

УДК 553.98(6)

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2024-63-6-100-113

ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПРИРОДНЫХ РЕСУРСОВ АФРИКИ

Николай Николаевич Еремин¹, Ксения Александровна Ситар²✉,
Екатерина Ивановна Барановская³, Любовь Николаевна Орлова⁴,
Андрей Витальевич Коротаев⁵, Андрей Григорьевич Фесюн⁶,
Мэри Рафаэлевна Авдалян⁷, Светлана Алексеевна Глухова⁸,
Борис Владимирович Георгиевский⁹, Игорь Юрьевич Гришин¹⁰

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; neremin@geol.msu.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; k.sitar@oilmsu.ru ✉

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; baranovskaya_kat@mail.ru

⁴ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; lyuba_orl@mail.ru

⁵ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; akorotayev@gmail.com

⁶ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; fesyun@iaas.msu.ru

⁷ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; ramaryko@yandex.ru

⁸ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; koval.sa95@yandex.ru

⁹ АО «Зарубежнефть», Москва, Россия; bvgeo@mail.ru

¹⁰ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; igrishin@sev.msu.ru

Аннотация. На основании комплексного обзора геологического строения осадочных бассейнов рассмотрен потенциал энергетических ресурсов стран Африки. На основе многочисленных источников проведена категоризация стран по величине добычи углеводородов, а также по величине их ресурсного потенциала. Для крупнейших по добыче и запасам стран приводится сопоставление с основными нефтегазоносными бассейнами, в пределах которых расположены добывающие месторождения и разведаны основные запасы углеводородов. В условиях перехода к возобновляемым источникам энергии в статье рассматриваются африканские страны, обладающие высоким геотермальным потенциалом, такие как Кения, Эфиопия, Уганда, Танзания, Замбия, способным удовлетворить спрос на электроэнергию и тепло. Рассмотрены различные направления применения геотермального тепла в зависимости от температуры теплоносителя. В статье приведены примеры успешного применения современных цифровых технологий для выделения перспективных участков для дальнейших исследований и эксплуатации.

Ключевые слова: энергетические ресурсы, геологические предпосылки, углеводородный потенциал, геотермальная энергия, Африка

Для цитирования: Еремин Н.Н., Ситар К.А., Барановская Е.И., Орлова Л.Н., Коротаев А.В., Фесюн А.Г., Авдалян М.Р., Глухова С.А., Георгиевский Б.В., Гришин И.Ю. Геологические предпосылки энергетических природных ресурсов Африки // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2024. № 6. С. 100–113.

GEOLOGICAL BACKGROUND OF AFRICA'S NATURAL ENERGY RESOURCES

Nikolay N. Eremin¹, Ksenia A. Sitar²✉, Ekaterina I. Baranovskaya³,
Lyubov N. Orlova⁴, Andrey V. Korotaev⁵, Andrey G. Fesyun⁶, Mary R. Avdalyan⁷,
Svetlana A. Glukhova⁸, Boris V. Georgievskiy⁹, Igor Yu. Grishin¹⁰

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; neremin@geol.msu.ru

² Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; k.sitar@oilmsu.ru ✉

³ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; baranovskaya_kat@mail.ru

⁴ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; lyuba_orl@mail.ru

⁵ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; akorotayev@gmail.com

⁶ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; fesyun@iaas.msu.ru

⁷ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; ramaryko@yandex.ru

⁸ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; koval.sa95@yandex.ru

⁹ JSC «Zarubezhneft», Moscow, Russia; bvgeo@mail.ru

¹⁰ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; igrishin@sev.msu.ru

Abstract. The article provides a comprehensive overview of the potential of energy resources of African countries based on geological prerequisites in the structure of sedimentary basins of the region. On the basis of numerous sources, the categorization of countries by the amount of hydrocarbon production, as well as by the size of resource potential of countries, has been carried out. For the largest countries in terms of production and reserves, a comparison is given with the main oil and gas basins, within which the producing fields are located and the main hydrocarbon reserves have been explored. In the context of the transition to renewable energy sources, the article examines

African countries with high geothermal potential, such as Kenya, Ethiopia, Uganda, Tanzania, Zambia, capable of meeting the demand for electricity and heat. Various directions of application of geothermal heat depending on the temperature of the coolant are considered. The article provides examples of successful application of modern digital technologies to identify promising sites for further research and operation.

Keywords: energy resources, geological prerequisites, hydrocarbon potential, geothermal energy, Africa

For citation: Eremin N.N., Sitar K.A., Baranovskaya E.I., Orlova L.N., Korotaev A.V., Fesyun A.G., Avdalyan M.R., Glukhova S.A., Georgievskiy B.V., Grishin I.Yu. Geological background of Africa's natural energy resources. *Moscow University Geol. Bull.* 2024; 6: 100–113. (In Russ.).

Введение. Африка с ее растущим населением все чаще признается ключевым игроком в мировой политике и экономике. Стратегическое значение континента заключается в его экономическом потенциале, его роли в мировом управлении и его богатом запасе энергетических и минеральных ресурсов. За последние годы Россия, среди других мировых держав, усилила свое взаимодействие с африканскими странами, подчеркивая значимость российско-африканских отношений. Одним из перспективных направлений для расширения взаимоотношений рассматриваются инвестиционные проекты в сфере энергетики и горнодобывающем секторе. Энергетические ресурсы Африки имеют стратегическое значение не только для развития самого континента, но и для мирового энергетического рынка в целом, а также для поддержания общей энергетической безопасности.

Страны Африки по своему нефтегазовому потенциалу сильно различаются. Это обусловлено принципиальными и ключевыми различиями геологического строения, величиной и продуктивностью расположенных на их территориях нефтегазоносных бассейнов, а также степенью и сложностью геологического освоения, геологической разведкой и разработкой месторождений в условиях суши и шельфа. Современная добыча нефти и газа существенно различается по странам Африки, собственно, как и ресурсный потенциал, выраженный величиной остаточных запасов жидких и газообразных углеводородов (УВ) [EIA, 2024; AFREC, 2015]. Перспективы и реализация потенциала различных нефтегазоносных бассейнов, выраженные в доразведке и открытии новых залежей, освоении и добыче на новых месторождениях, отображаются в контрастной динамике добычи углеводородов по странам Африки за последнее десятилетие.

С учетом тренда перехода к «зеленой экономике», особый интерес вызывают возобновляемые источники энергии Африканского континента, изученность и оценка которых находится на начальном этапе развития. Особенности геологического строения Африки, а именно ее восточной части, включая Эритрею, Эфиопию, Джибути, Кению, Уганду и Замбию, и приуроченность территории к Восточно-Африканскому рифту, создают благоприятные условия для развития геотермальной энергетики.

Район исследований. Африканские страны все больше вовлекаются в международные процессы

принятия решений, особенно по таким вопросам, как изменение климата, безопасность и миграция населения. Быстрые темпы демографического роста стран континента также позиционируют его как ключевого игрока в будущем. Ожидается, что к 2050 г. на континент будет приходиться более половины прироста населения мира, а Нигерия станет третьей по численности населения страной [World..., 2023]. Этот демографический сдвиг усилит роль Африки на международной арене, особенно в вопросах, касающихся занятости молодежи, устойчивого развития и международной торговли.

Растущее участие Африки в международных торговых соглашениях и партнерствах также повысило ее глобальный экономический статус. Африканская континентальная зона свободной торговли (*African Continental Free Trade Area, AfCFTA*), запущенная в 2021 г., является крупнейшей в мире зоной свободной торговли с потенциалом увеличения внутриафриканской торговли более, чем на 50%.

В последнее время Россия активизировала сотрудничество с африканскими государствами, демонстрируя важность российско-африканских связей. По данным [Дмитрий Вольвач., 2024], товарооборот России и стран Африки по итогам 2023 г. увеличился почти на 37% по сравнению с прошлым годом и составил \$24,5 млрд. За 8 месяцев 2024 г. он вырос еще на 18,5%, достигнув \$18,6 млрд. РФ также увеличила свои инвестиции в африканские страны, в том числе в энергетическом и горнодобывающем секторах.

Несмотря на то, что Африка располагает богатыми запасами полезных ископаемых и значительным потенциалом для производства энергоресурсов, существует ряд проблем, который затрудняет развитие континента в этом направлении, самыми серьезными из которых являются: неравномерный доступ к источникам энергии, недостаток квалифицированных кадров, недостаточно развитая инфраструктура. Эти проблемы требуют не только внутренних усилий, но и международной поддержки, и в этом контексте российско-африканское сотрудничество приобретает особую значимость — Россия, обладая богатым опытом в области энергетики, передовых технологий и подготовки квалифицированных кадров, может стать ключевым партнером в решении данных проблем. Некоторые российские энергетические компании уже ведут успешную деятельность в ряде стран континента. Так, «Лукойл» участвует

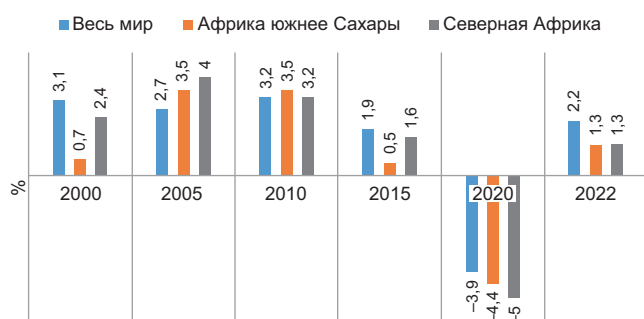


Рис. 1. Темп роста ВВП на душу населения (%)

в глубоководных проектах в Египте, Камеруне, Нигерии и Гане [Лукойл..., 2024]; «Росатом» задействована в строительстве крупной АЭС «Эль-Дабаа» мощностью 4800 МВт в Египте [Росатом..., 2024], а в ЮАР и Нигерии компания занимается подготовкой квалифицированных кадров.

