

ИЗМЕНЕНИЕ ЗРЕЛОСТИ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА И РЕАЛИЗАЦИЯ УГЛЕВОДОРОДНОГО ПОТЕНЦИАЛА В ИСТОРИИ ПОГРУЖЕНИЯ МАТЕРИНСКИХ ПОРОД БАСЕЙНА МАННАР, ШЕЛЬФ ШРИ ЛАНКА

© 2021 г. Ю. И. Галушкин^а, *, Е. П. Дубинин^а, **

^аМГУ им. М.В. Ломоносова, Музей Землеведения, Ленинские Горы, 1, Москва, 119991 Россия

*e-mail: yu_gal@mail.ru

**e-mail: edubin08@rambler.ru

Поступила в редакцию 08.02.2020 г.

После доработки 12.09.2020 г.

Принята к публикации 25.10.2020 г.

Реконструкции истории погружения и термической эволюции бассейна Маннар с применением системы моделирования бассейнов ГАЛО позволили численно оценить историю изменения температуры и зрелости ОВ потенциальных материнских пород бассейна и проследить за их изменениями с удалением от оси древнего рифта. Анализ показал, что органическое вещество (ОВ) юрских пород в разрезах скв. Pearl 1 и Dorado North, расположенных в бортовой области древнего рифта, остается в пределах “нефтяного окна” ($0.50 \leq Ro \leq 1.30\%$). В то же время в осадочных разрезах скв. Pseudo Mannar Deer и Baggasuda, близких к оси рифта, зрелость ОВ материнских пород юры заметно превышает пределы этого “окна”. На бортовых площадях бассейна, удаленных от оси древнего рифта потенциальные материнские породы юры генерируют в основном тяжелую и легкую нефть и совсем немного газа, тогда как на площадях, близких к оси, ОВ юрских формаций генерирует преимущественно газ. Анализ показывает, что тепловая активизация литосферы в верхнем мелу оказала заметное влияние на температуру и зрелость юрских пород на площадях скв. Pseudo Mannar Deer и Baggasuda, близких к оси древнего рифта, однако ее влияние заметно уменьшается на площадях, удаленных от этой оси.

Ключевые слова: шельф Шри Ланки, бассейн Маннар, пассивная окраина, моделирование бассейнов, генерация углеводородов

DOI: 10.31857/S001675252109003X

ВВЕДЕНИЕ

Бассейн Маннар – один из крупнейших геологических районов поиска месторождений углеводородов (УВ) в Шри Ланке (рис. 1). Геологическая и термическая история бассейна подробно рассмотрена в недавней работе (Galushkin, Dubinin, 2020). В ней многочисленные данные по геологической истории бассейна, структуре его осадочного чехла и составу пород, измерениям глубинных температур и отражательной способности витринита использовались для численной 1-D реконструкции истории погружения и термической эволюции бассейна Маннар в районе четырех скважин: Pearl-1, Dorado North, Pseudo Mannar Deer и Baggasuda (рис. 1). В настоящей статье мы воспользовались результатами расчета термических историй потенциальных материнских формаций бассейна, описанными в работе (Galushkin, Dubinin, 2020), чтобы оценить изменение зрелости пород и их потенциала генерации УВ на

участках пассивной окраины, различающихся степенью растяжения ее литосферы.

Изучение геологической истории бассейна Маннар предполагает по меньшей мере два периода рифтогенеза в изучаемом районе (Baillie et al., 2003; Premarathne et al., 2016). Первый из них относится к распаду Восточной и Западной Гондваны в период средней юры (Molnar, Tarronniér, 1975; Ratnayake et al., 2017) и связан с раскрытием Индийского океана (McKenzie, Sclater, 1971). Вращение Шри-Ланки против часовой стрелки относительно Индии во время этого этапа рифтогенеза (Yoshida et al., 1992) привело к растяжению земной коры между Индией и Шри Ланкой (Premarathne et al., 2016). Вторая фаза рифтогенеза связана с отделением “большой” Индии от Антарктиды около 142 млн лет назад. Около 134 млн лет назад она сменилась пострифтовой стадией остывания литосферы, во время которой бассейн погружался подобно аналогичным структурам

пассивных окраин (Kularathna et al., 2020). Эта стадия прерывалась фазой излияния жидких базальтов, максимум которой приходился на конец мела (маастрихт). Считалось, что такое излияние жидких базальтов могло быть связано с аналогичным событием в провинции Декан, которое, в свою очередь, объяснялось влиянием горячего пятна Ренюньен (Premarathne et al., 2016; Kularathna et al., 2020). Сейсмические данные указывают также на инверсию в эоцене, связанную с гималайским орогеном. Таким образом, бассейн залива Маннар представляет собой авлакоген или недоразвитый рифт, возникший как результат растяжения литосферы между Индией и Шри-Ланкой во время раскола Гондваны и так и не сумевший перейти в стадию спрединга моря с образованием океанической коры (Rana et al., 2008; Herath et al., 2017). Непрерывное погружение бассейна Маннар с начала рифтогенеза привело к отложению более чем 6 км осадков (Ratnayake et al., 2017; Kularathna et al., 2020).

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Осадочные разрезы трех скважин и одной псевдоскважины вместе с информацией по геологической истории рассматриваемого региона служили основой для численного моделирования термической истории бассейна Маннар в работе (Galushkin, Dubinin, 2020) и истории реализации углеводородного потенциала предполагаемых материнских свит бассейна в настоящей статье. Расчеты проводились с использованием системы моделирования осадочных бассейнов ГАЛО, принципы работы которой подробно рассмотрены в книге (Галушкин, 2007). Осадочные разрезы, используемые в расчетах, строились на основании интерпретации сейсмических профилей и данных бурения в работах (Ratnayake, Sampey, 2015; Premarathne et al., 2016; Ratnayake et al., 2017; Kularathna et al., 2015; 2020). Более подробно они рассматриваются в работе (Galushkin, Dubinin, 2020), согласно которой юрский и нижнемеловой осадочные комплексы первой рифтовой и частично пострифтовой стадий состоят в основном из крупнозернистых песчаных пород с относительно тонкими пластами глины и глинистых песчаников, в то время как палеогеновые и неогеновые отложения бассейна Маннар представлены переслаивающимися известняками, аргиллитами и песчаниками (Premarathne et al., 2016). Литологический состав пород бассейна представлен на примере осадочного разреза скв. Barracuda в табл. 1. Мощности осадочных слоев в современном разрезе бассейна можно оценить по сечениям на рис. 2, соответствующим геологическому времени $t = 0$. Этот рисунок показывает результаты численных реконструкций истории погружения и изменения температуры пород четырех осадочных разрезов бассейна, расположенных вдоль профиля, показанного на рис. 1.

