinental basins – almost exclusively oil-bearing; 2–5 – epi-rift pericontinental basins: 2 – mainly oil-bearing, 3 – mainly gas-bearing, 4 – almost exclusively gas-bearing, 5 – Morondava basins with thermally destroyed oil fields; C – Sirte, T – Termite, My – Mujlad

В рифтовых бассейнах «завершенного» развития, перешедших в стадии синокеанического прогибания их большая часть содержится в верхних морских комплексах, содержащих главные

нефтематеринские отложения [3]. Оба этих обстоятельства могут явиться основой для предположения о независимости систем этих так называемых дрейфовых комплексов и вызывать со-

мнение в корректности сопоставления углеводородной специализации внутри- и периконтинентальных бассейнов хотя и имеющих общее рифтовое происхождение. Приведенные ниже геологические закономерности размещения месторождений нефти и газа вносят ясность в этот актуальный для нашего анализа вопрос.

2. Корреляция нефтегазовой специализации

Установлена четкая корреляция нефтегазовой специализации рифтогенных бассейнов с их расположением, а периконтинентальных бассейнов – со временем их рифтового заложения и прогибания. Крупнейшие внутриконтинентальные бассейны «незавершенного» развития Центральной Африки Муджлад (Судан) и Термит (Нигер), начавшие прогибание в начале неокома и позднемеловой Сирт (Ливия) характеризуются почти исключительно месторождениями нефти (рис. 1). В офшорных бассейнах периферии Гвинейского залива, испытавших рифтовое прогибание в разные эпохи раннего мела, частично с поздней юры, также главное значение имеют месторождения нефти, однако при подчиненной роли месторождений газа.

Бассейны подводных окраин Юго-Восточной и Юго-Западной Африки, испытавшие рифтовое развитие с позднего карбона до ранней юры и раннего мела соответственно характеризуются почти исключительно месторождениями газа, в том числе и очень крупными. Газовые месторождения свойственны также для офшорного бассейна Ламу (Кения) и бассейна Огадена Эфиопии, прошедших рифтовое развитие в перми – раннем триасе. В Мавритано-Сенегальском бассейне Северо-Западной Африки, рифтовое прогибание которого происходило в триасе, выявлены крупные месторождения газа, в меньшей мере нефти (рис. 1, 2). Эти данные свидетельствуют о том, что нефтегазовая специализация синокеанических комплексов периконтинентальных бассейнов определялась в значительной степени (или главным образом) системами генерации углеводородов, возникшими во время их рифтового развития.

О вероятной природе обеих закономерностей позволяют судить следующие факты и аргументы. Хорошо известно, что генерация жидких и газообразных углеводородов происходит при различных, соответственно менее и более высоких температурных условиях. Из этого, с учетом рассмотренной выше закономерности распреде-

ления месторождений нефти и газа следует, что эпирифтовые периконтинентальные и внутриконтинентальные рифтовые бассейны развивались соответственно в условиях относительно более низких и более высоких тепловых потоков и градиентов.

Такое заключение хорошо согласуется с различиями «энергоресурсов» глубинных рифтообразующих систем, обеспечивающих главным образом денсификацию и лишь частичное механическое разрушение материковой коры («незавершенный» рифтогенез) или полное разрушение древней литосферы и рождение океанов («завершенный» рифтогенез).

Имеются основания считать, что глубинные «энергосистемы», обусловившие тектоническую дифференциацию рифтовых структур, возникли во время структурного оформления самого молодого, так называемого панафриканского фундамента, консолидированного в конце протерозоя, местами вдоль окраин Африки в раннем-среднем палеозое [4].

Свидетельством этому является совпадение рифтовых бассейнов «незавершенного» и «завершенного» развития с панафриканскими гранулитовыми поясами разных размеров, образованных в целом наиболее активными, но различными по интенсивности процессами корообразования. А именно, установлено, что внутриконтинентальные рифты совпадают с гранулитовыми поясами сравнительно небольших размеров [5; 6], а рифты другого типа, предопределившие дезинтеграцию Гондваны, заложилась по гранулитовым мегапоясам, высокоплотные и резко «утоненные» комплексы которых образуют «транзитную» кору под офшорными бассейнами и залегают в тектонических покровах на материковых окраинах Танзании, Мозамбика, Мадагаскара, Намибии, Либерии, Сьерра-Леоне и Мавритании. Идея о нижнекорой природе фундаментов офшорных бассейнов была высказана еще в середине прошлого столетия, а затем подтверждена многими исследователями в том числе и последних лет [7].