Энергетические ресурсы Африки играют важную роль не только для развития самого континента, но и для мирового энергетического рынка. В контексте перехода к «зеленой экономике» возобновляемые источники энергии, которые есть на континенте, становятся ключевыми для устойчивого развития как внутри региона, так и за его границами. Наиболее активную работу в этом направлении ведут страны Восточной Африки, которым с 2011 по 2020 годы удалось добавить почти 7 ГВт новых мощностей в основном за счет возобновляемых источников и, таким образом, удвоить общую мощность региона до 16,4 ГВт [In Between..., 2024].

Сотрудничество между Россией и странами Африки осуществляется во многих сферах и направлениях, среди которых можно выделить экономику, социальную сферу, энергетику, природные ресурсы и экологию. При этом, различные участники такого сотрудничества имеют интересы и цели, в целом ориентированные на повышение темпов роста экономики, достижение эффективности реализации проектов, достижения целей устойчивого развития, решения проблем социальной направленности (табл. 1).

Что касается развития экономического и культурного сотрудничества между Россией и странами Африки, здесь можно выделить как уже существующие области совместных интересов, так и перспективы развития [Джоланов и др., 2023]. Сотрудничество со странами Африки открывает для России растущий рынок сбыта [Кортунов и др., 2020]. На рис. 1, составленном авторами на основе [United Nations, 2024], представлены темпы роста ВВП (на душу населения) по регионам Африки.

В 2023 г. практически все страны Африки продемонстрировали рост ВВП. Среди стран, имеющих наиболее значительные темпы роста ВВП — Эфиопия (7,2%), Кот-д'Ивуар (6,2%), Танзания (5,0%), Мозамбик (6,0%), Бенин (5,8%) [GDP..., 2023]. Большинство стран Африки (за исключением стран Северной Африки) имеют низкий уровень социально-экономического развития (табл. 2).

Такая экономическая ситуация в странах Африки формирует определенные задачи преодоления низкого уровня жизни и развития экономик, которые к тому же накладываются на проблемы и угрозы развития всего современного сообщества — геополитические кризисы, пандемии, риски глобального изменения климата [Sigidov, et al., 2020]. Однако вместе с этим открываются и новые возможности, связанные с реализацией совместных программ и проектов. В контексте решения глобальных проблем изменения климата и преодоления нехватки ресурсов развитие энергетических природных ресурсов, реализация проектов в сфере возобновляемой энергетики открывает для стран перспективы устойчивого развития: создание «зеленых» производств и рабочих мест, решение проблем безработицы и преодоление бедности.

Углеводородный потенциал стран Африки. Потенциал нефтегазовых бассейнов Африки варьируется в чрезвычайно широком диапазоне. Для характеристики углеводородного потенциала на основе комплексных литературных источников [AFREC, 2015; EIA, 2024; BP, 2024; EIA, 2024 и др.] построены карты, иллюстрирующие ранжированные по категориям добычи и запасов страны и нефтегазовые бассейны Африки. В масштабах стран Африки наибольшая добыча осуществляется в нефтегазовых бассейнах Нигерии, Алжира, Египта (рис. 2). Бассейны характеризуются сложным структурно-геологическим и стратиграфическим строением, с чем связано наличие месторождений со смешанным фазовым составом УВ (наличие и нефти, и природного газа).

Добыча Алжира, в наиболее общем плане, характеризуется разработкой газовых и газоконденсатных месторождений на западе в бассейнах Регган (Reggane), Угарта (Ougarta), Тимимун-Ахнет (Timimoun-Ahnet), Уэд Мья (Oued Mya) и нефтяных и газоконденсатных месторождений в бассейнах Иллизи-Беркине (Illize-Berkine), частично Гадамес (Ghadames). Разработка нефтяных и газовых месторождений Нигерии приурочена к бассейну Дельты Нигера (Niger Delta).

Крайне неоднородное строение бассейнов Египта определяет резко различающуюся по величине добычу нефтяных и газоконденсатных месторождений бассейнов Матрух-Шушан (Matruh-Shushan), Абу Гарадиг (Abu Gharadig), Аламейн (Alamein), Гинди (Gindi).

К следующим категориям (рис. 2) относятся нефтегазовые бассейны Анголы и Ливии. Добыча Анголы сосредоточена на мелководном шельфе, в пределах которого преимущественно нефтяные месторождения приурочены к осадочным нефтегазовым смежным бассейнам Конго (Congo) и Кванза (Kwanza). При этом добыча газа Анголы составляет около 9% от общей. Также преобладает добыча нефти, составляя около 85% от суммарной,

Таблица 1

Интересы различных экономических субъектов при осуществлении сотрудничества

Экономические субъекты / сфера сотрудничества	Экономика	Социальная сфера	Энергетика	Природные ресурсы	Экология
Государство	Высокие темпы роста экономики, крупная зона свободной торговли	Продвижение ценностей традиций и ориентаций русской культуры	Расширение программ развития энергетического сектора, научные исследования и разработки в сфере ВИЭ	Новые источники и технологии использования природных ресурсов	Сотрудничество в сфере охраны окружающей среды и достижения целей устойчивого развития
Частные и институциональные инвесторы	Свободные ниши для инвестирования	–	Реализация крупных проектов в сфере традиционной и возобновляемой энергетики	Доступ к источникам природных ресурсов	Реализация масштабных ESG-проектов
Предпринимательский сектор	Реализация предпринимательских проектов в отраслях сельского хозяйства, добывающей и перерабатывающей промышленности	–	–	Развитие туризма	–
Организации культуры	Реализация образовательных по повышению экономической грамотности населения	Реализация образовательных и просветительских программ и проектов	–	Реализация образовательных и просветительских программ и проектов	–

Таблица 2

Некоторые показатели социально-экономического развития стран Африки [United Nations, 2024]

Регион	2000	2005	2010	2015	2020	2023
Доля занятого населения, находящегося ниже международной черты бедности (2,15 долл. США на человека в день)						
Весь мир	27,6	19,5	14,4	8,4	6,9	–
Африка южнее Сахары	54,9	47,2	40,6	35,4	34,1	32,8
Северная Африка	4,8	3,9	2,7	3,5	5,0	
Южная Африка	36,7	30,7	22,8	14,9	11,6	8,0
Уровень безработицы, %						
Весь мир	4,6	–	4,9	4,6	5,1	3,9
Африка южнее Сахары	4,6	–	4,5	4,5	5,3	4,9
Северная Африка	10,0	–	7,1	9,3	10,0	9,0
Доля населения в возрасте от 15 до 24 лет, не имеющего образования, %						
Весь мир	–	24,3	22,4	21,8	23,8	21,7
Африка южнее Сахары	–	23,1	22,4	23,0	26,7	25,9
Северная Африка	–	30,9	30,3	27,5	29,0	27,5
Доля неформальной занятости (% от общего уровня занятости)						
Весь мир	–	58,4	–	60,2	–	55,4
Африка южнее Сахары	–	87,0	–	84,1	–	89,8
Северная Африка	–	60,2	–	60,6	–	54,6

Регион	2000	2005	2010	2015	2020	2023
Затраты на исследования и разработки, % от ВВП						
Весь мир	1,54	1,54	1,62	1,72	1,95	1,93
Африка южнее Сахары	0,32	0,35	0,34	0,36	0,33	0,33
Северная Африка	0,3	0,31	0,43	0,6	0,74	0,74
Доля населения, имеющая доступ к электроэнергии, %						
Весь мир	78,4	80,8	83,6	87,0	90,5	91,4
Африка южнее Сахары	25,8	29,3	33,2	38,8	48,0	50,1
Северная Африка	81,7	84,8	87,8	89,8	92,3	92,5
Доля возобновляемой энергии в общем объеме потребления энергии, %						
Весь мир	16,87	15,98	16,04	16,7	19,05	18,71
Африка южнее Сахары	72,44	70,38	70,88	68,39	70,39	69,05
Северная Африка	15,04	13,73	11,09	10,02	10,96	10,48
Эмиссия CO ₂ (млн т CO ₂)						
Весь мир	23266	27106	30616	32378	31740	33572
Африка южнее Сахары	410	529	614	696	680	712
Северная Африка	250	335	408	474	463	505

