

РЕАЛИЗАЦИЯ НЕФТЕГАЗОГЕНЕРАЦИОННОГО ПОТЕНЦИАЛА ГЛУБОКИХ МАТЕРИНСКИХ СВИТ ЗАПАДНО-СИБИРСКОГО БАССЕЙНА НА ПРИМЕРЕ СКВАЖИНЫ ТЮМЕНСКАЯ СГ-6

© 2023 г. Ю. И. Галушкин*

*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Музей Землеведения,
Ленинские Горы, 1, Москва, 119991 Россия*

**e-mail: yu_gal@mail.ru*

Поступила в редакцию 27.03.2022 г.

После доработки 24.01.2023 г.

Принята к публикации 27.01.2023 г.

Модель термической эволюции литосферы Западно-Сибирского бассейна в районе сверхглубокой скважины СГ-6, пробуренной до глубины 7502 м и расположенной в пределах Колтогорско-Уренгойского грабена, используется для численной оценки генерации различных фракций углеводородов (УВ) породами материнских свит триаса и юры. Термическая модель предполагает внедрение силла в приповерхностные слои фундамента в ранней юре и гидротермальную активность в позднем плиоцене-раннем плейстоцене, которые оказали заметное влияние на историю реализации потенциала генерации УВ породами материнских свит триаса и юры. Для пурской свиты триаса внедрение силла в приповерхностные слои фундамента в ранней юре привело к скачкообразному увеличению реализации потенциала генерации УВ до 84% и деградации более 97% генерированной массы легкой нефти. Расчеты показывают, что тяжелая нефть, генерированная породами пурской, тогурской и нижних горизонтов тюменской свит, деградировала почти полностью в результате вторичного крекинга, в то время как в верхних горизонтах тюменской свиты и в породах баженовской свиты тяжелая нефть преобладает среди генерируемых фракций УВ. К настоящему времени легкая нефть, оставшаяся в матрице материнских пород, полностью деградировала в породах триаса, но составляет заметную долю продуктов генерации УВ в породах подошвы тогурской свиты и в кровле тюменской. Она является преобладающей фракцией в верхних горизонтах тогурской свиты и в породах основания тюменской свиты. Газовые УВ по расчетам составляют заметную долю продуктов генерации УВ в тогурской и тюменской свитах, и они доминируют в пурской свите средне-триасового возраста. При относительно низком исходном потенциале генерации УВ и невысоком содержании органического вещества в породах пурской, тогурской и тюменской свит порог первичной миграции жидких УВ не достигался, и генерированные жидкие УВ, вероятно, не покидали матрицы пород, в то время как миграция газовых УВ вполне вероятна. Порог первичной миграции жидких УВ для пород баженовской свиты достигался по расчетам около 65 млн лет.

Ключевые слова: Западная Сибирь, скважина СГ-6, отражательная способность витринита, генерация нефти и газа, порог эмиграции

DOI: 10.31857/S0016752523060031, **EDN:** EOEANN

ВВЕДЕНИЕ

В Западно-Сибирском бассейне (ЗСБ) до сих пор сохраняются большие перспективы открытия новых месторождений нефти и газа, связанных с глубокими юрскими, триасовыми и пермскими осадочными горизонтами, а также с верхними горизонтами трещиноватого фундамента (Белоконь-Карасева и др., 2006; Коробов, Коробова, 2011; Кравченко, 2012; Конторович и др., 2013). Бурение сверхглубокой параметрической скважины Тюменская СГ-6 до глубины 7502 м позволило впервые для севера Западной Сибири вскрыть и детально изучить наиболее полный

разрез триасовых и юрских отложений (рис. 1). Чтобы оценить нефтегазогенерационный потенциал этих отложений, необходимо знать термическую историю осадочного бассейна. В этом аспекте осадочный разрез сверхглубокой параметрической скважины СГ-6 (рис. 1) представляет особый интерес, поскольку литосфера и осадочный разрез Колтогорско-Уренгойского района хорошо изучены геолого-геофизическими методами (Белоконь-Карасева и др., 2006; Кравченко, 2012; Конторович и др., 2013; Добрецов и др., 2013 и др.). Подробная база данных о структуре и геологической истории района вместе с достаточ-