3. Причины нефтегазовой специализации

Вторым из обсуждаемых является вопрос о причинах нефте- или газовой специализации периконтинентальных эпирифтовых бассейнов разного возраста. Подойти к его решению удалось с привлечением данных о возрасте коровых

комплексов гранулитовых мегапоясов, в которых заложилась рифтовые бассейны «завершенного» развития [8; 9].

Проведенное исследование позволило выявить смещение рифтовых структур данного типа от более молодых (то есть более «активных») сегментов к более древним (менее «активными») сегментам мегапоясов (рис. 2).

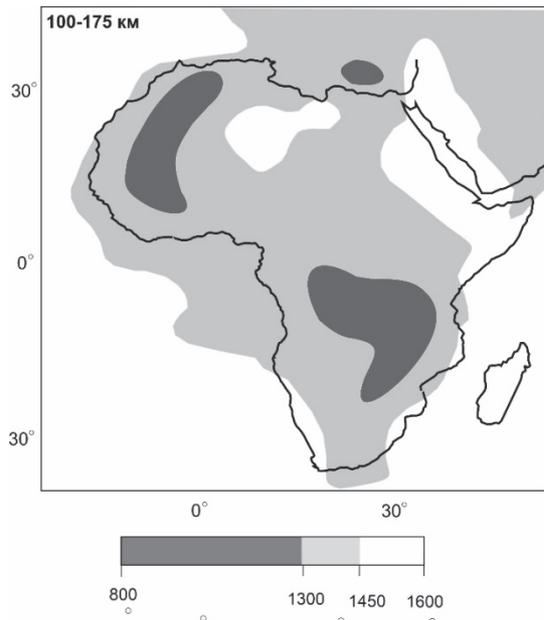


Рис. 2. Температура верхней мантии Африки на глубине 180 км (по [10] с упрощениями)
Figure 2. Temperature of the upper mantle of Africa at a depth of 180 km (based on [10] with simplifications)

Эта закономерность может интерпретироваться как свидетельство влияния остаточных или возрожденных энергоресурсов глубинных систем гранулитовых мегапоясов не только на последовательность рифтообразования и разрушения древней литосферы, но также на температурные условия генерации в осадочных комплексах газообразных или жидких углеводородов.

Повышенная тектоно-термальная активность восточноафриканского гранулитового мегапояса, в котором заложилась ранние и главные газоносные бассейны проявилась не только в его затянувшемся до середины палеозоя формировании. Установлено, что гранулиты Мадагаскара, являвшиеся частью этого мегапояса, образовались при исключительно высоком геотермальном градиенте в 25–50 °C/км около 0,58–0,53 млрд лет назад [11].

В интервале 500–450 млн лет назад на Мадагаскаре и в Восточной Африке, в областях распро-

странения «молодых» гранулитов, происходили широкомасштабные процессы гидротермальной деятельности и связанное с ней массовое образование послескладчатых пегматитов с драгоценными и полудрагоценными камнями [1]. Различной разогретостью недр «малых» и «больших» гранулитовых поясов была обусловлена неравномерность в рифтогенных бассейнах синседиментационного магматизма. Он в виде излияния базальтов проявился лишь в самых ранних периконтинентальных бассейнах Юго-Восточной, Юго-Западной отчасти Западной Африки, заложившихся в самых молодых сегментах гранулитовых мегапоясов. Мантийный магматизм завершал переход от рифтового к послерифтовому развитию бассейнов Нижнего Замбези в ранней юре (вулканиты «моноклинали Лемомбо»), бассейнов Оранж, Людерец, Валвис – в раннем мелу, происходил в позднемеловое время при синокеаническом прогибании бассейна Морондава Мадагаскара.