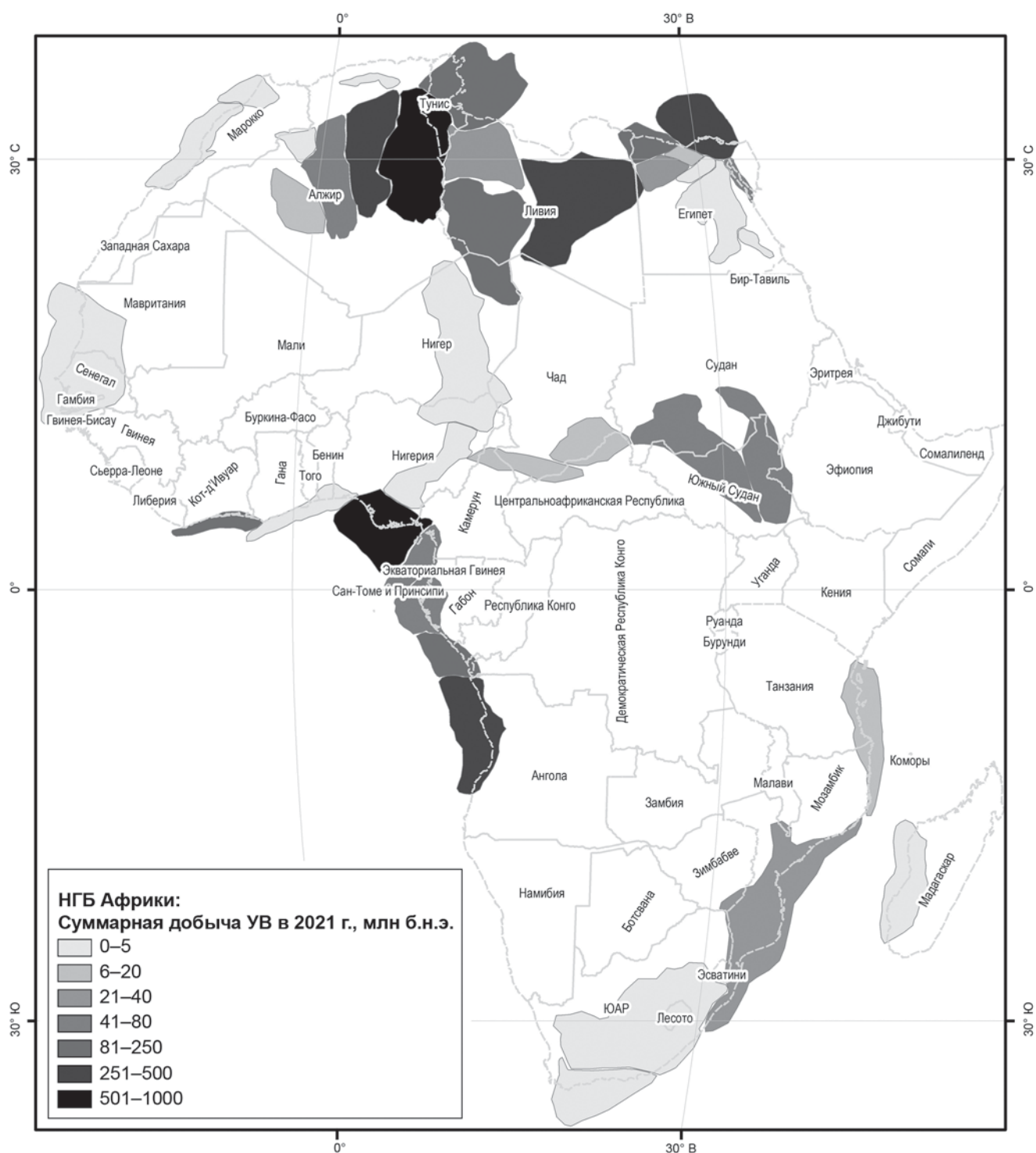


Рис. 2. Ранжирование нефтегазоносных бассейнов Африки по суточной добыче УВ в 2021 г. (млн баррель нефтяного эквивалента)

в Ливии. Основными добывающими бассейнами Ливии являются Мурзук (Murzuq) и Сирт (Sirte).
Нефтегазоносные бассейны с наименьшей добычей углеводородов расположены в Марокко, Тунисе, Сенегале, Нигере, Чаде, Судане, Кот-д’Ивуаре, Гане, Камеруне, Южном Судане, Экваториальной Гвинее, Габоне, Республике Конго, Демократической Республике Конго, Танзании, Мозамбике, ЮАР. Среди перечисленных наибольший вклад дают страны Африки с добычей на шельфе: нефтяные и газовые

месторождения Экваториальной Гвинее (суммарно около 400 тыс. барр. в сутки), нефть в Конго (около 300) и Габоне (около 200 тыс. барр. в сутки), в меньшей степени жидкие УВ в Гане и газ в Мозамбике. Наиболее значимая добыча в сухопутной части Африки связана с разработкой нефтяных месторождений Южного Судана и Чада (суммарно около 300 тыс. барр. в сутки).
Ресурсный потенциал, выраженный остаточными запасами УВ, ассоциируется с невыработанными

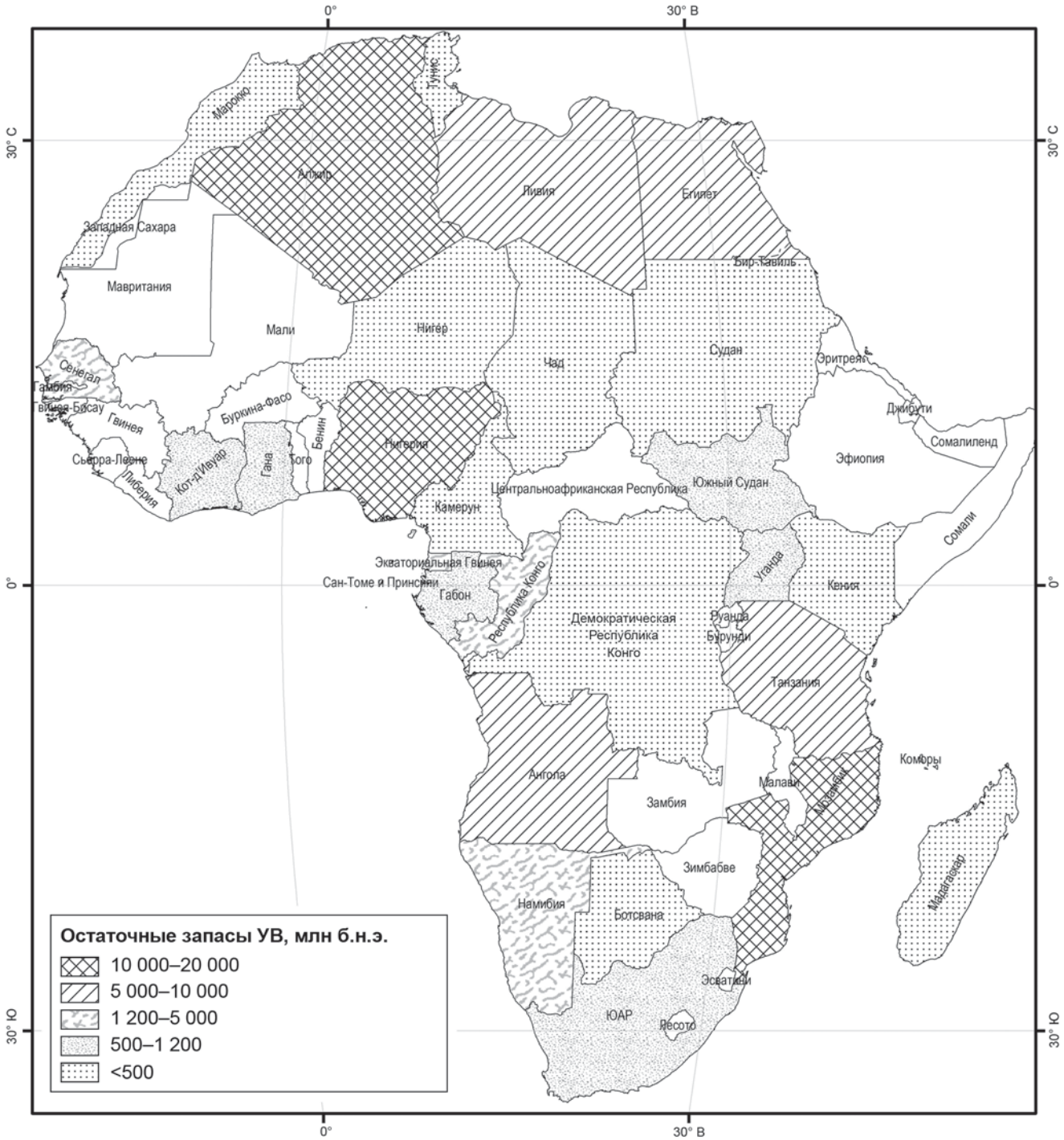


Рис. 3. Категории стран Азии и Африки по остаточным запасам УВ (млн баррель нефтяного эквивалента)

запасами действующих месторождений, подготовленными к началу разработки новыми месторождениями, а также заявленными геологическими открытиями новых залежей. Последние две категории часто могут быть оценены с некоторой долей ошибки (которая устраняется в процессе уточнения оценки запасов по мере разбуривания и начала разработки), в связи с чем, по объективным причинам, интегральная оценка остаточных запасов по странам может содержать в себе некоторую погрешность. На рис. 3 приведена карта, категоризированная по ресурсному потенциалу стран Африки, выраженному величиной

остаточных запасов углеводородов в баррелях нефтяного эквивалента. Большинство стран, которые характеризуются относительно низкой добычей углеводородов (см. рис. 2), также характеризуются и низкой величиной остаточных запасов, что обусловлено, в целом, низким разведанным нефтегазовым потенциалом в части новых месторождений, сопутствующей высокой выработанностью известных месторождений при низкой доле новых открытий. Наиболее яркими примерами подобного сценария являются такие страны Африки, как Южный Судан, Судан, Нигер, Тунис. Отдельно можно выделить