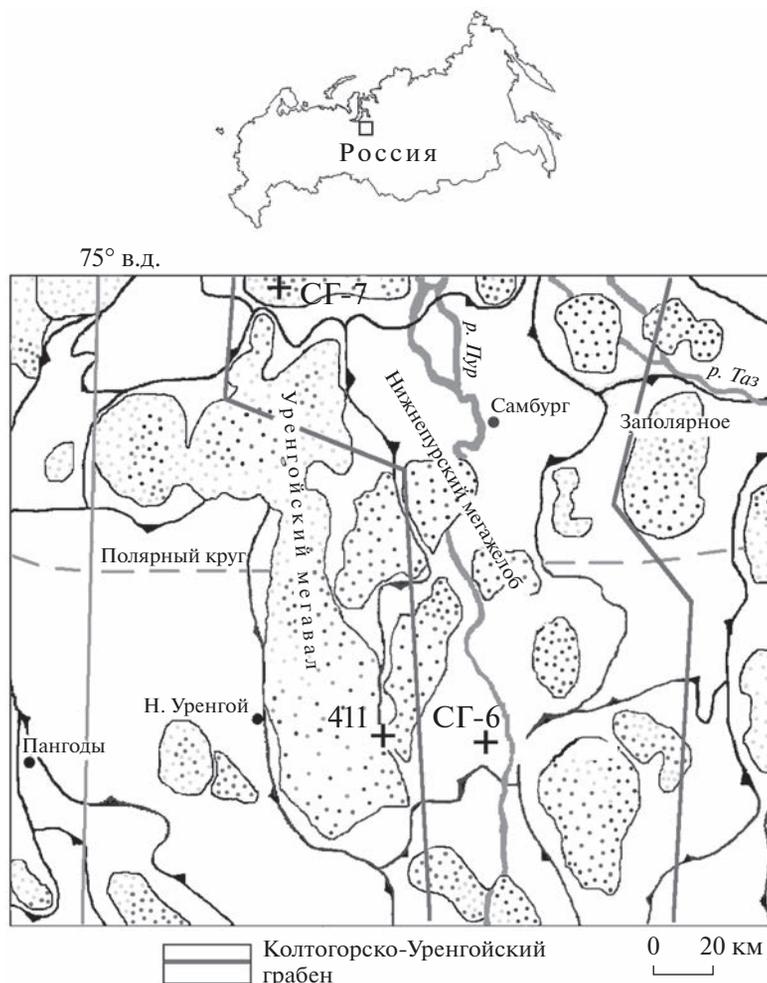


Рис. 1. Положение сверхглубоких скважин Тюменской СГ-6 и Ен-Яхинская СГ-7 в пределах Колтогорско-Уренгойского рифтового грабена (после (Галушкин и др., 1999) с небольшими изменениями).

ным количеством измерений глубинных температур и отражательной способности витринита (ОСВ) (Фомин и др., 2001; Мясникова, Оксенойд, 2012; Кравченко, 2012; Богоявленский и др., 2013) позволили построить здесь достаточно обоснованную модель тепловой эволюции литосферы и применить ее для численной реконструкции истории реализации нефтегазогенерационного потенциала глубоких материнских свит бассейна. Результаты моделирования, полученные на примере осадочного разреза скважины СГ-6, могут быть применены для оценки нефтегазогенерационного потенциала соответствующих во многих районах Западно-Сибирского бассейна, поскольку особенности в глубинных распределениях температур и ОСВ характерны для разрезов в окрестности скв. СГ-6, наблюдаются во многих районах Западной Сибири, включая осадочные разрезы Красноленинского свода, Енисейско-Хатангского прогиба, Южно-Карской синеклизы, и т.д.

В данной статье генерационные свойства глубоких нефтегазоматеринских (НГМ) свит Западно-

но-Сибирского бассейна (ЗСБ) оцениваются на основе численных реконструкций тепловой истории бассейна (рис. 2). Тепловой режим литосферы Колтогор-Уренгойского грабена ЗСБ формировался под влиянием таких нестандартных факторов, как континентальный рифтогенез в поздней перми-раннем триасе, интрузивно-гидротермальная активность в юре, термическая активизация литосферы в раннем мелу и неогене, гидротермальная активность и резкие колебания климата в плиоцен-четвертичный период.

Численная реконструкция тепловой истории литосферы Колтогорско-Уренгойского грабена ЗСБ, полученная с учетом указанных факторов, используется для оценки истории реализации потенциала генерации УВ основных предполагаемых НГМ пород бассейна. Рис. 2а показывает часть этой реконструкции, относящуюся к эволюции термического режима осадочного чехла, включая температурную историю глубоких материнских свит бассейна. В соответствии с основной целью исследования настоящая статья вклю-