С базальтоидного магматизма начиналось рифтовое развитие в юре рифтовых, ныне офшорных бассейнов Либерии – Гвинеи. На условия генерации углеводородов в осадочных бассейнах рассматриваемых типов помимо тепловых источников из автономных глубинных систем рифтообразования, возникших во время формирования «малых» и больших гранулитовых поясов оказывали влияние и региональные тепловые неоднородности верхней мантии. Свидетельством этому является расположение преимущественно или исключительно нефтеносных и газоносных бассейнов в «полях» соответственно умеренно и максимально разогретой мантии, что хорошо видно при сопоставлении рис. 1 и 2. Особенно показательным в этом отношении являются периконтинентальные рифтогенные бассейны с различной нефтегазовой специализацией. Из них преимущественно нефтеносные бассейны периферии Гвинейского залива находятся в области распространения в сторону Атлантического океана умеренно разогретой «континентальной» мантии, а газоносные бассейны расположены в районах температурных «ингрессий» на окраины Африки наиболее разогретой мантии обоих окружающих ее океанов.

Следует отметить хорошо выраженную корреляцию с тепловыми неоднородностями мантии Атлантического и отчасти Индийского океанов измеренных придонных тепловых потоков [12], что является дополняющим аргументом влияния теплового состояния океанов на осадочные ком-

плексы рифтогенных бассейнов и их нефтегазовые системы.

Сочетание автономных тепловых источников из геосистем гранулитовых мегапоясов и влияния «тепловых полей» верхней мантии океанов нашло отражение в неравномерностях измеренных тепловых потоков в периконтинентальных преимущественно газо- и нефтеносных бассейнах [13]. Высокие тепловые аномалии выявлены в ранних офшорных бассейнах Танзании, Кении (80–85 мВ/м²), атлантической окраины ЮАР, Намибии (66–72 мВ/м²), Мавритании и Сенегала (61–150 мВ/м²). Существенно уступают им в этом отношении более молодые бассейны периферии Гвинейского залива. Вместе с тем среди них есть одно исключение, подтверждающие, однако общую закономерность. Оно

относится к прибрежному району Габона (рис. 3). На рисунке стратиграфическими индексами показаны возрастные интервалы прогибаний «завершенного» развития (вдоль окраин Африки) и время заложения бассейнов «незавершенного» развития (в Центральной и Северной Африке). Цифрами (млн лет) показаны: в скобках временные диапазоны рифтовых прогибаний периконтинентальных бассейнов, в прямоугольниках возраст нижнекоровых комплексов «транзитной» коры, залегающих на окраинах Африки и Мадагаскаре. Здесь крупная тепловая аномалия в 100 мВ/м² совпадает с Береговым (Восточным) бассейном, рифтовое развитие которого началось в перми, было приостановлено в триасе и продолжило в юре-раннем мелу [14].



Рис. 3. Нефтегазовые рифтогенные бассейны позднего фанерозоя Африки: *эпирифтовые периконтинентальные:* 1 – Дахла-Дуккала, 2 – Сенегало-Мавританский, 3 – Гвинейско-Либерийский, 4 – Кот-д'Ивуара, 5 – Тано, 6 – Кета, 7 – Дуала-Рио-Муни, 8 – Габонский, 9 – Кванза-Нижнего Конго, 10 – Валвис-Людерец, 11 – Оранж, 12 – дельты Замбези, 13 – Морондава, 14 – Рувума, 15 – Пемба-Ламу, 16 – Сомалийский (возможно нерифтогенный); *рифтовые внутриконтинентальные:* 17 – Сирт, 18 – Термит, 19 – Саламат, 20 – Муджлат

Figure 3. Oil and gas rift basins of the Late Phanerozoic of Africa *Epirift pericontinental:* 1 – Dakhla-Dukkala, 2 – Senegalese-Moorish, 3 – Guinean-Liberian, 4 – Ivory Coast, 5 – Tano, 6 – Keta, 7 – Douala-Rio Muni, 8 – Gabonese, 9 – Kwanza-Lower Congo, 10 – Valvis-Luderec, 11 – Orange, 12 – Zambezi Delta, 13 – Morondawa, 14 – Ruwuma, 15 – Pemba Lamu, 16 – Somali (possibly non-diphthogenic); *rift intracontinental:* 17 – Sirte, 18 – Termite, 19 – Salamat, 20 – Mujlat.