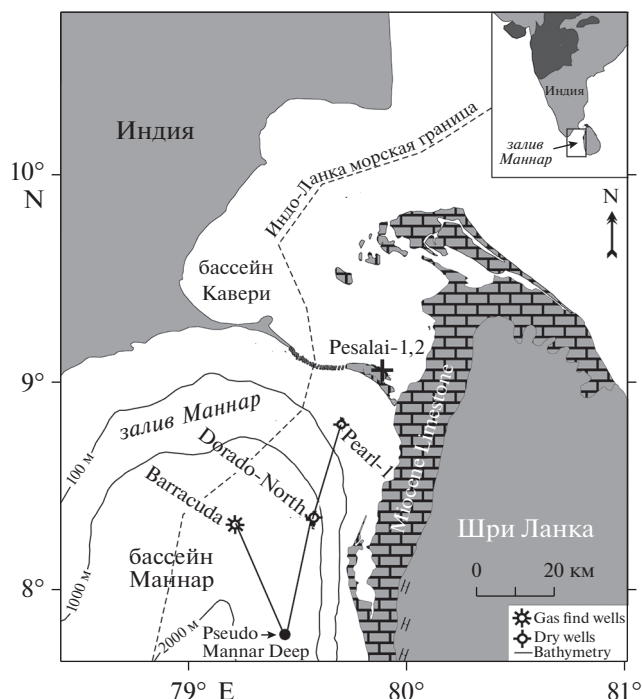


Рис. 1. Положение скважин Pearl-1, Dorado-North, Barracuda и псевдоскважины Pseudo Mannar Deep в бассейне Маннар (согласно (Premarathne et al., 2016) с небольшими изменениями).

дочных разрезов бассейна, расположенных вдоль профиля, показанного на рис. 1.

В численных реконструкциях термической истории бассейна Маннар, полученных в рамках системы моделирования бассейнов ГАЛО (Galushkin, Dubinin, 2020), предполагается, что литосфера рассматриваемого региона до раскола Гондваны была близка к стандартной континентальной литосфере с толщиной коры 36 км. Радиогенный вклад такой коры в поверхностный тепловой поток составлял около 21 мВт/м^2 , что согласуется с геофизическими исследованиями теплофизических свойств пород Индийского щита (Negi et al., 1986; Gupta et al., 1987; 1991; Kumar et al., 2013). В ходе эволюции бассейна, радиогенный вклад консолидированной коры уменьшался в соответствии с утонением коры при растяжении литосферы (рис. 3).

Два измерения глубинных температур в скважине Pearl-1 и около десяти измерений отражательной способности витринита в скважинах Dorado, Dorado North, Pesalai и Barracuda (Premarathne et al., 2016; Ratnayake et al., 2017) использовались для контроля достоверности численных моделей развития бассейна (Galushkin, Dubinin, 2020). Геофизические оценки современной глубины границы Мохоровичича (Herath et al., 2017) также использовались для контроля оценки амплитуд растяже-

Таблица 1. Современный осадочный разрез скв. Barracuda (глубина моря 1509 м), использованный в исходной базе данных в системе моделирования бассейнов ГАЛО

N	t, млн лет		z, км		Глины	Алевриты	Известняки
1	174	168	7.500	7.234	14	86	00
2	168	152	7.234	6.606	50	50	00
3	152	142	6.606	6.450	60	40	00
4	142	134	6.450	6.025	100	00	00
5	134	127	6.025	5.664	81	19	00
6	127	119	5.664	5.272	80	20	00
7	119	112	5.272	5.036	53	47	00
8	112	102	5.036	4.565	50	50	00
9	102	100	4.565	4.565		Перерыв	
10	100	93	4.565	4.094	100	00	00
11	93	87	4.094	3.702	100	00	00
12	87	82	3.702	3.388	70	15	15
13	82	76	3.388	3.041	89	05	06
14	76	70	3.041	2.711	70	15	15
15	70	67	2.711	1.961	70	15	15
16	67	61	1.961	1.961		Перерыв	
17	61	55.5	1.961	1.536	100	00	00
18	55.5	52.5	1.536	1.386	52	33	15
19	52.5	50	1.386	1.386		Перерыв	
20	50	40	1.386	1.146	52	33	15
21	40	14	1.146	0.596	40	20	40
22	14	00	0.596	0.000	40	20	40

Примечания. N – номер стадии развития осадочного бассейна, начиная с его зарождения; t – время начала и окончания стадии в млн лет; z – глубина основания и кровли слоя в современном разрезе или глубина горизонта несогласия в стадиях 9, 16 и 19); последние три столбца представляют доли литологических единиц в породе в %. Разрез построен на основании данных в работах (Ratnayake, Sample, 2015; Premarathne et al., 2016; Ratnayake et al., 2017; Kularathna et al., 2015, 2020), обобщенных в статье (Galushkin, Dubinin, 2020).

ния литосферы в нашей модели термического развития бассейна (Galushkin, Dubinin, 2020).