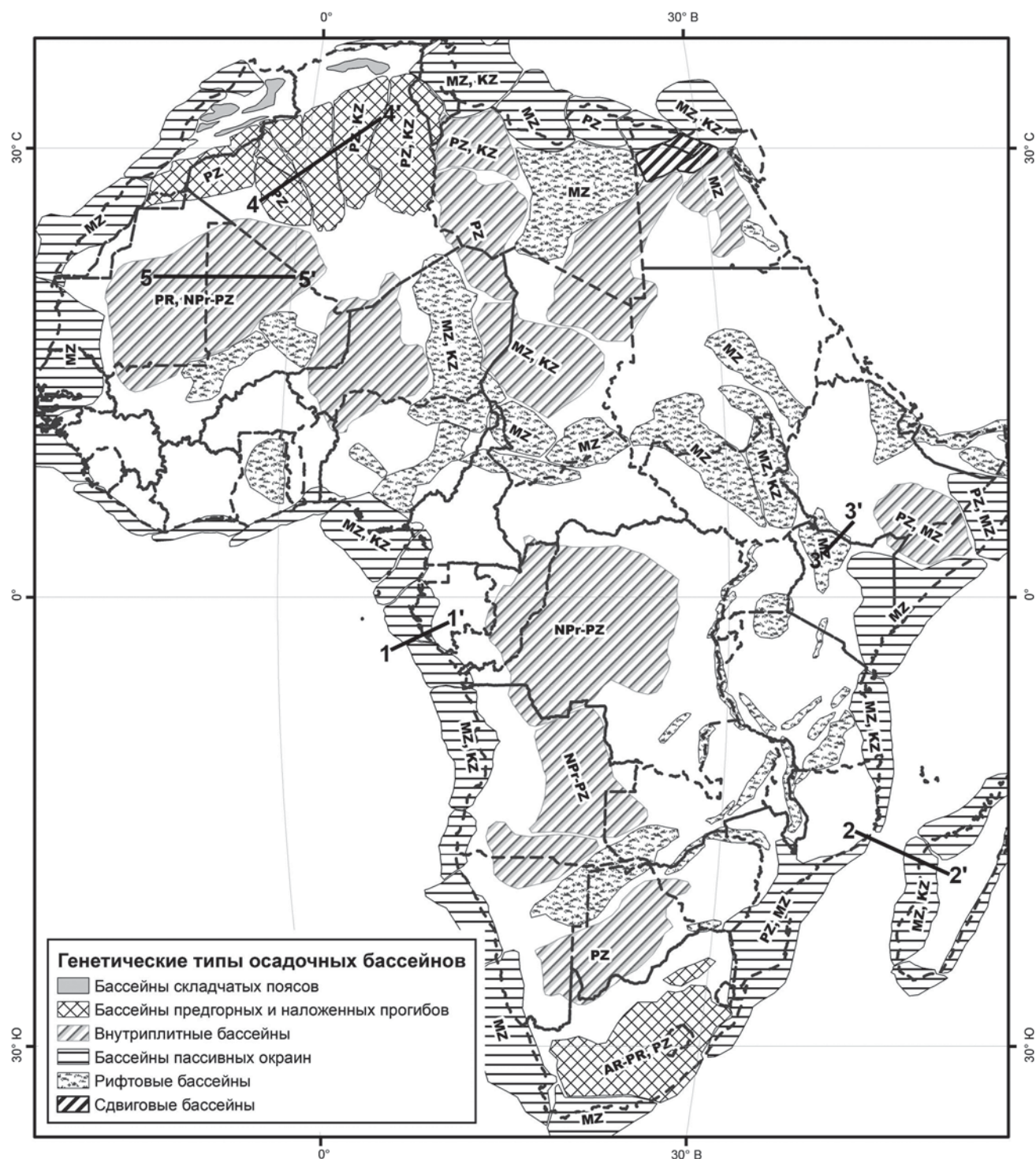


Рис. 4. Осадочные бассейны Африки и возраст их осадочных комплексов по [Evenick, 2021], с изменениями и дополнениями (1-1', 2-2', 3-3', 4-4', 5-5' — профили разрезов, см. рис. 5-9)

страны с наличием доказанных запасов УВ, но добыча в них не осуществляется, поскольку была минимальна (в силу разных причин — нерентабельности проектов по добыче, отсутствия инфраструктуры и иных). К таким странам можно отнести Уганду, Кению, Намибию, Ботсвану, Мадагаскар.

Геологическое строение и типы крупнейших нефтегазоносных бассейнов. В пределах Африканского континента распространены осадочные

бассейны различных генетических типов. Несмотря на имеющиеся по разным классификационным схемам расхождения в части детализации категорий для конкретных бассейнов [Evenick, 2021; CGG, 2019], в общем случае бассейны Африки можно разделить по нескольким категориям.

Бассейны пассивных окраин развиты по периферии континента (рис. 4). Латеральными ограничениями данных бассейнов являются, как

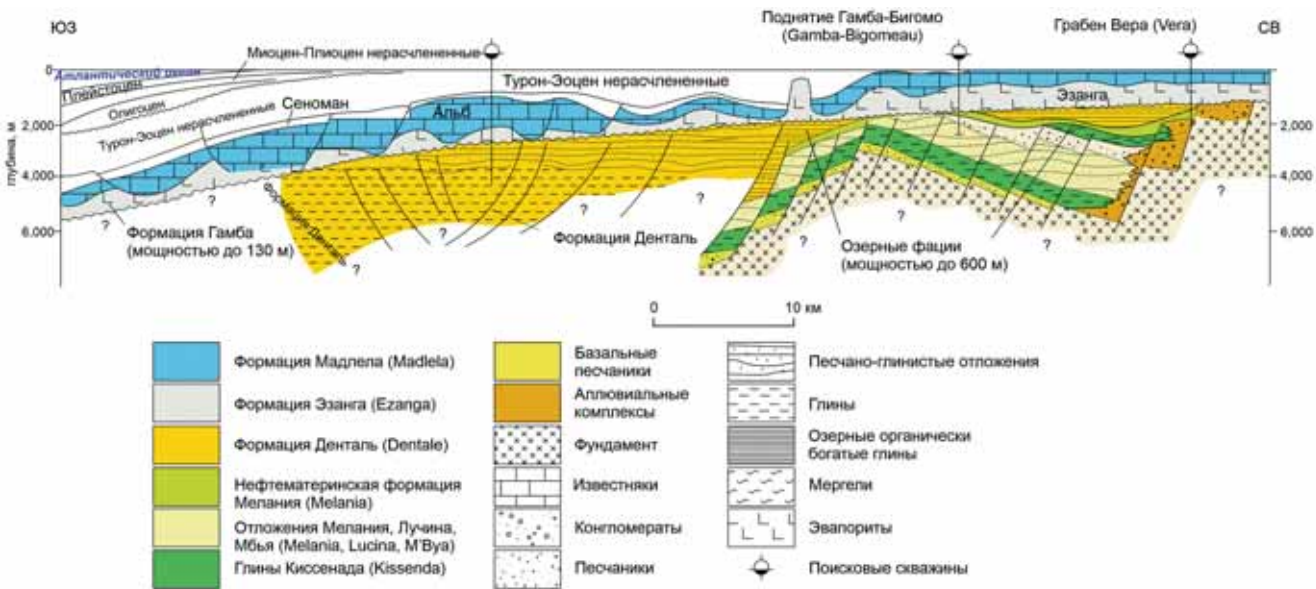


Рис. 5. Схематический геологический разрез осадочного чехла бассейна пассивной окраины атлантической части африканского шельфа (профиль 1–1´) по [Brownfield, et al., 2006]

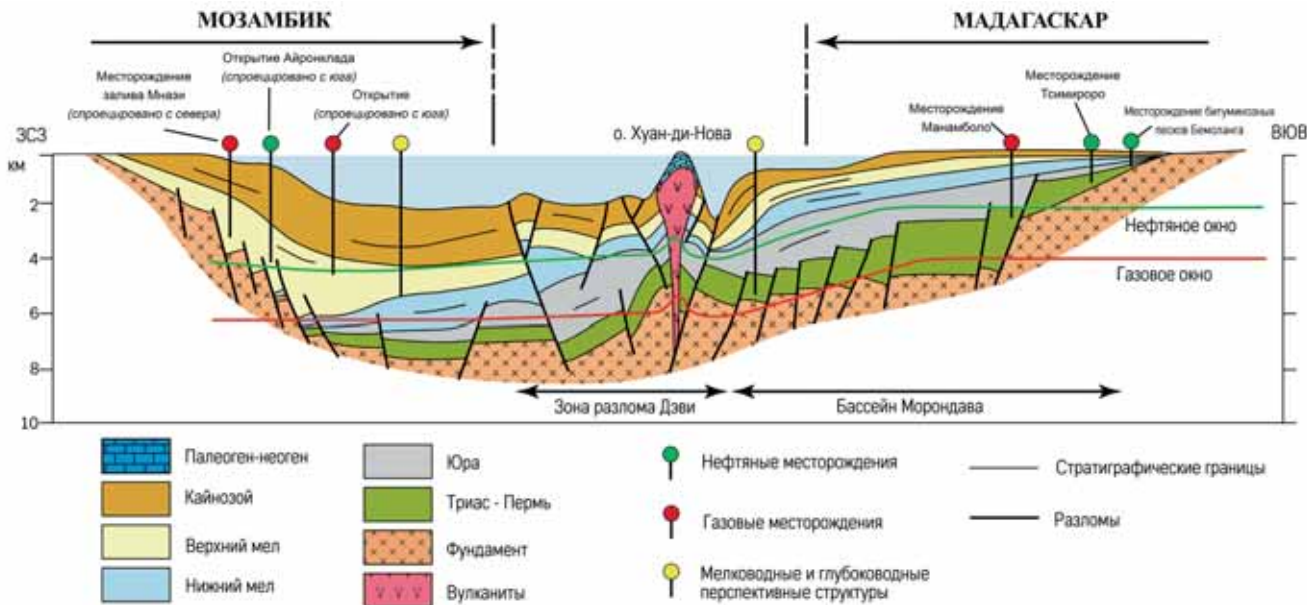


Рис. 6. Схематический геологический разрез осадочного чехла бассейна пассивной окраины индийской части африканского шельфа (профиль 2–2´) по [Brownfield, 2016]

правило, региональные разломные зоны. Бассейны часто соотносятся с неоднородностями рельефа, а этапы формирования осадочного чехла бассейнов пассивных окраин сопоставляются с глобальными плитотектоническими событиями. Характерной чертой строения разрезов для бассейнов данного типа является наличие солей, имеющих региональное распространение. Например, на западном побережье (бассейны шельфа Габона, Камеруна, Конго, Анголы, Намибии) выделяется подсолевой и надсолевой комплексы, маркирующие этап формирования эвалоритовых бассейнов в апт-альбское время (рис. 5). Возраст осадочного выполнения бассейнов пассивных окраин на западном побережье — мезокайнозойский. На южном и восточном побережьях

осадочные комплексы частично включают также и палеозойские образования (рис. 6).