4. Влияние островного вулканизма на генерацию углеводородов

Считается, что кайнозойский «островной» вулканизм является одной из причин повышенных тепловых потоков в смежных эпирифтовых

офшорных бассейнах раннего заложения [13]. Нельзя исключать, что этот фактор также сказался на формировании в этих бассейнах газовых месторождений, в частности за счет крекингового преобразования залежей нефти [15].

С незавершенностью такой регенерации могли быть связаны разрушение гиганских месторождений нефти и ее изливание на поверхность с образованием обширных полей асфальтитов Бемолонга и Тсимороро на Западе Мадагаскара. Такое предположение хорошо согласуется с данными трекового анализа по апатитам, согласно которым на заключительных этапах развития бассейна Морондава произошло повышение температуры до 90–100°, в первую очередь вдоль реактивированных разломов фундамента. Это событие совпало по времени с разогреванием недр остова, связанным с четвертичным вулканизмом, центры которого расположены вдоль его осевой зоны [16].

Хорошим примером связи процессов преобразования нефтяных залежей в месторождениях газа является западная область Северо-Африкан-

ской провинции платформенных бассейнов палеозоя-мезозоя. Данная провинция характеризуется преобладанием месторождений нефти. Исключение представляют южный и северный районы Алжира, в которых находятся многочисленные в том числе и крупные газовые месторождения [17]. Последние расположены вблизи кайнозойского центра вулканизма на нагорье Хоггара и Тель-Атласского альпийского пояса складчатости соответственно, характеризующихся повышенными тепловыми потоками [13]. Бесспорное влияние этих термоактивных структур на генерацию углеводородов близрасположенных бассейнах выражается в сосредоточении месторождений газа в пределах изотерм повышенных значений, находящихся в пространственной ассоциации с молодым вулканическим центром и альпидами (рис. 4).

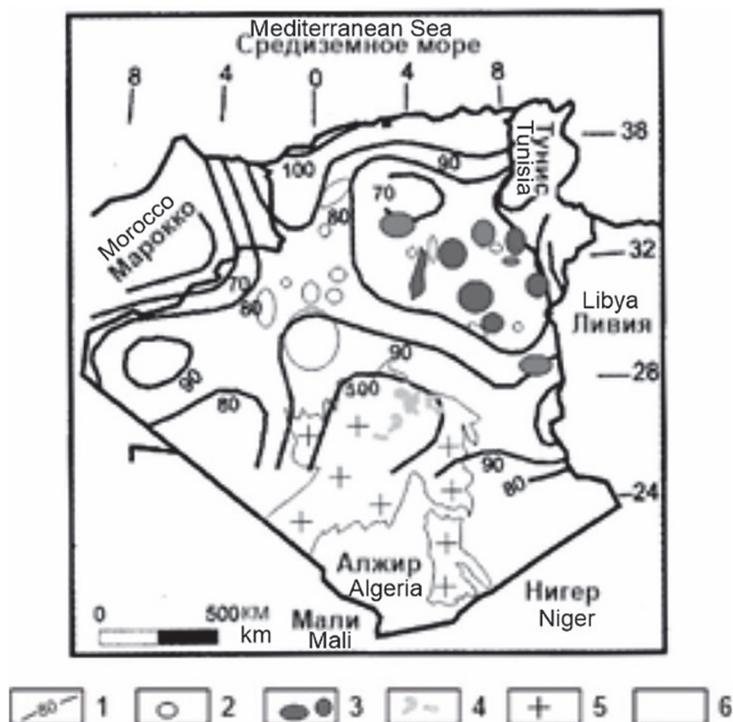


Рис. 4. Соотношение расположения месторождений нефти и газа в Алжире с тепловыми потоками [17]:
 1 – изолинии тепловых потоков, мВ/м; 2 – месторождения газа; 3 – месторождения нефти; 4 – кайнозойские вулканиды нагорья Хоггара;
 5 – выходы панафриканского фундамента; 6 – южная граница альпийского Тель-Атласского пояса складчатости