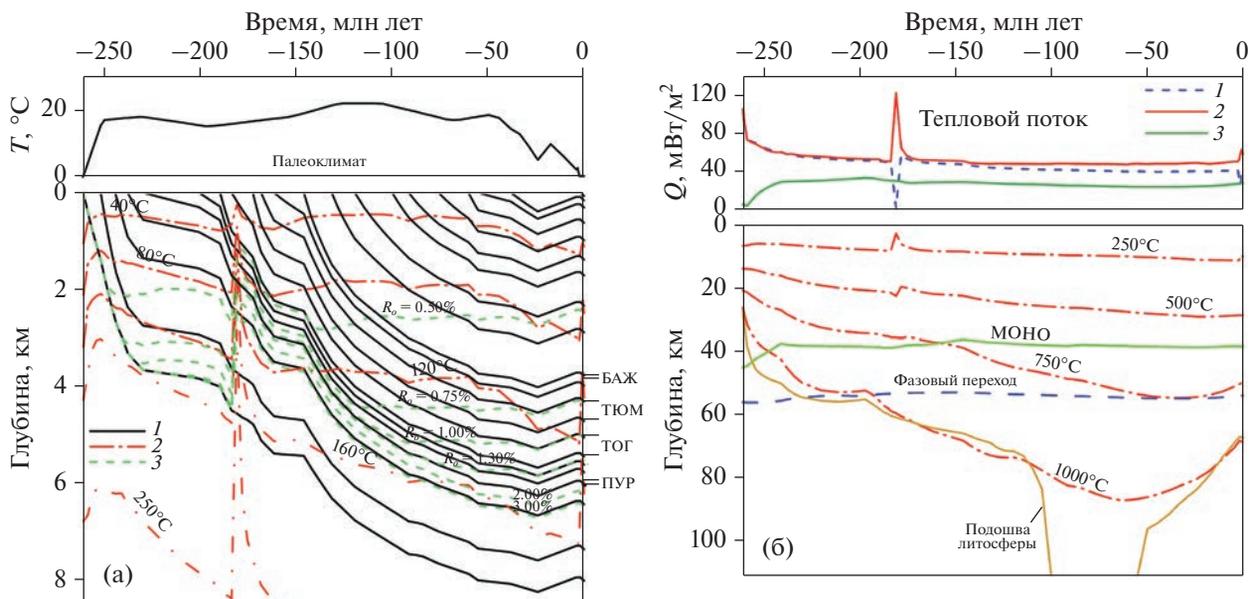


Рис. 2. Термическая история осадочной толщи (а) и литосферы (б) Западно-Сибирского бассейна в районе скв. СГ-6. а: 1 – основания осадочных слоев; 2 – изотермы; 3 – изолинии %Ro; б – на верхнем рис.: 1, 2 и 3 – тепловые потоки через поверхности осадков (1), фундамента (2) и верхней мантии (3, граница МОХО); на нижнем рис.: 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% H₂O (Wyllie, 1979).

чает несколько разделов. В первом из них дается описание методов численной оценки генерации УВ породами НГМ свит бассейна. В следующем разделе приведены численные оценки объемов генерации различных фракций УВ породами этих свит. В оценках предполагается, что кероген органического вещества (ОВ) НГМ пород бассейна представлен смесью стандартных керогенов типа II и III, процесс крекинга которых описывается кинетическими спектрами, представленными в ПРИЛОЖЕНИИ. Следовательно, в этом разделе рассматривается история генерации УВ с предполагаемыми кинетическими спектрами крекинга керогена и температурной историей глубоких материнских свит, показанной на рис. 2а. В последующем разделе обсуждаются основные события, оказавшие влияние на историю генерации УВ в бассейне. Раздел “ЗАКЛЮЧЕНИЕ” содержит основные выводы по рассчитанному фракционному составу генерируемых УВ и времени их генерации.

МЕТОДЫ ЧИСЛЕННОЙ ОЦЕНКИ ИСТОРИИ ГЕНЕРАЦИИ УВ ПОРОДАМИ МАТЕРИНСКИХ СВИТ

Численная реконструкция термической истории литосферы Колтогор-Уренгойского грабена ЗСБ в районе скв. СГ-6, представленная на рис. 2а и 2б осуществлялась с помощью пакета программ моделирования “плоских” бассейнов ГАЛО (Галушкин, 2007; Galushkin, 2016) и вспо-

могательного программного пакета ICE2020 (Galushkin, 2023), позволявшего рассчитывать термический режим и зрелость ОВ бассейна в условиях резких колебаний климата с неоднократным формированием и деградацией зон многолетне-мерзлых пород. Использование этих программ позволило построить термическую модель развития бассейна с учетом ряда нестандартных факторов, таких как: интрузивно-гидротермальная активность в ранней юре, ответственная за аномально высокий рост зрелости ОВ пород юры и триаса, тектоническое растрескивание пород нижних ярусов осадочного покрова и верхней части фундамента, ответственное за высокие градиенты температур в этой части разреза, и резкие колебания климата в плиоцене-четвертичном периоде. Указанные факторы не рассматривались в предыдущих реконструкциях термической эволюции осадочной толщи скв. СГ-6 (Конторович и др., 2013; Добрецов и др., 2013), полученных в рамках традиционной системы моделирования бассейнов TEMIS с заданием теплового потока в основании осадочной толщи.

Исходными данными для реконструкции, представленной на рис. 2, служили геологическая история развития исследуемого района (Конторович и др., 1975; Конторович и др., 2013), современный осадочный разрез бассейна и литологический состав его пород (табл. 1), значения температур и ОСВ, измеренные в современном разрезе бассейна (рис. 3а, 3б), а также геофизиче-

Таблица 1. Основные стадии эволюции ЗСБ в районе скв. Тюменская СГ-6

N	KG	t ₁	t ₂	Z	литология					
					км	гл	вул	алев	песч	изв
1	1	260.0	251.0	8.000	0.100	0.800	0.000	0.100	0.000	0.000
2	1	251.0	243.0	7.350	0.100	0.600	0.000	0.300	0.000	0.000
3	1	243.0	237.0	6.424	0.400	0.000	0.400	0.200	0.000	0.000
4	1	237.0	229.0	6.011	0.400	0.000	0.300	0.300	0.000	0.000
5	1	229.0	200.0	5.765	0.160	0.000	0.100	0.700	0.040	0.000
6	1	200.0	189.0	5.607	0.100	0.000	0.100	0.800	0.000	0.000
7	1	189.0	183.0	5.440	0.320	0.000	0.320	0.360	0.000	0.000
8	1	183.0	172.0	5.050	0.320	0.000	0.320	0.360	0.000	0.000
9	1	172.0	167.7	4.711	0.130	0.000	0.250	0.600	0.000	0.020
10	1	167.7	161.0	4.305	0.130	0.000	0.250	0.600	0.000	0.020
11	1	161.0	145.5	3.980	0.550	0.000	0.250	0.170	0.030	0.000
12	1	145.5	131.0	3.780	0.600	0.000	0.200	0.200	0.000	0.000
13	1	131.0	119.0	2.880	0.500	0.000	0.300	0.200	0.000	0.000
14	1	119.0	99.6	2.325	0.600	0.000	0.200	0.200	0.000	0.000
15	1	99.6	91.0	1.707	0.300	0.000	0.400	0.300	0.000	0.000
16	1	91.0	75.5	1.380	0.900	0.000	0.050	0.050	0.000	0.000
17	1	75.5	60.0	0.982	0.600	0.000	0.000	0.000	0.400	0.000
18	1	60.0	55.0	0.623	0.150	0.000	0.000	0.850	0.000	0.000
19	1	55.0	38.0	0.308	0.500	0.000	0.000	0.500	0.000	0.000
20	1	38.0	24.0	0.158	0.300	0.000	0.000	0.700	0.000	0.000
21	4	24.0	4.0	0.300	—	—	—	—	—	—
22	2	4.0	1.8	—	—	—	—	—	—	—
23	1	1.8	0.0	0.070	0.500	0.000	0.000	0.500	0.000	0.000