История реализации углеводородного потенциала предполагаемых материнских толщ бассейна рассматривалась в настоящей статье с помощью специальной части программного пакета ГАЛО, позволяющей рассчитывать выход разных фракций УВ, используя термическую историю пород материнской свиты и параметры кинетического спектра генерации УВ органическим веществом свиты (Галушкин, 2007). В работе рассматриваются три потенциальных материнских формации: среднеюрские отложения ааленского возраста (174 млн лет), верхнеюрские породы киммериджа (152 млн лет) и верхнемеловые отложения кампанского возраста (83 млн лет). Палеогеновые породы не рассматриваются в нашем анализе, так как в современном осадочном разрезе бассейна Маннар они являются либо раннезрелыми, либо незрелыми ($R_o < 0.65\%$; рис. 2, 4). Для ОВ юрских пород бассейна Маннар характерен кероген III типа (Premarathne et al., 2013; Ratnayake et al., 2017; Kularathna et al., 2015, 2020). В соответствии с данными экспериментального пиролиза из осадочных разрезов скважин Dorado, Dorado North и Barracuda (Ratnayake et al., 2017) кероген верхнемеловых пород может быть пред-

ставлен смесью керогенов II и III типов с начальным потенциалом $HI = 430$ мг УВ/г $C_{орг}$. Такой потенциал согласуется, например, со смесью 60% морского керогена типа II с $HI = 611$ мг УВ/г $C_{орг}$ и 40% керогена типа III с $HI = 160$ мг УВ/г $C_{орг}$. В расчетах выхода УВ использовались стандартные 4-ех фракционные (тяжелая и легкая нефть, газ и кокс) кинетические спектры созревания керогенов II-ого и III-его типов, разработанные во Французском Институте Нефти и применяющиеся в широко распространенном пакете моделирования MATOIL.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Четыре скважины, анализируемые в статье, располагаются на профиле рис. 1 в порядке удаления от оси рифта. Площадь Barracuda – наиболее близкая к оси древнего рифта, тогда как площадь Pearl-1 располагается в бортовой части рифта, наиболее удаленной от его оси. Соответственно, начальный тепловой поток, характерный для первой юрской стадии рифтогенеза убывал от значения 105 мВт/м² на площади Barracuda (рис. 3), что характерно для осевой области современных континентальных рифтов (Смирнов, 1980), до 50 мВт/м² вблизи скв. Pearl-1 (Galushkin, Dubinin, 2020). Со-

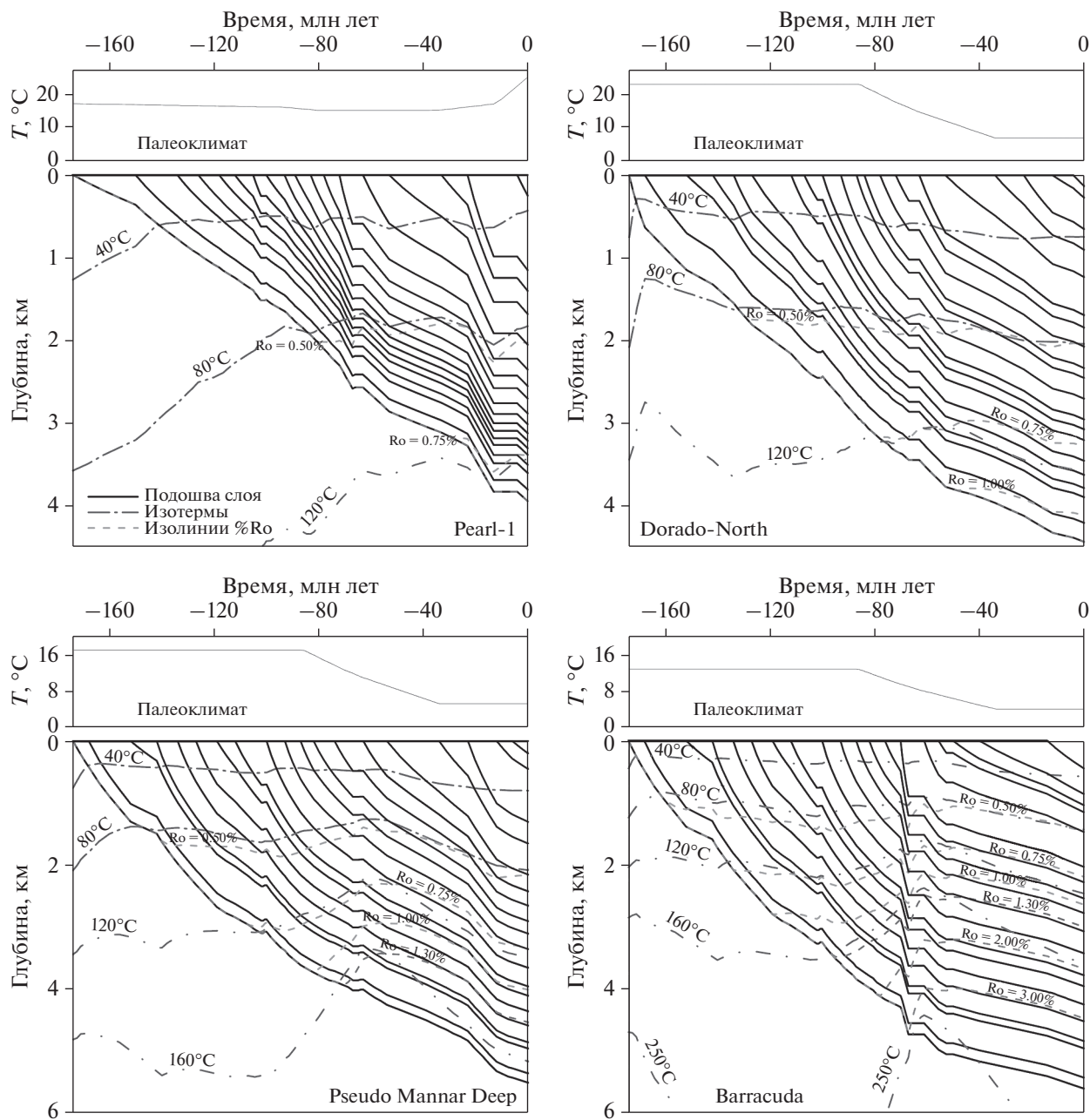


Рис. 2. Изменение среднегодовой температуры на дне моря (верхние рисунки) и реконструкция истории погружения, изменения температуры и зрелости органического вещества осадочных пород бассейна Маннар вдоль профиля, показанного на рис. 1.