Figure 4. The ratio of the location of oil and gas fields in Algeria with heat flows [17]:
 1 – isolines of heat flows, mV/m; 2 – gas fields; 3 – oil fields; 4 – Cenozoic volcanites of the Hoggar Highlands;
 5 – outcrops of the Pan-African basement; 6 – the southern border of the Alpine Tel-Atlas folding belt

5. Обсуждение

В публикациях, относящихся к рифтовым бассейнам позднего фанерозоя Африки, развитие их нефтегазовых систем рассматривается в соответствии с традиционными моделями, кото-

рые предусматривают глубину, время погружения нефтематеринских отложений и температурные условия преобразования в них органических веществ. Однако причины неравномерности тепловых потоков, имеющих как это счита-

ются имеющие глубинное происхождение в таких моделях не рассматривается, что не дает полной картины геосторических связей нефтегазовой специализации бассейнов данного типа с их инфраструктурами. Выполненное исследование восполняет этот пробел. Оно показало, что генерация углеводородов в рифтогенных бассейнах Африки «незавершенного» и особенно «завершенного» развития зависело во многом от глубинных тепловых источников различной природы.

Заключение

Проведенное исследование показало, что нефтегазовая специализация осадочных бассейнов рифтового происхождения Африки коррелируется с их региональным положением и возрастом (временем заложения), определяемых особенностями панафриканских инфраструктур, а генерация углеводородов в бассейнах происходила при влиянии разных глубинных источников. Из последних общими являлись различные по интенсивности потоки тепломассопереноса из глубинных систем гранулитовых поясов разных размеров, в которых бассейны формировались. В бассейнах «завершенного» развития, перешедших в стадию переконтинентального прогибания, большое значение имело влияние «тепловых полей» рожденных в них океанов, а также мезозойского синседиментационного и кайнозойского островного магматизма.

Результаты исследования могут рассматриваться в качестве научной базы при прогнозной оценке рифтогенных бассейнов на обнаружение промышленных месторождений нефти или газа.

Список литературы / References

1. Dolginov EA, Davidenko IV, Stihotvorceva NA. *Geology and minerals of East Africa*. Moscow: Nedra Publ.; 1982. (In Russ.)

Долгинов Е.А., Давиденко И.В., Стихотворцева Н.А. Геология и полезные ископаемые Восточной Африки. М.: Недра. 1982. 230 с.

2. Modelevsky MS, Modelevsky MM. Assessment of the discovered and undiscovered oil and gas of Africa. *Russian Geology and Geophysics*. 2016;57(9):1342–1348. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2016.08.019>

Моделевский М.С., Моделевский М.М. Общая оценка нефтегазового потенциала Африканского континента // Геология и геофизика. 2016. Т. 57. № 9. С. 1707–1714. <https://doi.org/10.15372/GiG20160909>

3. Brownfield ME, Charpentier RR. Geology and total petroleum systems of the Gulf of Guinea province of West Africa. *U.S. Geological Survey Bulletin*. 2006; 2207(C). <https://doi.org/10.3133/b2207C>

4. Muñoz-Barrera JM, Rotevatn A, Gawthorpe R, Henstra G, Kristensen T. The role of structural inheritance in the development of high-displacement crustal faults in the necking domain of rifted margins: The Klakk Fault Complex, Frøya High, offshore mid-Norway. *Journal of Structural Geology*. 2020;140:104–163. <https://www.doi.org/10.1016/j.jsg.2020.104163>

5. Dolginov EA. On the problem of the origin of oceans. *Byulleten MOIP. Otdel Geologii*. 1979;54(1):22–46. (In Russ.)

Долгинов Е.А. К проблеме происхождения океанов // Бюллетень МОИП. Отдел Геологии. 1979. Т. 54. Вып. 1. С. 22–46.

6. Dolginov EA, D'Almeida JF. The relationship of Late Phanerozoic rifts with the structures of the Pre-Cambrian basement of the Arabian-African platform. *Geotektonika*. 2002;(5):23–31. (In Russ.)