Бассейны рифтового типа приурочены, главным образом, к основным и оперяющим их крупнейшим Восточно-Африканской и Центрально-Африканской рифтовым системам (рис. 4, 7). Геологическое строение, асимметрия рифтовых долин, особенности фациального строения и закономерности изменения мощностей осадочного заполнения бассейнов контролируется тектоническим строением и разломной тектоникой (развивающейся в режиме сдвиговых обстановок). В Северной Африке к рифтовому типу бассейнов также часто относят бассейн Сирт, имеющий важное значение по величине действующей добычи нефти

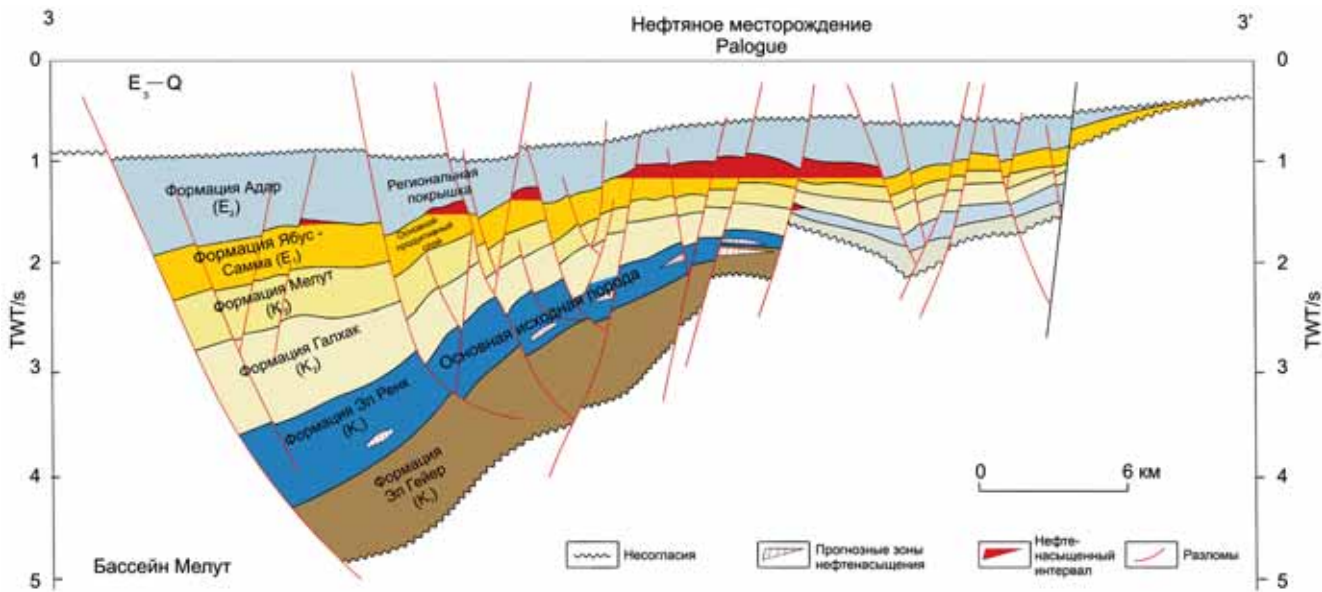


Рис. 7. Схематический геологический разрез осадочного чехла бассейна рифтового типа (профиль 3–3′) по [Dou, et al., 2024]

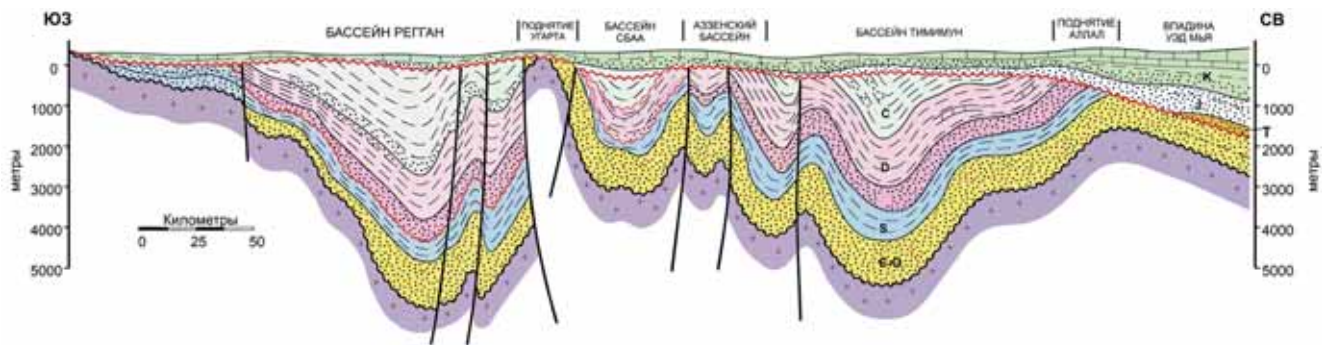


Рис. 8. Схематический геологический разрез осадочного чехла бассейнов предгорных и наложенных прогибов (профиль 4–4′) по [Geleazzi, et al., 2010]

и газа в его пределах. В его строении выделяются дорифтовый палеозойский, син- и пострифтовый мезозойско-кайнозойские комплексы, залегающие на раздробленном фундаменте, что одновременно позволяет относить данный бассейн к типу наложенных пострифтовых внутриплитных впадин. Возраст осадочных комплексов, залегающих часто на докембрийском фундаменте — мезозойский и мезозойско-кайнозойский.

Важнейшим в прикладном отношении для добычи нефти и газа типом бассейнов являются **бассейны предгорных и наложенных прогибов** (рис. 4), играющие наиболее значимую роль на севере Африки: Регган (Reggane), Угарта (Ougarta), Тимимун-Ахнет (Timimoun-Ahnet), Уэд Мья (Oued Mya), Иллизи-Беркине (Illize-Berkine). С генетической классификацией данных бассейнов связано большинство разногласий из-за сложной и многоэтапной истории их геологического развития (рис. 8). Данная область Северной Африки характеризуется мощным осадочным чехлом от кембрия до неогена, в истории развития которого фиксируются фазы таконской, каледонской, герцинской, австрийской и пиренейской фаз складчатостей. В тектоническом

отношении бассейны можно рассматривать как бассейны форланда Атласского горно-складчатого сооружения и одновременно как наложенные пострифтовые прогибы раннепалеозойского возраста. Бассейны соответствующего типа, относящегося к складчатым поясам Атласид, выделяются на северо-западном ограничении Африки (рис. 4).

Другой тип представлен **внутриплитными осадочными бассейнами**, также обозначаемыми как внутрикратонные бассейны на докембрийском фундаменте (рис. 4). Эти бассейны существенно отличаются как по геологическому строению пространственных в их пределах осадочных комплексов, так и по величине добычи нефти и газа (рис. 2). Наиболее продуктивными бассейнами данного типа являются расположенные в Северной Африке бассейны Мурзук (Murzuq) и Гадамес (Gadames) на территории Ливии и восточного Алжира. Аналогично расположенным западнее бассейнам — мощный осадочный чехол представлен комплексами палеозоя, мезозоя и кайнозоя, с серией связанных с региональными складчатостями угловых несогласий, наиболее крупным из которых является герцинское. Чрезвычайно важными для понимания