ответственно, степень растяжения литосферы β убывала от значения 2.84 на площади Barracuda до 1.27 в районе скв. Pearl-1. Характерно, что растяжение литосферы на первой стадии рифтогенеза отсутствовало в бортовой части рифта (скв. Pearl-1). Реконструкция термической истории литосферы бассейна Маннар, представленная на рис. 3 для скв. Barracuda, показывает, что в истории бассейна в верхнем мелу имела место вторая стадия рифтогенеза, сопровождавшаяся интенсивной тепловой активацией бассейна и растяжением

его литосферы (Galushkin, Dubinin, 2020). Геологические данные свидетельствуют, что эта активизация началась в позднем апте (118–112 млн лет назад) и закончилась в конце верхнего мела (Premathne et al., 2016). На площади Barracuda тепловой поток в основании коры (через границу MOXO) повышался во время активизации до 90 мВт/м². В бортовой части рифта, на площади Pearl-1 это повышение было более умеренным (до 51 мВт/м²; Galushkin, Dubinin, 2020).

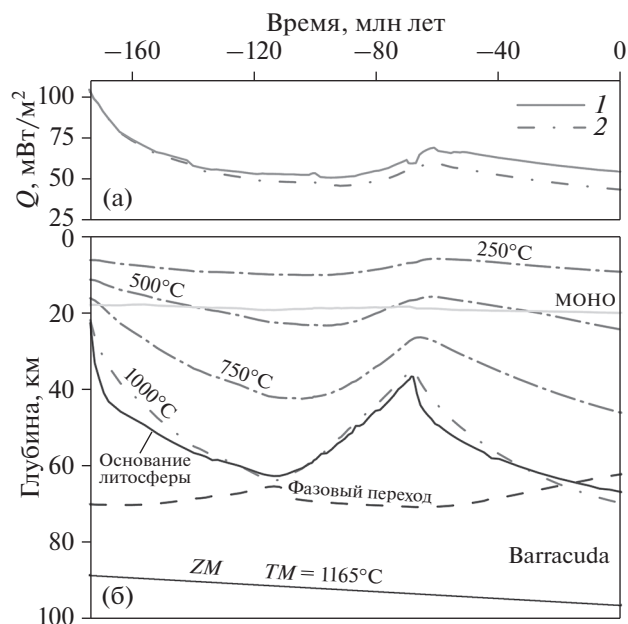


Рис. 3. Изменение теплового потока (а) и эволюция термического режима литосферы (б) в истории погружения бассейна Маннар в районе скв. Barracuda. (а) 1 и 2 – тепловой поток через поверхность осадков (дно моря) и поверхность фундамента (основание осадочного покрова). (б) штрих-пунктирные линии – изотермы; линия “МОХО” – основание коры; линия “фазовый переход” – глубина фазового перехода “шпинелевый перидотит – гранатовый перидотит” в мантии; основание литосферы определяется пересечением текущей геотермы с кривой солидуса перидотита с содержанием 0.2% H_2O (Wyllie, 1979). ZM – нижняя граница области расчета температур, на которой поддерживается постоянная температура TM . Для площади Barracuda $TM = 1165^\circ C$, а начальное значение $ZM = 88.3$ км (Galushkin, Dubinin, 2020).

Численные реконструкции истории погружения осадочных пород бассейна Маннар, изменения их температуры и зрелости органического вещества (ОВ) приведены на рис. 2 для всех четырех рассматриваемых площадей бассейна. Мощность осадочного покрова бассейна Маннар увеличивается вдоль профиля рис. 1 от 3.940 км вблизи Pearl-1 до 7.500 км на площади Barracuda (рис. 2). Соответственно, по нашим оценкам максимальная степень созревания ОВ пород верхнеюрского комплекса возрастает от $R_o = 0.86\%$ в бортовой части древнего рифта до 4.17% у скв. Barracuda (рис. 2, 4). Отметим, что в нашей модели коэффициенты отражательной способности витринита, $\%R_o$, рассчитывались с использованием кинетического спектра созревания витринита EASY R_o (Sweeney, Burnham, 1990). Рис. 4 показывает изменение в глубинах изотерм и изолиний $R_o\%$ в современном осадочном разрезе бассейна Маннар вдоль профиля рис. 1, предполагаемые в нашей модели. На этом рисунке можно проследить переход пород верхнеюрского горизонта от

зрелости в пределах “окна генерации нефти” к перезрелому ОВ при смещении от бортовой части древнего рифта к его осевой части в районе скв. Barracuda.

Рис. 2 и 4 показывают, что осадочные породы маастрихского, компанского и более старшего возраста в скважинах Pearl 1 и Dorado North находятся в пределах “нефтяного окна”. В псевдоскважине Pseudo-Mannar Deep это “окно” включает в себя породы от палеоцена до готерива на глубинах от 2.16 до 4.53 км. В скв. Barracuda в пределах “окна генерации нефти” находятся породы с возрастом от маастрихта до турона на глубинах от 1.95 до 4.00 км.

Три верхних рис. 5 показывают, как изменяется температурная история трех потенциальных материнских свит возраста 83, 152 и 174 млн лет с удалением от оси древнего рифта. Три нижних рис. 5 иллюстрируют ту же проблему для зрелости потенциальных материнских пород. Моделирование показывает, что вторая тепловая активизация литосферы в верхнем мелу оказывает заметное влияние на температурную историю и созревание ОВ юрских пород на площадях Pseudo Mannar Deer и Barracuda. Однако, ее влияние менее заметно на площадях Pearl 1 и Dorado North, удаленных от оси древнего рифта (рис. 5). Рис. 6, 7 и 8 представляют рассчитанные истории генерации тяжелой и легкой нефти, а также газа для трех потенциальных материнских свит бассейна на всех 4-ех его рассматриваемых площадях. Табл. 2 демонстрирует основные результаты численного кинетического моделирования для современного разреза бассейна Маннар.