Примечания: N номер стадии развития бассейна; KG: тип стадии (1 – отложение осадков, 2 – перерыв, 4 – эрозия). t₁ и t₂ – время начала и конца стадии в млн лет, Z глубина основания осадочного слоя в современном разрезе бассейна при KG = 1 или амплитуда эрозии при KG = 4. Литология – литологический состав пород: гл – глины и аргиллиты, вул – вулканиты, алев – алевролиты, песч – песчаники, изв – известняки, ОВ – органика.

ские данные по строению фундамента и составу его пород (Кравченко, 2012; Melnik et al., 2015). Принципы моделирования термической истории осадочных бассейнов в системе ГАЛО подробно описаны в (Галушкин, 2007; Galushkin, 2016). Как и в других системах моделирования, система ГАЛО учитывает отложение пористых осадков с переменной скоростью, их уплотнение; эрозию, зависимость температурных и физических характеристик пород от их литологического состава, глубины погружения и температуры; рассматривает изменение теплопроводности матрицы пород и поровых вод от температуры (Галушкин, 2007). В расчетах теплофизических характеристик осадочных пород используются среднемировые теплофизические параметры соответствующих литологических единиц (Галушкин, 2007; Galushkin, 2016). Соответствующие расчеты для смесей пород, указанных в табл. 1, проводились согласно алгоритмам, подробно описанным в цитированных работах. Исключение составляли вулканиты, алевролиты и песчаники, формировавшие осадочные породы первых 9 стадий развития бассейна в табл. 1. Для пород перми, триаса, ниж-

ней и средней юры использовались нестандартные параметры уплотнения, чтобы объяснить их аномально высокую пористость, наблюдаемую на глубинах 6–8 км. При решении уравнения теплопроводности на верхней границе области счета задавались среднегодовые температуры на поверхности (см. кривую палеоклимат на рис. 2а) и постоянная температура T_m = 1150°C поддерживалась на нижней границе области счета, Z_m. Эта граница в процессе счета углублялась от начального значения 112 км на толщину осадочного чехла. Принципы расчета параметров Z_m и T_m в системе ГАЛО обсуждаются в (Галушкин, 2007; Galushkin, 2016). Применение пакетов программ ГАЛО и ICE2020 позволило реконструировать термическую историю осадочной толщи бассейна с учетом указанных выше нестандартных факторов (рис. 2). Существенно, что эта история согласуется с вариациями тектонического погружения бассейна (рис. 4), с наблюдаемым разрезом бассейна (рис. 2; табл. 1) и со значениями температур и ОСВ, измеренными в современном осадочном разрезе ЗСБ в районе скв. СГ-6 (кривые 1 на рис. 3а, 3б).