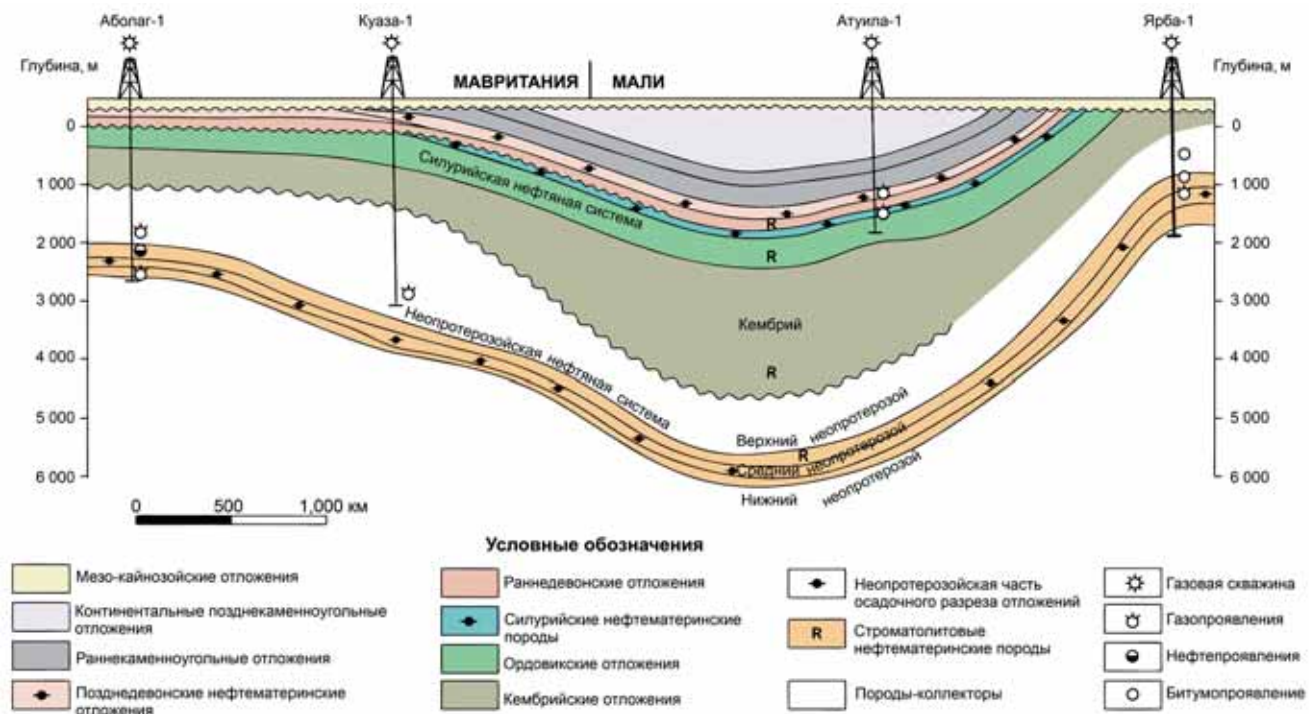


Рис. 9. Схематический геологический разрез осадочного чехла внутриплитного бассейна (профиль 5-5') по [Tekrou, 2008]

истории развития континента в целом и механизмов формирования осадочных нефтегазоносных комплексов являются бассейны, в которых начало формирования осадочных комплексов датируется неопротерозоем (рис. 9). Крупнейшим подобным бассейном Северной Африки является бассейн Тауденни (Taoudenni), в основании осадочного чехла которого выделяется неопротерозойский комплекс с нефтегазоматеринскими свойствами [Ситар и др., 2022; Георгиевский и др., 2022]. Генетически схожие бассейны расположены и в Центральной Африке: Заир (Zaire) в Демократической Республике Конго, Окаванго (Okavango) и Этоша (Etosha), расположенные на территории Анголы и, частично, Намибии. В основании осадочных комплексов этих бассейнов также присутствуют нефтегазоматеринские неопротерозойские комплексы, характеризующиеся повышенным содержанием ТОС и сопутствующими в осадочном разрезе отложениями докембрийских тиллитов. Внутриплитные бассейны с палеозойским и палеозойско-мезозойским заполнением также развиты в Южной — бассейн Калахари (Kalahari), в Центральной и Северной Африке — бассейны Чад (Chad), Куфра (Kufra).

Менее крупные (в масштабе Африки) осадочные бассейны на северо-востоке континента относятся к **сдвиговым бассейнам**, представленным серией многочисленных грабенообразных впадин, формирование которых происходило в условиях сдвиговых деформаций. Осадочный разрез и продуктивные интервалы относятся к мезозойско-кайнозойскому комплексу, который в ряде случаев залегает с угловым несогласием на палеозойском осадочном ком-

плексе либо докембрийском фундаменте. Бассейны данного типа имеют важное практическое значение, в частности, обеспечивая существенный вклад в добычу нефти и газа Египта (рис. 2).

Угленосные бассейны стран Африки. В пределах Африканского континента широко распространены угленосные бассейны с залежами углей, приуроченных к разновозрастным стратиграфическим комплексам: от каменноугольных до миоцен-плиоценовых. В южной и центральной частях континента — в ЮАР, Намибии, Ботсване, Зимбабве, Замбии, Танзании, Демократической Республике Конго — распространены, преимущественно, пермские залежи. В Западной Африке описаны верхнемезозойские и кайнозойские залежи (Нигерия, Бенин, Мали, Сенегал), а также каменноугольные (Алжир, Нигер). Верхнемеловые и преимущественно кайнозойский угольный разрезы описаны в странах Восточной Африки — в Судане, Эфиопии, Сомали, а также фрагментарно триасово-пермский разрез приграничной области Эритреи и Эфиопии.

Геотермальный потенциал стран Африки. Несмотря на значимость традиционных углеводородов для экономики региона, многие африканские страны начинают уделять особое внимание нетрадиционным, возобновляемым источникам энергии, таким как геотермальное тепло.

Геотермальное тепло в зависимости от температуры и экономической обстановки в регионе может использоваться в различных отраслях [Поваров, 2001; Черкасов, 2017, Басков, 1989] (рис. 10):

– коммунальное хозяйство (отопление зданий и сооружений, горячее водоснабжение);

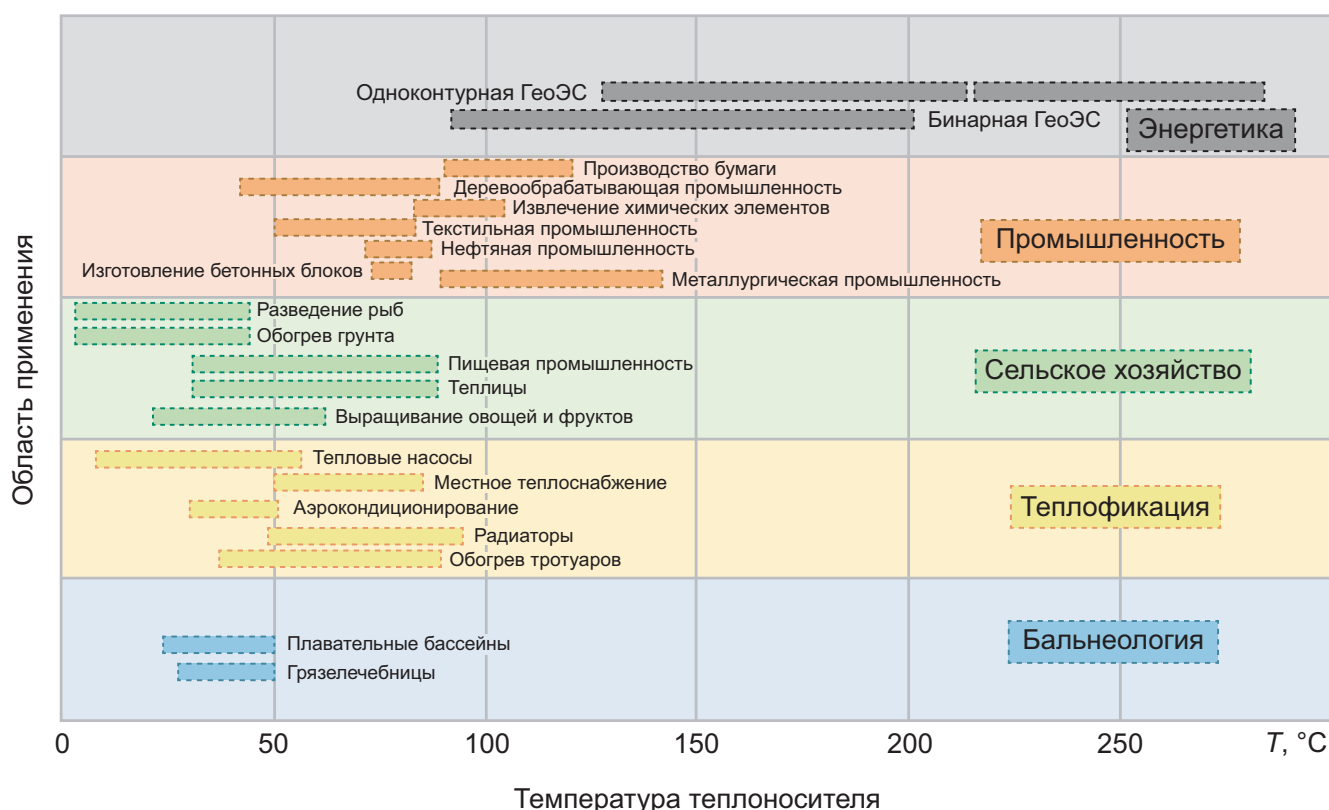


Рис. 10. Возможности использования геотермального тепла [Поваров, 2001]

- теплоснабжение теплиц и работа геотермальных холодильных установок;
- промышленность (рыбохозяйство, деревообрабатывающая отрасль, производство бумаги, металлургия, производство строительных материалов, нефтяная и текстильная промышленность и т.д.);
- производство электроэнергии.

Кроме того, геотермальные воды могут использоваться как лечебные, и как источник извлечения целого ряда макро- и микроэлементов (кремний, цинк, литий и др.) [Bourcier, et al., 2005].

Территория Восточной Африки приурочена к Восточно-Африканской системе рифтовых зон, которая характеризуется высокой тектонической активностью, интенсивным проявлением эффузивного магматизма и обладает значительным потенциалом для получения геотермальной энергии [Маринов, 1978]. Регион охватывает несколько стран, включая Эритрею, Эфиопию, Джибути, Кению, Уганду, Танзанию и Замбию (рис. 11).