ОБСУЖДЕНИЕ

Моделирование предполагает, что ОВ пород кампанского возраста в осадочных разрезах скв. Pearl 1, Dorado North и Pseudo Mannar Deer характеризуется ограниченной степенью зрелости, которая не превышает 0.66% по витриниту (рис. 2, 4, 5). Соответственно, коэффициент преобразования керогена не превышает 7%, (табл. 2) и генерация газа здесь незначительна (табл. 2, рис. 6). Исключение составляет осадочный разрез скв. Barracuda, где кампанские породы погребены на глубину около 3400 м. Здесь зрелость достигает значения $R_o = 0.91\%$, а реализация потенциала генерации УВ превышает 50% (табл. 2, рис. 6). При этом наблюдается преимущественная генерация тяжелой и легкой нефти, но в то же время и генерация газа становится уже заметной (37 мг УВ/г $C_{орг}$; табл. 2). Следовательно, породы кампанского возраста с достаточным содержанием ОВ могут генерировать заметный объем тяжелой и легкой нефти (и частично газа), если они погружены на глубину более 3000 м.

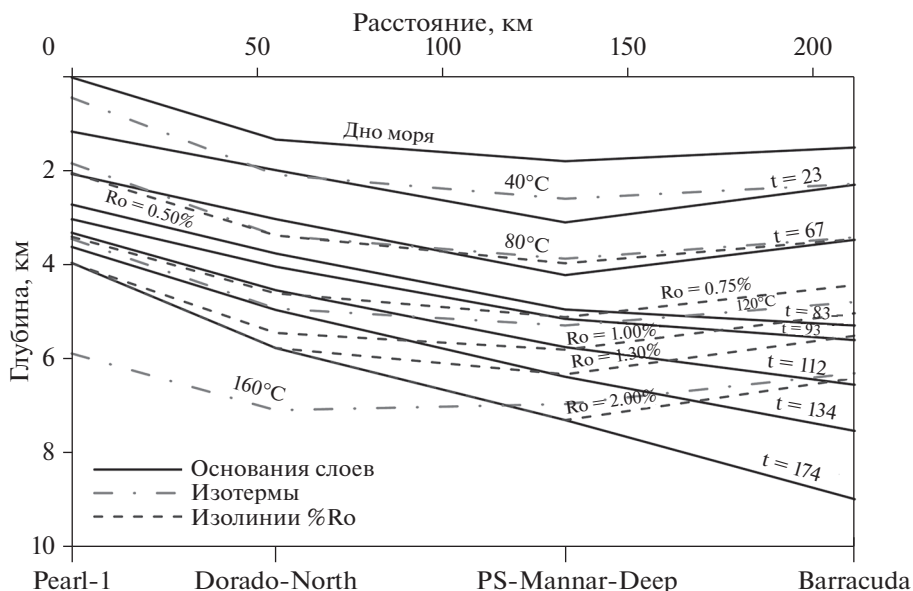


Рис. 4. Глубины осадочных слоев и вычисленные распределения температуры пород и отражательной способности витринита с глубиной в современном осадочном разрезе бассейна Маннар вдоль профиля, показанного на рис. 1. t – возраст горизонта в млн лет. Глубины слоев, изотерм и изолиний $Ro\%$ между скважинами получались линейной интерполяцией значений для отдельных скважин.

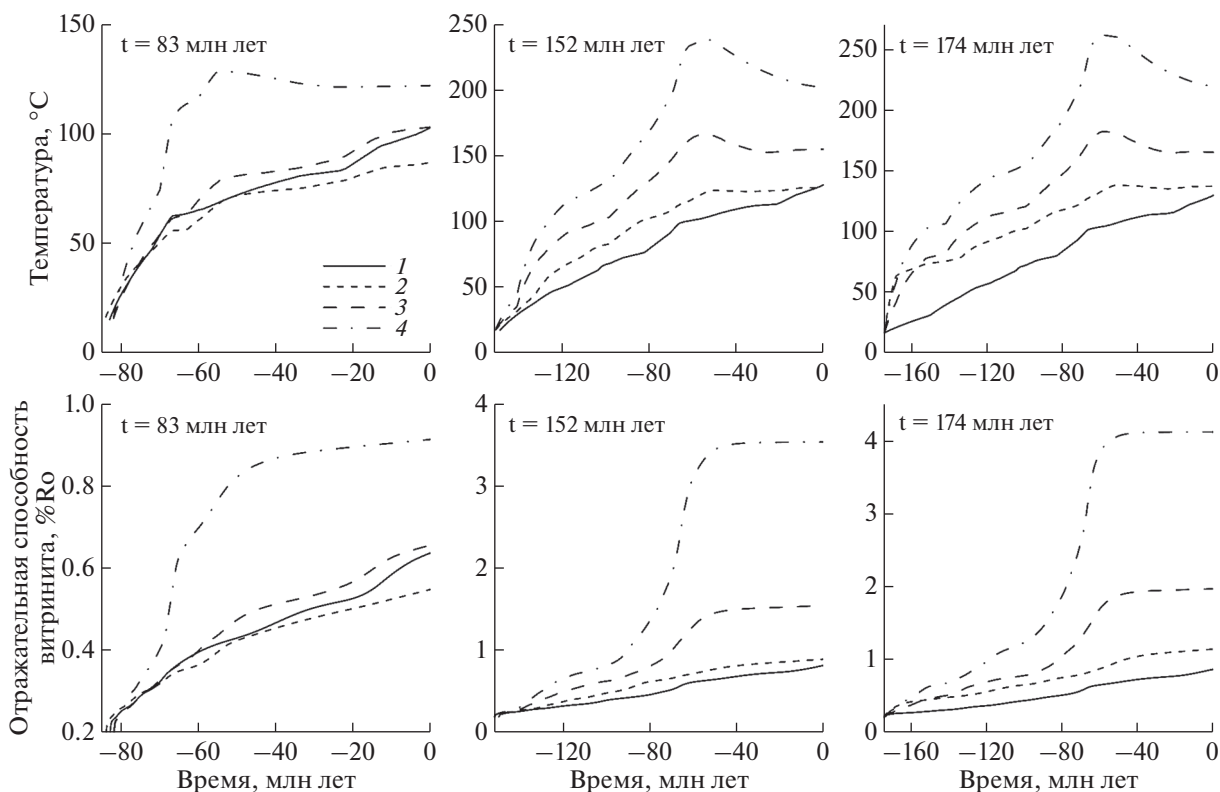


Рис. 5. Изменение температуры пород (верхние рис.) и степени созревания их ОВ (нижние рис.) в истории погружения формаций верхнего мела (возраст 83 млн лет), верхней юры (152 млн лет) и средней юры (174 млн лет) на четырех изучаемых площадях бассейна Маннар: 1 – скв. Pearl 1, 2 – Dorado North, 3 – Pseudo Mannar Deep и 4 – Barracuda.