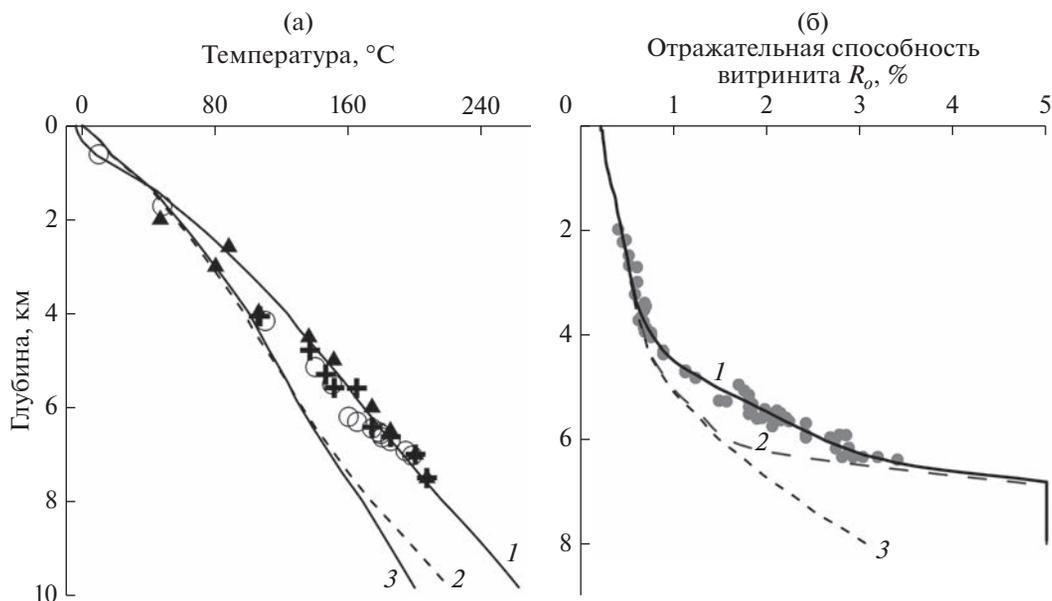


Рис. 3. Распределение температуры (а) и ОСВ (б) с глубиной в современном разрезе ЗСБ в районе скв. СГ-6. Кривые 1 – значения, рассчитанные с учетом внедрения силла в ранней юре, разуплотнения пород нижних горизонтов осадочного покрова и кровли фундамента, гидротермальной активности в позднем плиоцене-раннем плейстоцене и резких колебаний климата в плиоцен-четвертичное время. Кривая 2 на рис. а – расчеты без эффекта разуплотнения. Кривая 2 на рис. б – расчеты без теплового эффекта гидротермальной активности. Кривая 3 на рис. а – распределение температур, вычисленное без эффекта разуплотнения пород, без гидротермальной активности и без учета резких вариаций климата в плиоцен-четвертичное время. Кривая 3 на рис. б – распределение ОСВ, вычисленное без учета теплового эффекта от внедрения силла в ранней юре и гидротермальной активности в позднем плиоцене-раннем плейстоцене. Символы – значения температур и ОСВ, измеренные в современном разрезе скв. СГ-6 и опубликованные в работах (Фомин и др., 2001; Беляева, 2005; Белоконь-Карасева и др., 2006; Мясникова, Оксенойд, 2012; Кравченко, 2012; Богоявленский и др., 2013).

Термическая история осадочной толщи и литосферы ЗСБ в районе скв. СГ-6, представленная на рис. 2а, 2б, включала еще ряд событий, помимо отмеченных выше, оказавших заметное влияние на историю созревания ОБ и реализацию УВ потенциала бассейна. К таким событиям относятся интенсивное остывание и растяжение литосферы в начальный рифтогенный этап развития бассейна и две тепловых активизации литосферы, одна из которых замедляла остывание бассейна в позднем триасе, а вторая объясняла 300 метровую эрозию осадочного чехла в неогене (рис. 2а). Продолжительность и амплитуда указанных событий оценивались из анализа временных вариаций амплитуд тектонического погружения бассейна (рис. 4; Galushkin, 2016). Помимо этого в модели рассматривались также два кратковременных тепловых импульса, один из которых был связан с внедрением силла в ранней юре, а другой – с гидротермальной активностью в позднем плиоцене-раннем плейстоцене. Оба этих импульса не имели влияния на кривую тектонического погружения бассейна, но они объясняли характерные изменения ОСВ с глубиной в современном разрезе бассейна. Продолжительность и амплитуда этих импульсов оценивались из условия близости рас-

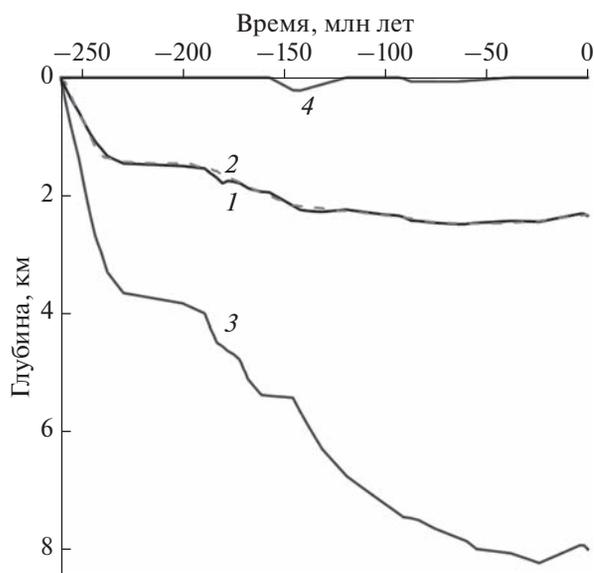


Рис. 4. Вариации в тектоническом погружении бассейна в районе скв. СГ-6. 1 (сплошная линия) – тектоническое погружение поверхности фундамента, вычисленное путем удаления нагрузки воды и осадков с поверхности фундамента; 2 – тектоническое погружение поверхности фундамента, вычисленное путем учета вариаций в распределении плотности пород фундамента с глубиной; 3 – изменение мощности осадочного чехла; 4 – палеоглубина моря.

считанного распределения ОСВ их измеренным значениям (рис. 3б).

Существенно, что в модели термической истории бассейна на рис. 2 значения ОСВ вычислялись с использованием нового модифицированного спектра созревания витринита EASY%RoDL из работ (Burnham, 2017; Burnham et al., 2017). Предыдущий спектр EASY%Ro (Sweeney, Burnham, 1990) долгое время широко использовался для оценки степени созревания ОБ, но недавние исследования показали, что этот алгоритм может завышать значения %Ro на 0.1–0.15% в пределах “окна” генерации нефти при моделировании нефтеносных бассейнов. Поэтому, в работе (Nielsen et al., 2015) была предложена скорректированная кинетическая модель созревания витринита BASIN%Ro. Она лучше соответствовала данным, наблюдаемым в нефтегазонасных бассейнах мира, но плохо описывала результаты экспериментальных исследований преобразования витринита. В 2017 г. был предложен новый кинетический спектр созревания витринита EASY%RoDL, который хорошо описывал как геологические, так и экспериментальные данные (Burnham, 2017). Энергии активации в этом спектре смещены в сторону более высоких значений по сравнению с моделью EASY%Ro, а частотный фактор реакций увеличен до значения 2×10^{14} 1/с, вместо 1×10^{13} 1/с в прежней модели. Как результат, новый спектр демонстрирует более медленное созревание витринита в пределах “нефтяного окна”, чем в модели EASY%Ro.