По некоторым оценкам, геотермальный потенциал региона достигает 15 ГВт.

Абсолютным лидером в этой сфере на африканском континенте является Кения. Кения была первой страной в Африке, которая в 1956 г. перешла на геотермальную энергию, и здесь находится крупнейшая геотермальная электростанция на континенте (ГеоТЭС) «Олкария», которая производит около 900 МВт. Площадь объекта составляет около 200 км². В настоящее время страна уже получает около половины электроэнергии за счет геотермальных источников.

В Эфиопии находится единственная установка с двойным циклом, но она не использует весь свой потенциальный объем выработки энергии из-за отсутствия опыта ее эксплуатации. Из-за проблем с техническим обслуживанием станция была остановлена в 2001 г., но в 2006 г., благодаря финансовой помощи Агентства США по торговле и развитию (USTDA) и технической помощи компании Geothermal Development Associates (GDA), была возвращена в эксплуатацию [Echavarria, 2008].

В Замбии запланировано строительство нескольких объектов, но их проекты остановились из-за нехватки средств. Эритрея, Джибути и Уганда провели предварительную разведку потенциальных геотермальных источников, но к настоящему времени не построили электростанций. Правительство Уганды выдало лицензию компании Green Impact Development Services (GIDS) на бурение разведочной скважины в районе горячих источников Буранга. Предварительные технико-экономические обоснования показали, что температура подземных вод в исследуемом регионе составляет от 150 °C до 200 °C, что является благоприятным для использования подземных вод для производства электроэнергии. В Танзании производством, передачей и распределением электроэнергии занимается танзанийская энергетическая компания Tanesco, которая на 100% принадлежит государству.

Геотермальное тепло, являясь на сегодняшний день перспективным источником возобновляемой энергии, для эффективного освоения требует детального изучения и точного картографирования.

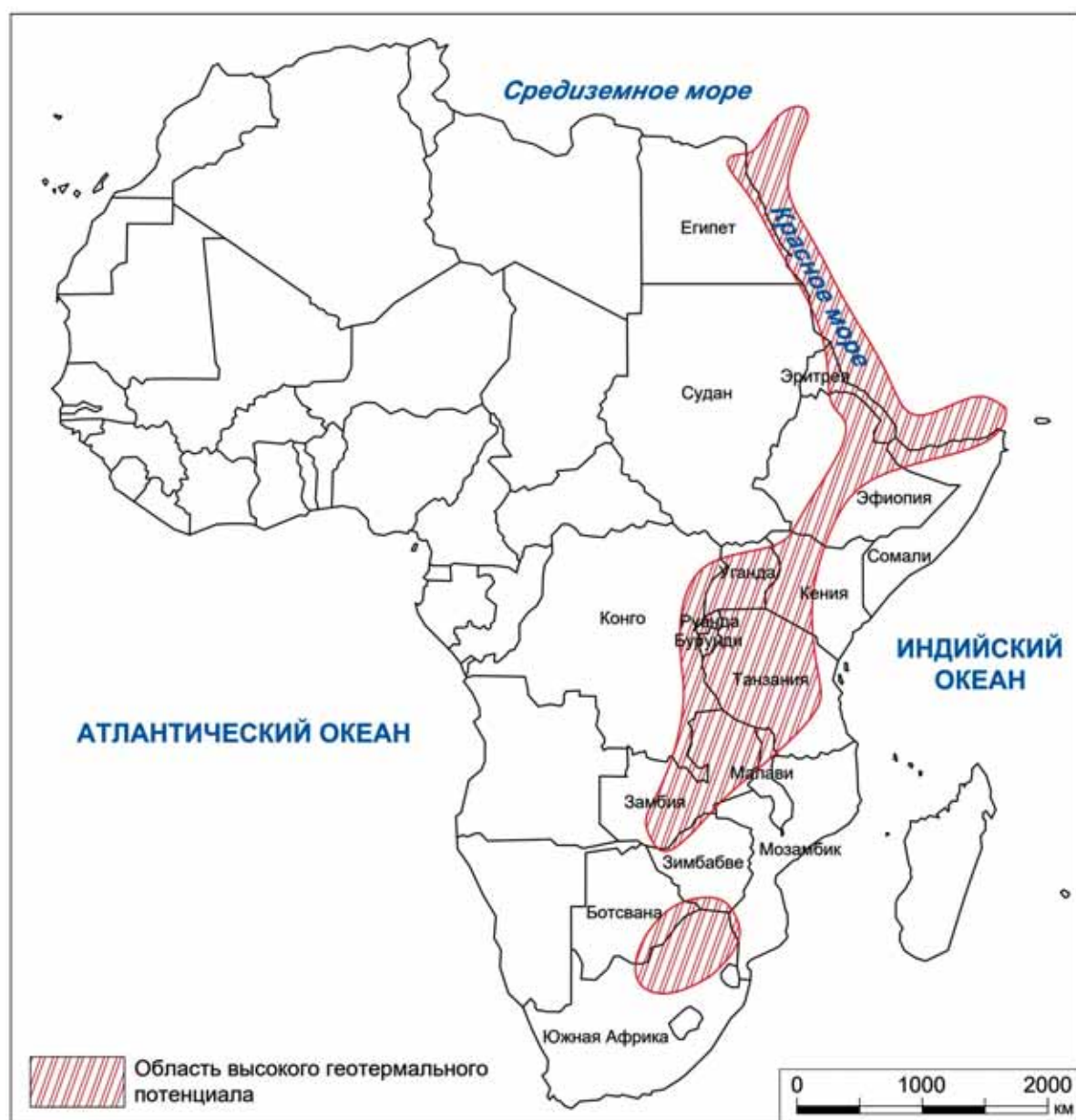


Рис. 11. Страны Африки с высоким геотермальным потенциалом

Современный опыт геологоразведочных работ с применением алгоритмов машинного обучения и использованием геоинформационных систем (ГИС) демонстрирует успешные примеры интеграции геологических и геофизических данных для оценки геотермального потенциала в различных странах. Так, например, в Мексике регионы с высоким геотермальным потенциалом были оценены путем объединения геологических и геофизических данных с использованием интегрированных ГИС [Prol-Ledesma, 2020]. В Японии для севера страны была создана геотермальная карта, построенная с помощью взвешенной модели наложения на базе ГИС для выделения районов с подходящими геологическими, термическими и геохимическими условиями [Noorollahi, et al., 2007]. В Италии разработан инструмент интеграции данных на базе ГИС

для создания карты геотермального потенциала [Trumpy, et al., 2015]. Для Африканского континента в качестве входных слоев ГИС-модели использовалась информация о разломах, типах горных пород, сейсмической активности, карта тепловых аномалий, основанная на аэромагнитной съемке [Elbarbary, et al., 2022]. Исследования и освоение геотермальных ресурсов связаны с существенными затратами, обусловленными высокими расходами на бурение. Вышеупомянутый метод помогает выделить приоритетные зоны для возможного освоения геотермальной энергии без значительных затрат.

Использование цифровых технологий и опыт использования ГИС в геологоразведке демонстрирует возможности интеграции разнородных данных и построение карт геотермального потенциала, что позволяет выделить наиболее перспективные

участки для дальнейших исследований и эксплуатации.

Политические и экономические риски в странах Африки. Страны Африки очень богаты природными полезными ископаемыми, однако одним из важнейших препятствий для их эффективного использования являются крайне высокие риски социально-политической дестабилизации, характерные для многих из этих стран. Например, именно высокие риски политической нестабильности препятствуют налаживанию эффективной разработки природных полезных ископаемых в такой исключительно богатой ими стране как Демократическая Республика Конго. Но при этом такое природное богатство этой страны служит дополнительным источником политической нестабильности, так как облегчает повстанческим и криминальным группировкам свое финансирование за счет нелегального экспорта востребованных на мировом рынке минеральных ресурсов, а, с другой стороны, облегчает получение ими внешней поддержки [Brydges, 2013; Cuvelier, et al., 2013; Eichstaedt, 2011; Rapanyane, 2022; Wangombe, 2018].

Поэтому любые долгосрочные планы, предполагающие возможность дальнейшей доразведки и открытия новых месторождений природных полезных ископаемых стран Африки, обязательно должны учитывать риски социально-политической дестабилизации в соответствующих странах. В связи с этим, в рамках нашего проекта мы планируем детально изучить эти риски с применением современных технологий машинного обучения. Действительно, в последние десятилетия методы машинного обучения (Machine Learning/ML) приобрели широкую популярность в области социального моделирования и прогнозирования из-за их способности анализировать большие объемы данных и выявлять скрытые закономерности. Машинное обучение предлагает инструменты для обработки большого массива

переменных с взаимной корреляцией предсказывать события, которые могут привести к кровавым политическим потрясениям [Медведев и др., 2022; Ahmed, et al., 2010; Benbouzid, 2018; Lundberg, et al., 2020; Molina, Garip, 2019].

Заключение. Проведенный анализ показал наличие большого потенциала для РФ во взаимоотношениях со странами Африки в сфере энергетических ресурсов. Добыча нефти и газа в странах чрезвычайно неравномерна, но благодаря уникальной геологической истории континента, и как следствие, благоприятным условиям для формирования месторождений нефти и газа, африканские страны обладают большим потенциалом к открытию новых месторождений и наращиванию добычи нефти и газа. Прослеживается общая закономерность между величиной суточной добычи и остаточными запасами УВ по странам. Однако некоторые страны представляют собой исключения из данной зависимости, особенно в случае наличия в них разведанных, но не разрабатываемых залежей. К таким странам можно отнести, например, страны Восточной Африки (Танзания, Мозамбик). Что касается возобновляемой энергии, то Восточная Африка, расположенная в пределах Восточно-Африканской рифтовой системы, благодаря особенностям геологического строения обладает значительным геотермальным потенциалом. Применение цифровых технологий в геологоразведке, включая ГИС, позволяет выделять наиболее перспективные участки для дальнейших исследований.