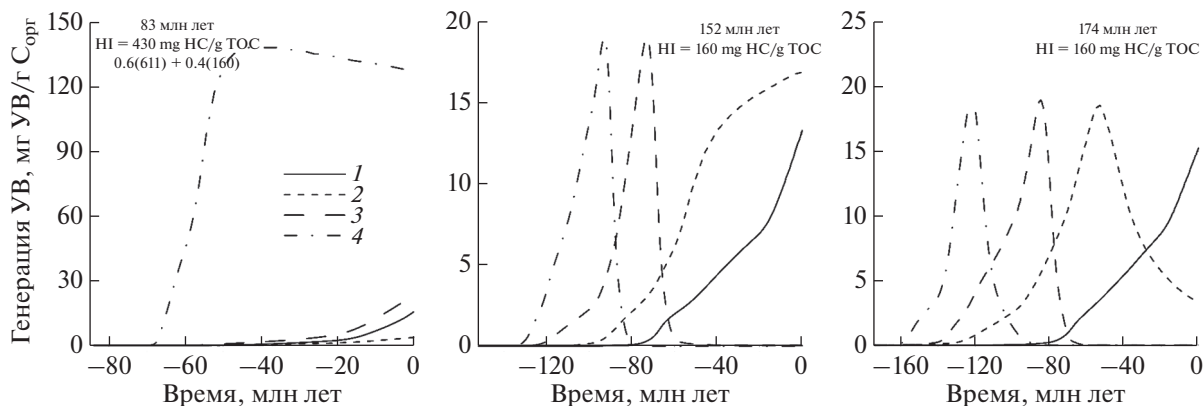


Рис. 6. Генерация тяжелой нефти в истории погружения верхнемеловой (возраст 83 млн лет), верхнеюрской (возраст 152 млн лет) и среднеюрской (возраст 174 млн лет) потенциальных материнских формаций, вычисленная в 4-х компонентной модели созревания керогена для осадочных разрезов скв. Pearl 1 (1), Dorado North (2), Pseudo Mannar Deep (3) и Barracuda (4).

Породы юрского комплекса погружены более глубоко, чем верхнемеловые. Соответственно, зрелость ОВ в этих породах заметно выше. Тем не менее, ОВ юрских пород в скв. Pearl 1 и Dorado North остается в пределах “нефтяного окна”, тогда как зрелость ОВ материнских пород юры превышает пределы этого окна в скв. Pseudo Mannar Deep и Barracuda (табл. 2, рис. 2, 4, 5). Современная зрелость юрских пород в скв. Pearl 1 и верхнеюрских пород в скв. Dorado North достигает значений $R_o = 0.8-0.9\%$ (табл. 2, рис. 2, 4, 5), однако степень реализации потенциала генерации УВ

здесь не превышает 20% так как для ОВ этих пород характерен трудно созреваемый наземный кероген типа III (табл. 2). Потенциальные материнские породы юры генерируют в основном тяжелую и легкую нефть и очень немного газа (табл. 2, рис. 6–8). В ааленских породах средней юры на площади Dorado North реализация УВ потенциала достигает 41% при заметной доле газа в генерируемых продуктах (табл. 2, рис. 8). Однако более высокая степень реализации потенциала генерации УВ достигается в юрских породах скв. Pseudo Mannar Deep и Barracuda. Здесь значения отража-

Таблица 2. Степень созревания ОВ и генерация различных фракций УВ в современном осадочном разрезе 4-х площадей бассейна Маннар (результаты моделирования)

t	z	T	Ro	Hi	Hi r	Hi ho	Hi lo	Hi g	t _{0.50}	t _{1.30}
млн лет	м	°C	%	Мг УВ / г C _{орг}					млн лет	
Pearl-1										
174	3940	129.9	0.857	160	23.5	15.2	3.62	3.46	-80.5	-
152	3800	127.2	0.826	160	19.2	13.3	2.63	2.66	-75	-
83	2700	102.7	0.636	430	21.1	15.5	3.66	1.86	-31	-
Dorado North										
174	4430	137.5	1.133	160	66.2	3.30	26.6	19.1	-130	-
152	3890	125.1	0.902	160	31.2	16.9	6.16	5.34	-98	-
83	2330	86.8	0.547	430	5.62	3.74	1.37	0.52	-20	-
Pseudo Mannar Deep										
174	5500	165.5	1.960	160	131	0.001	2.54	77.3	-141	-69
152	4950	154.4	1.558	160	114	0.029	35.7	45	-121	-60
83	2900	103.0	0.655	430	30.6	23.2	4.72	2.64	-43	-
Barracuda										
174	7500	219.5	4.110	160	160	0.000	0.000	106	-152	-114
152	6.606	201.3	3.551	160	159	0.000	0.000	106	-130	-89
83	3.388	127.8	0.912	430	248	127	55.7	37	-64	-

Примечания. t – возраст пород слоя в млн лет; z – глубина породы в км; T – вычисленная температура пород в °C. Ro – вычисленная отражательная способность витринита в % (z, T, Ro – в современном разрезе бассейна, т.е. при t = 0). Hi – начальный потенциал генерации УВ; Hi r – полная генерация УВ, Hi ho и Hi lo – генерация тяжелой и легкой нефти; Hi g – генерация газа; t_{0.50} и t_{1.30} – времена входа и выхода породы из “окна генерации нефти” (0.50% ≤ Ro ≤ 1.30%);. В таблице исходный потенциал HI = 160 мг УВ/г C_{орг} соответствует стандартному сухопутному керогену типа III; HI = 430 мг УВ/г C_{орг} соответствует смеси 60% морского керогена типа II (HI = 611 мг УВ/г C_{орг}) и 40% керогена типа III (HI = 160 мг УВ/г C_{орг}).