Расчет генерации УВ породами материнских свит, рассматриваемый в следующем разделе, проводится с использованием программного пакета SED3-35, являющегося частью системы моделирования бассейнов ГАЛО. Пакет SED3-35 позволяет рассчитывать генерацию отдельных фракций УВ в 3-х (нефть, газ, кокс), 4-х ((тяжелая и легкая нефть, газ и кокс) и 5-ти (тяжелая и легкая нефть, жирный и сухой газ и кокс) компонентных системах, если известны температурная история свиты и кинетический спектр генерации УВ. Помимо температурной истории материнских свит, представленной на рис. 2а, для расчета генерации различных фракций УВ требуются кинетические спектры керогенов, т.е. параметры реакций, управляющих процессами созревания керогенов (энергии активации E_i , частотные факторы A_i и исходные потенциалы реакций X_{i0}). В наших расчетах керогены ОБ материнских пород изучаемого района представлялись смесью стандартного керогена типа II (исходный потенциал $HI = 377$ или 611 мг УВ/г $C_{орг}$) и стандартного керогена типа III (исходный потенциал $HI = 160$ мг УВ/г $C_{орг}$) (см. следующий раздел). Следовательно, предполагалось, что доля первого керогена в смеси, равная, скажем, β , преобразовывалась по спектру

стандартного керогена типа II, а второго с долей в смеси $(1 - \beta)$ преобразуется по спектру стандартного керогена типа III. При этом исходный потенциал генерации УВ породами рассматриваемой материнской свиты, HI , связан с исходными потенциалами HI_1 и HI_2 керогенов смеси соотношением: $HI = [\beta \times HI_1 + (1 - \beta) \times HI_2]$. В наших расчетах использовались 4-х компонентные кинетические спектры генерации УВ (тяжелая и легкая нефть, газ и кокс) для стандартных керогенов типа II и III, разработанные во Французском институте нефти (см. Приложение). 4-х компонентные спектры генерации УВ отличаются более детальным описанием процессов вторичного крекинга УВ по сравнению со стандартными 3-х и 5-ти компонентными. Выбор кинетических спектров для описания крекинга керогена материнских пород является неоднозначной задачей, поэтому история генерации УВ, рассматриваемая в данной статье, представляет лишь один из вероятных вариантов истории реализации нефтегазоматеринского потенциала бассейна. Основой выбранного варианта служат предполагаемые конкретные кинетические спектры крекинга керогенов и конкретная температурная история погружающихся материнских свит бассейна (рис. 2а).

ИСТОРИЯ РЕАЛИЗАЦИИ ГЕНЕРАЦИОННОГО ПОТЕНЦИАЛА ОСНОВНЫХ НЕФТЕГАЗОМАТЕРИНСКИХ СВИТ БАСЕЙНА

Нефтегазоматеринские породы зафиксированы в широком интервале глубин осадочного разреза Колтогор-Уренгойского грабена в районе сверхглубоких скважин СГ-6 и СГ-7. В триас-ранне-среднеюрских отложениях доминируют породы с повышенным газовым генерационным потенциалом. От баженовской свиты до юрских и триасовых осадочных отложений и далее в базальтовых толщах зафиксирована периодическая, пульсационная обогащенность отложений УВ-газами. В этих районах впервые для севера Западной Сибири по результатам испытаний в условиях высоких температур и аномальных давлений получены притоки газа с глубины более 5 и даже 6 км (Белоконь-Карасева и др., 2006). Представляет интерес численно оценить степень реализации потенциала генерации УВ основными нефтегазоматеринскими свитами (НГМС) в нашей модели термической эволюции бассейна. Для решения этой задачи необходимо, во-первых, знать историю изменения температуры в процессе погружения материнских свит и, во-вторых, знать кинетический спектр керогена материнских пород, то есть параметры кинетических реакций, описывающих процессы первичного и вторичного крекинга керогена. Численная реконструкция термической истории бассейна представлена на рис. 2. Кинетические спектры ге-