Финансирование. Работа выполнена при поддержке Программы развития МГУ, проект № 24-Ш05-07 на тему «Исследование потенциала природных ресурсов и новых форматов отношений между Россией и странами Азии и Африки: моделирование экономического, политического и культурного сотрудничества».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Басков Е.А. Гидротермы Земли / Е.А. Басков, С.Н. Суриков. Л.: Недра, Ленинградское отд., 1989. 243 с.

Георгиевский Б.В., Ситар К.А. Нефтегазоносность осадочных бассейнов различных геодинамических обстановок: сравнительный статистический анализ и ресурсный потенциал. Тектоника и геодинамика Земной коры и мантии: фундаментальные проблемы-2022: Мат-лы III Тектонического совещ. М.: ГЕОС, 2022. Т. 1. С. 119–125.

Джоланов Р.С., Крылова Е.А., Купорова М.А., Предеин К.В. Россия — Северная Африка: научно-технологическое и космическое сотрудничество // Азимут научных исследований: экономика и управление. 2023. Т. 12, № 3 (44). С. 147–151.

Дмитрий Вольвач: за 8 месяцев 2024 года товарооборот между Россией и Африкой вырос на 18,5%. Министерство экономического развития РФ, 9 ноября 2024 г. URL: https://economy.gov.ru/material/news/dmitriy_volvach_zh_8_mesyacev_2024_goda_tovarooborot_mezhdu_rossiey_i_afrikoy_vyros_na_185.html (дата обращения: 27.12.2024).

Кортунов А.В., Цайзер Н.Г., Харитонова Е.В. и др. Африка — Россия+: достижения, проблемы, перспективы: совместный доклад Российского совета по международным делам (РСМД) и СОЮЗА «Африканская деловая инициатива» (АДИ). Доклад № 53/2020. Российский совет по международным делам (РСМД). М.: НП РСМД, 2020. 60 с.

Лукойл — Зарубежные проекты, 2024. URL: <https://lukoil.ru/Business/Upstream/Overseas> (дата обращения: 04.08.2024).

Маринов Н.А. Гидрогеология Африки / Е.А. Востокова, Н.А. Маринов, Н.М. Новикова и др. Науч.-исслед. лаб. геологии зарубеж. стран. М.: Недра, 1978. 371 с.

Медведев И.А., Устюжанин В.В., Жданов А.И., Кортаев А.В. Применение методов машинного обучения для ранжирования факторов и прогнозирования невооруженной и вооруженной революционной дестабилизации в афразийской макроне нестабильности // Системный мониторинг глобальных и региональных рисков. 2022. № 13. С. 131–210.

Поваров О.А. Геотермальные промышленность и технологии в России / О.А. Поваров, Ю.Л. Лукашенко, Г.В. Томаров, С.Д. Циммерман // Тяжелое машиностроение. 2001. № 1. С. 14–19.

Росатом — Проекты — АЭС «Эль-Дабаа» (Египет), 2024. URL: <https://ase-ec.ru/about/projects/aes-el-dabaa/> (дата обращения: 06.08.2024).

Ситар К.А., Георгиевский Б.В., Большакова М.А., Сауткин Р.С. Комплексная оценка условия формирования нефтегазоматеринского потенциала отложений неопротерозоя. Георесурсы. 2022. Т. 24, № 2. С. 47–59.

Черкасов С.В. Ресурсы термальных подземных вод: геологические факторы оценки и освоения / С.В. Черкасов, А.М. Фархутдинов // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2017. № 6. С. 21–26.

AFREC Africa Energy Database. African Energy Commission. 2015. 165 p.

Ahmed N.K., Atiya A.F., Gayar N.E., El-Shishiny H. An empirical comparison of machine learning models for time series forecasting // Econometric reviews. 2010. 29(5–6). P. 594–621.

Benbouzid B. Values and Consequences in Predictive Machine Evaluation. A Sociology of Predictive Policing // Science & Technology Studies. 2018. № 31. P. 119–136.

Bourcier W.L. Recovery of Minerals and Metals from Geothermal Fluids / W.L. Bourcier, M. Lin, G. Nix // Lawrence Livermore National Laboratory. Report UCRL-CONF-215135. 2005.

BP Statistical Review of World Energy BP Energy Outlook. 2024. <https://www.bp.com/en/global/>

Brownfield M.E. Assessment of undiscovered oil and gas resources of the Mozambique Coastal Province, East Africa, in Brownfield, M.E., compiler, Geologic assessment of undiscovered hydrocarbon resources of Sub-Saharan Africa: U.S. Geological Survey Digital Data Series 69–GG, chap.10. 2016. 13 p.

Brownfield M.E., Charpentier R.R. Geology and total petroleum systems of the West-Central Coastal Province (7203), West Africa // U.S. Geological Survey Bulletin 2207-B. 2006. 52 p.

Brydges C. Resource conflict in the Democratic Republic of Congo // Carleton Review of International Affairs. 2013. № 2. P. 19–33.

CGG. Robertson basins and plays (TellusTM) — Sedimentary basins of the World map. 2019. www.cgg.com/robertson.

Cuvelier J., Diemel J., Vlassenroot K. Digging deeper: the politics of ‘Conflict minerals’ in the eastern Democratic Republic of the Congo // Global Policy. 2013. № 4(4). P. 449–451.

Dou L., Shi Z., Pang W., Ma F. Petroleum geological characteristics and exploration targets of the oil-rich sags in the Central and West African Rift System. PETROL. EXPLOR. DEVELOP. 51(1). 2024. P. 1–14.

EIA U.S. Energy Information Administration. 2024. <https://www.eia.gov/>

Echavarria F.R. Geothermal Energy Development in Africa // A Status Report. Distributed Generation and Alternative Energy Journal. 2008. Vol. 1, Issue 1. P. 1–12.

Eichstaedt P. Consuming the Congo: War and Conflict Minerals in the World's Deadliest Place. Chicago, IL: Lawrence Hill Books. 2011. 232 p.

Elbarbary S., Zaher M.A., Saibi H., et al. Geothermal renewable energy prospects of the African continent using GIS // Geothermal Energy. 2022. № 10: 8. P. 1–19.

Evenick J.C. Glimpses into Earth's history using a revised global sedimentary basin map, Earth-Science Reviews. 2021. Vol. 215.

Galeazzi S., Point O., Haddadi N., Mather J., Druesne D. Regional geology and petroleum systems of the Illizi–Berkine area of the Algerian Saharan Platform: An overview // Marine and Petroleum Geology. 2010. № 27. P. 143–178.

GDP Indicators. 2023. <https://statisticstimes.com/economy/gdp-indicators-2023.php> (дата обращения: 10.09.2024).

In Between Challenges and Potential: Charting a Sustainable Energy Course for East Africa. 2024. URL: <https://res4africa.org/in-between-challenges-and-potential-charting-a-sustainable-energy-course-for-east-africa> (дата обращения: 07.09.2024).

Lundberg S.M., Erion G., Chen H., et al. From local explanations to global understanding with explainable AI for trees // Nature machine intelligence. 2020. № 2(1). P. 56–67.

Molina M., Garip F. Machine learning for sociology // Annual Review of Sociology. 2019. № 45. P. 27–45.

Noorollahi Y., Itoi R., Fujii H., Tanaka T. GIS model for geothermal resource exploration in Akita and Iwate prefectures, northern Japan // Comput Geosci. 2007. № 33. P. 1008–1021.

Prol-Ledesma R.M. Evaluation of the reconnaissance results in geothermal exploration using GIS // Geothermics. 2020. № 29. P. 83–103.

Rapanyane M.B. China's involvement in the Democratic Republic of Congo's resource curse mineral driven conflict: an Afrocentric review // Contemporary Social Science. 2022. № 17(2). P. 117–128.

Sigidov Y.I., Skubriy E.V., Orlova L.N., et al. Imperatives of formation of the information society in the context of the modern global challenges // Digital Future Economic Growth, Social Adaptation, and Technological Perspectives. Switzerland. 2020. P. 231–240.

Tekrour A.S.O. Hydrocarbon exploration opportunities in Mauritania: petroleum potential. 5th African Petroleum Forum, Global Pacific & Partners. London, 2008. P. 1–31.

Trumpy E., Donato A., Gianelli G., et al. Data integration and favour ability maps for exploring geothermal systems in Sicily, southern Italy // Geothermics. 2015. № 56. P. 1–16.

United Nations. Statistical Annex I and II: Sustainable Development Goals Report 2024. 2024. URL: https://unstats.un.org/sdgs/files/report/2024/E_2024_54_Statistical_Annex_I_and_II.pdf (дата обращения: 15.09.2024).

Wangombe L.W. Protracted Conflicts in Mineral-Rich African States: A Case Study Of DRC (Doctoral dissertation, University of Nairobi). 2018.

World Economic Forum. Africa's Youth Population and Its Role in Driving Global Growth in the Digital Economy. 2023. URL: <https://www.weforum.org/stories/2023/08/africa-youth-global-growth-digital-economy/> (дата обращения: 02.10.2024).

Статья поступила в редакцию 28.10.2024, одобрена после рецензирования 30.10.2024, принята к публикации 25.01.2025