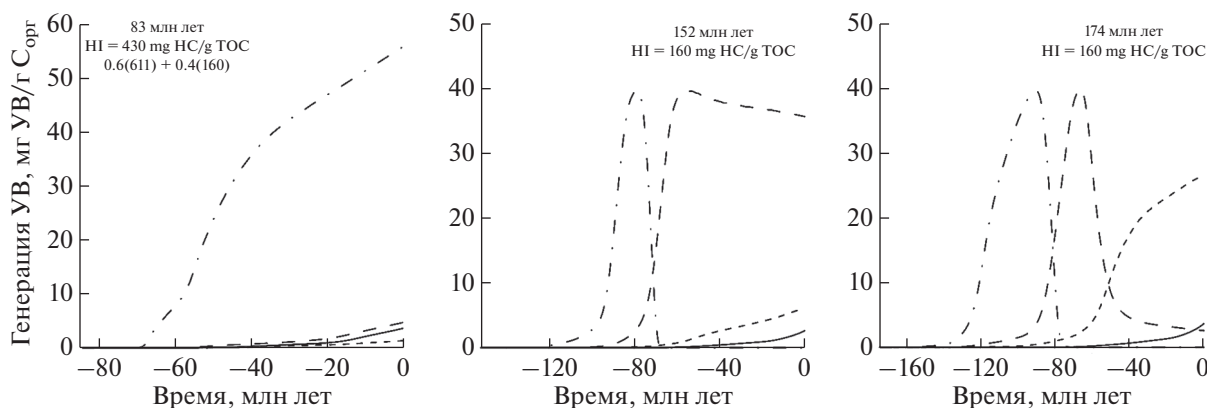


Рис. 7. Генерация легкой нефти. Параметры кривых те же, что на рис. 6.

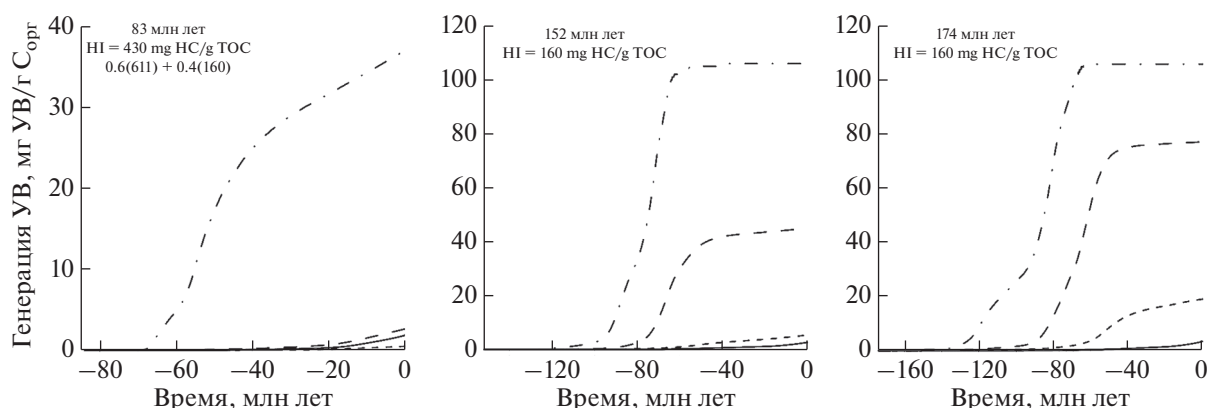


Рис. 8. Генерация газа. Параметры кривых те же, что на рис. 6.

тельной способности витринита уже выше 1.50% и степень реализации потенциала генерации УВ превышает 70% (табл. 2, рис. 2, 4, 5, 7, 8). Заметная роль термической активизации литосферы бассейна в верхнем мелу в достижении таких высоких значений % Ro и реализации потенциала юрских пород отмечалась выше. Газ доминирует в продуктах УВ генерации породами юры на площадях Pseudo Mannar Deer и Varracuda бассейна Маннар (табл. 2, рис. 7, 8).

Интересно сравнить результаты моделирования бассейна Маннар в системе ГАЛО с моделированием тех же площадей бассейна в системе SIGMA-2D, разработанной японской корпорацией JOGMEC и примененной в работах (Ratnayake, Sampei, 2015; Premarathne et al., 2016; Ratnayake et al., 2017). Сравнение двух моделей подробно обсуждается в работе (Galushkin, Dubinin, 2020) и здесь мы коснемся лишь моментов, касающихся результатов кинетического моделирования в двух системах. Система моделирования SIGMA-2D принципиально отличается от ГАЛО тем, что в первой область расчета температуры ограничена

осадочным покровом. Там задается тепловой поток на поверхности фундамента (в основании осадочной толщи). Обе модели используют одни и тот же ряд измерений отражательной способности витринита для калибровки модели. Поэтому современные глубины кровли “окна генерации нефти” (Ro = 0.50%) в скв. Pearl 1, Dorado North и Pseudo Mannar Deer оказываются близкими в обеих системах моделирования. И хотя современный тепловой поток и температуры осадочных пород, рассчитанные в системе SIGMA-2D, нереально низкие (Ratnayake, Sampei, 2015; Premarathne et al., 2016; Ratnayake et al., 2017; Galushkin, Dubinin, 2020), температуры осадочных пород в подавляющей части истории погружения бассейна оказываются выше вычисленных в нашей модели. Как следствие, зрелость ОБ глубинных пород превышает полученную в модели ГАЛО. Так, на площади Pseudo Mannar Deer дно “окна генерации нефти” (Ro = 1.30%) в системе SIGMA-2D оказывается на 700 м выше, чем в нашей модели. Согласно рис. 2, 5 и табл.2 породы кампана на площади Dorado North попадают в пределы “неф-