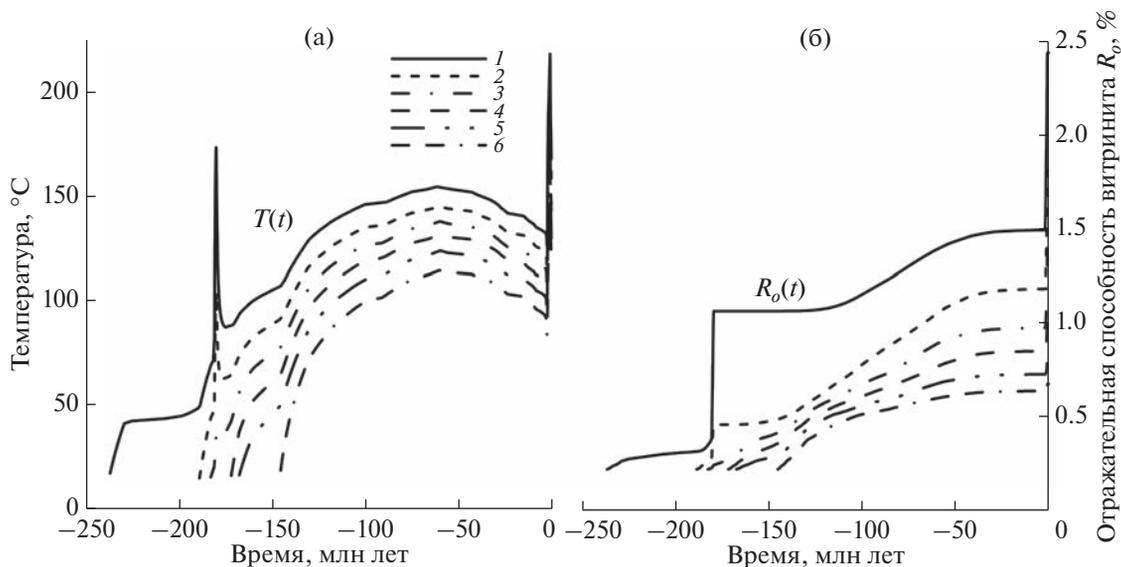


Рис. 5. Изменение температуры (а) и ОСВ (б) в истории погружения подошвы и кровли пурской (1), тогурской (2, 3), тюменской (4, 5) и баженовской (6) свит осадочного разреза скв. СГ-6.

нерации УВ для керогена материнских пород строились на основании известных 4-х компонентных спектров для генерации УВ керогенами I-ого, II-ого и III-его типов, опубликованных в базах данных пакетов MATOIL, TEMISPACK и других. При этом доли спектров подбираются так, чтобы состав смеси керогенов и ее полный исходный потенциал не противоречили оценкам типа керогена и значениям его исходного потенциала, приведенным в литературе для рассматриваемой материнской породы.

Пурская свита. Она представлена толщей аргиллитов, глинистых алевролитов и глинистых песчаников среднего триаса на глубине от 6012 до 6191 м. В ней доминирует гумусовое ОВ со средним содержанием $C_{орг} = 1.75\%$ (Белоконь-Карасева и др., 2006). Генерация УВ породами пурской свиты описывается в нашей модели стандартным четырехкомпонентным кинетическим спектром генерации УВ керогеном типа III с исходным потенциалом $HI = 160$ мг УВ/г $C_{орг}$. Температурная история этой свиты и изменение зрелости ее ОВ показаны на рис. 5а, 5б кривыми 1. Можно видеть, что внедрение силла 181 млн лет назад в приповерхностные слои фундамента привело к повышению температуры пород пурской свиты до 174°C (рис. 5а) и скачкообразному увеличению степени созревания ОВ от значений ОСВ $R_o = 0.37$ до 1.07% (рис. 5б). Соответственно, реализация потенциала генерации УВ выросла от низких значений менее 0.1 мг УВ/г $C_{орг}$ до внедрения силла до 74 мг УВ/г $C_{орг}$ после его внедрения. При прохождении тепловой волны, вызванной внедрением силла в приповерхностные слои фундамента, концентрация тяжелой нефти сначала

увеличилась до 21.5 мг УВ/г $C_{орг}$, а затем при высоких температурах под влиянием реакций вторичного крекинга уменьшилась до 4.5 мг УВ/г $C_{орг}$ (кривая 2 на рис. 6а). В то же время генерация легкой нефти и газа под влиянием той же тепловой волны достигла 29.5 и 21.5 мг УВ/г $C_{орг}$, соответственно (кривые 3 и 4 на рис. 6а). При дальнейшем погружении свиты (рис. 2) степень созревания ее ОВ плавно возрастала до $R_o = 1.5\%$, и вместе с ней росла и реализация потенциала генерации УВ (кривые 1 на рис. 5б и 6а).

Новые резкие изменения зрелости ОВ и генерации УВ в тепловой истории рис. 2 должны были наблюдаться в период гидротермальной активности бассейна в позднем плиоцене-раннем плейстоцене. Тепловое влияние гидротермальной активности, охватывающей в период с 2.2 по 0.7 млн лет назад три нижних осадочных слоя (перми, раннего и среднего триаса), позволяло совместить рассчитанные значения ОСВ со значениями, измеренными в слоях позднего триаса и юры (сравни кривые 1 и 2 на рис. 4б). Гидротермальный теплоперенос в нижних слоях осадочного покрова привел к повышению температуры пород пурской свиты до 220°C (рис. 5б) и увеличил степень созревания ОВ до $R_o = 2.44\%$ (рис. 5б). Соответственно, реализация потенциала генерации УВ выросла до 134 мг УВ/г $C_{орг}$. При этом тяжелая нефть почти полностью разложилась в результате вторичного крекинга (кривая 2 на рис. 6а). Генерация легкой нефти, достигнув максимума около 38.3 мг УВ/г $C_{орг}$ в эоцене, почти не менялась до начала плейстоцена (кривая 3 на рис. 6а). Примерно 1.6 млн лет назад тепловой импульс от гидротермальной активности в нижних слоях осадочного