Долгинов Е.А., Д'Альмейда Ж.Ф. Соотношение рифтов позднего фанерозоя со структурами докембрийского фундамента Аравийско-Африканской платформы // Геотектоника. 2002. № 5. С. 23–31.

7. Gillard M, Sauter D, Tugend J, Tomasi S, Epin M, Manatschal G. Birth of an oceanic spreading center at a magma-poor rift system. *Scientific Report*. 2017;7:15072. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-15522-2>

8. Daszinnies MC. *The Phanerozoic thermo-tectonic evolution of Northern Mozambique constrained by 40Ar/39Ar, fission track and (U-Th)* (dissertation on obtaining the doctoral degree). Bremen; 2006.

9. Fritz H., Abdelsalam M., Ali K.A., Bingen B., Collins A.S., Fowler A.R., Ghebreab W., Hauzenberger C.A., Johnson P.R., Kusky T.M., Macey P., Muhongok S., Stern R.J., Viola G. Orogen styles in the East African Orogen: a review of the Neoproterozoic to Cambrian tectonic evolution. *Journal of African Earth Sciences*. 2013;86: 65–106. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2013.06.004>

10. Priestley K, McKenzie D, Debayle É, Pilidou S. The African upper mantle and its relationship to tectonics and surface geology. *Geophysical Journal International*. 2008;175:1108–1126. <https://doi.org/10.1111/J.1365-246X.2008.03951.X>

11. Frezsimons CW. Pan-African granulites of Madagascar and southern India: Gondwana assembly and parallels with modern Tibet. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*. 2016;111(2):73–88. <https://doi.org/10.2465/jmps.151117>

12. Khutorskoy MD. Depth of mantle plumes sources and its thermal regime. *Monitoring. Science & Technologies*. 2021;(3):20–31. (In Russ.) <https://doi.org/10.25714/MNT.2021.49.003>

Хуторской М.Д. Глубина источников и тепловой режим мантийных плюмов // Мониторинг.

Наука и технологии. 2021. № 3 (49). С. 20–31. <https://doi.org/10.25714/MNT.2021.49.003>

13. Macgregor D. Thermal anomalies across Africa: causes and effects on petroleum systems. *International Conference and Exhibition, Cape Town, South Africa, 4–7 November, 2018*. <https://doi.org/10.1306/11189Macgregor2019>

14. Brink AH. Petroleum geology of Gabon Basin. *AAPG Bulletin*. 1974;58:216–235. <https://www.doi.org/10.1306/83D913BC-16C7-11D7-8645000102C1865D>

15. Mahanjane ES, Franke D, Lutz R, Winsemann K, Reichert C. Maturity and petroleum systems modelling in the offshore Zambezi Delta depression and Angoche Basin,

Northern Mozambique. *Journal of Petroleum Geology*. 2014;37(4):329–348. <https://www.doi.org/10.1111/jpg.12589>

16. Pratt MJ, Wysession ME, Aleqabi G, Wiens DA, Nyblade AA, Shore P, Rambolamanana G, Andriampenanana F, Tsiriandrimanana R, Tucker R, Barruol G, Rindrahariasona EJ. Shear velocity structure of the crust and upper mantle of Madagascar derived from surface wave tomography. *Earth and Planetary Sciences Letters*. 2016;458(2):405–417. <https://www.doi.org/10.1016/j.epsl.2016.10.041>

17. Saibi H. Geothermal resources in Algeria. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2009;13:2544–2552. <https://www.doi.org/10.1016/j.rser.2009.06.019>

Сведения об авторе

Усова Валентина Михайловна, старший преподаватель, департамент недропользования и нефтегазового дела, Инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0000-0002-0023-5913, Scopus Author ID: 57205576129, eLIBRARI SPIN-код: 1276-3570; usova-vm@rudn.ru

About the author

Valentina M. Usova, senior lecturer, Department of Geology, Mineral Development and Oil & Gas Engineering, Academy of Engineering, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-0023-5913, Scopus Author ID: 57205576129, eLIBRARI SPIN-code: 1276-3570; usova-vm@rudn.ru