тяного окна” в нижнем миоцене (около 20 млн лет назад), в то время как то же событие в системе SIGMA-2D происходит на 30 млн лет раньше (Premarathne et al., 2016). Реализация потенциала генерации УВ верхнемеловых пород в скв. Dorado North составляет согласно табл. 2 всего 1.3%, что отвечает низкому уровню зрелости этих пород $R_o = 0.547\%$, в то время как в модели SIGMA-2D она превышает 80% (Ratnayake, Sampey, 2015; Ratnayake et al., 2017). Те же породы в скважине Барракуда имеют коэффициент трансформации около 58% в нашей модели и около 82% в работах, приведенных выше.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Реконструкции истории погружения и термической эволюции бассейна Маннар с применением системы моделирования бассейнов ГАЛО позволили численно оценить историю изменения температуры и зрелости ОБ потенциальных материнских пород бассейна и проследить за их изменениями с удалением от оси древнего рифта. Моделирование показало, что ОБ юрских пород в разрезах скв. Pearl 1 и Dorado North, расположенных в бортовой области древнего рифта, остается в пределах “нефтяного окна”, тогда как в скв. Pseudo Mannar Deer и Vaggasuda, близких к оси рифта, зрелость ОБ материнских пород юры заметно превышает пределы этого “окна” (табл. 2, рис. 2, 4, 5). На бортовых площадях бассейна (скв. Pearl 1 и Dorado North) потенциальные материнские породы юры генерируют в основном тяжелую и легкую нефть и совсем немного газа, в то время как на площадях Pseudo Mannar Deer и Vaggasuda ОБ юрских формаций генерирует преимущественно газ. Тепловая активизация литосферы в верхнем мелу оказывает заметное влияние на температуру и зрелость юрских пород на площадях Pseudo Mannar Deer и Vaggasuda, близких к оси древнего рифта, однако ее влияние заметно меньше на площадях Pearl 1 и Dorado North (рис. 5).

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ (проект № 18-05-03-78).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Галушкин Ю.И. (2007) Моделирование осадочных бассейнов и оценка их нефтегазоносности, М.: “Научный мир”, 457 с.
- Смирнов Я.Б. (1980) *Термическое поле СССР: замечания к картам теплового потока и глубинным температурам в масштабе 1 : 10000000*. М., ГУГК, 150с.
- Baillie P.W., Shaw R.D., Liyanaarachchi D.T.P., Jayaratne M.G. (2003) A new Mesozoic sedimentary basin, offshore Sri Lanka. *Proceedings of EAGA 64th Conference & Exhibition*, Florence, Italy.
- Galushkin Yu.I., Dubinin E.P. (2020) Thermal history and extension of the lithosphere in the Mannar basin and realization its hydrocarbon potential, offshore Sri Lanka. *Marin. Petrol. Geol.* **119**, 104477.
- Gupta M.I., Sharma S.R., Sundar A., Singh S.B. (1987) Geothermal studies in the Hyderabad granitic region and the crustal thermal structure of the Southern Indian Shield. *Tectonophysics.* **140**, 257-264.
- Gupta M.I., Sundar A., Sharma S.R. (1991) Heat flow and heat generation in the Archaean Dharwar cratons and implications for the Southern Indian Shield geotherm and lithospheric thickness. *Tectonophysics.* **144**, 107-122.
- Herath P., Gunatilake J., Weerasinghe D. (2017) Mohorivic discontinuity beneath Mannar Basin: a failed rift. *J. Geol. Soc. Sri Lanka.* **18**, 77-87.
- Kularathna E.K.C.W., Pitawala H.M.T.G.A., Naratne A.S.E., Senevirathne B.S.M.C.K., Weerasinghe D.A. (2015) Forced-fold structures in the Mannar Basin, Sri Lanka: modes of occurrence, development mechanism and contribution for the petroleum system. *J. Geolog. Soc. Sri Lanka.* **17**, 53-63.
- Kularathna E.K.C.W., Pitawala H.M.T.G.A., Senaratne A., Ratnayake A.S. (2020) Play distribution and the hydrocarbon potential of the Mannar Basin, Sri Lanka. *J. Petrol. Explor. Product. Technol.* Published online **12** (May), <https://doi.org/10.1007/s13202-020-00902-8>
- Kumar N., Zeyen H., Singh A.P., Singh B. (2013) Lithospheric structure of southern Indian shield and adjoining oceans: integrated modeling of topography, gravity, geoid and heat flow data. *Geophys. J. Int.* **194**, 30-44.
- McKenzie D., Sclater J.G. (1971) The evolution of the Indian Ocean since the Late Cretaceous. *Geophys J R Astr Soc.* **25**, 437-528.
- Molnar P., Tapponnier P. (1975) Cenozoic tectonics of Asia: effects of continental collision. *Science.* **189**, 419-426.
- Negi I.G., Panday O.P., Agrawal P.K. (1986) Super-mobility of hot Indian lithosphere, *Tectonophysics.* **131**, 147-156.
- Premarathne U., Suzuki N., Rathnayake N.P., Kularathne C. (2013) A petroleum system in the Gulf of Mannar Basin, offshore Sri Lanka. *Proceed. Annual Technic. Sess. Geolog. Soc. Sri Lank, Peradeniya.* 29, 9-12.
- Premarathne U., Suzuki N., Ratnayake N., Kularathne C. (2016) Burial and thermal history modelling of the Mannar basin, offshore Sri Lanka. *J. Petrol. Geol.* **39**(2), 193-214.
- Rana M.S., Chakraborty Ch., Sharma R., Giridhar M. (2008) Mannar Volcanics – Implications for Madagascar Breakup. In “7th Conference and Exposition on Petroleum Geophysics”, Hyderabad, 358-363.
- Ratnayake A.S., Sampei Y. (2015) Preliminary prediction of the geothermal activities in the frontier Mannar Basin, Sri Lanka. *J. Geolog. Soc. Sri Lanka.* **17**, 19-29.
- Ratnayake A.S., Kularathne Ch.W., Sampei Y. (2017) Assessment of hydrocarbon generation potential and thermal maturity of the offshore Mannar Basin, Sri Lanka. *J. Petrol. Explor. Product. Technology.* Published online, 09 December 2017, 1-13. <https://doi.org/10.1007/s13202-017-0408-1>
- Sweeney J.J., Burnham A.K. (1990) Evolution of a simple model of vitrinite reflectance based on chemical kinetics. *AAPG Bull.* **74**(10), 1559-1570.
- Wyllie P.J. (1979) Magmas and volatile components. *Am. Mineral.* **64**, 469-500.
- Yoshida M., Funaki M., Vitanage P.W. (1992) Proterozoic to Mesozoic east Gondwana: the juxtaposition of India, Sri Lanka, and Antarctica. *Tectonics.* **11**(2), 381-391.