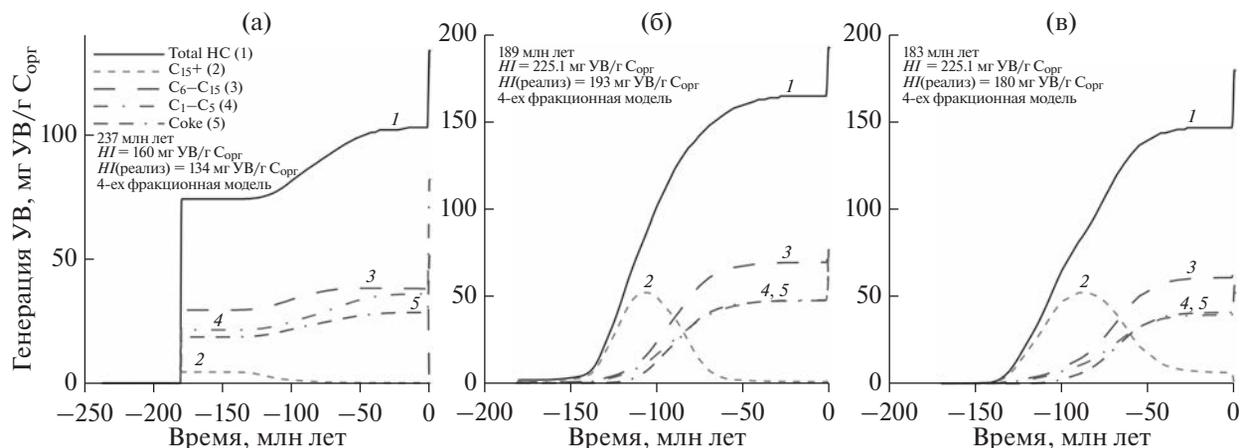


Рис. 6. Генерация различных фракций УВ в истории погружения пурской свиты (а) и пород в подошве (б) и кровле (в) тогурской свиты.

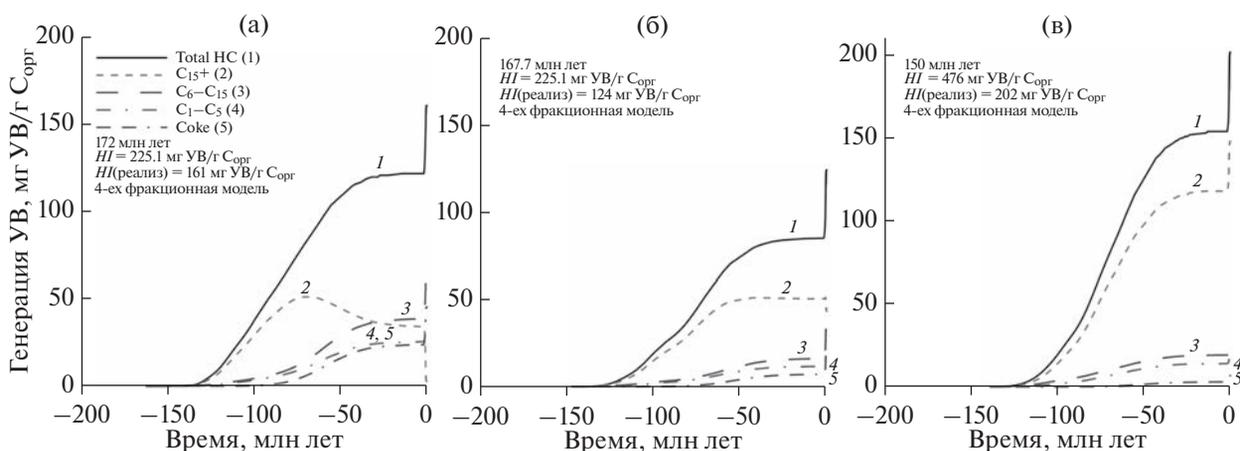


Рис. 7. Генерация различных фракций УВ в истории погружения пород в подошве (а) и кровле (б) тюменской свиты и баженовской свиты (в).

покрова достиг пурской свиты и начался резкий рост активности высокотемпературных реакций вторичного крекинга, вызвавший сокращение концентрации легкой нефти до современного значения около 0.88 мг УВ/г $C_{орг}$ (кривая 3 на рис. 6а). Концентрация газовых УВ за тот же период времени увеличилась от 40 до 82 мг УВ/г $C_{орг}$ (кривая 4 на рис. 6а). Хотя значения $C_{орг}$ не влияют на результаты наших расчетов выхода различных фракций УВ на рис. 6 и 7, однако интересно оценить, насколько различаются значения исходного и современного $C_{орг}$ для реконструированной нами термической истории материнской породы и предполагаемого кинетического спектра созревания керогена. Для этого воспользуемся алгоритмом, описанным, например, в работе (Галушкин, Котик, 2023). Оценки показывают, что при среднем содержании $C_{орг} = 1.75\%$ для пород пурской свиты (Белоконь-Карасева и др., 2006) исходное содержание ОВ составляет 2.02%. При относительно низком исходном потенциале генерации

УВ такого содержания ОВ в породах свиты было недостаточно для заполнения 20% порового пространства жидкими УВ, а значит, и для достижения порога эмиграции жидких УВ по критерию, предложенному в (Espitalie et al., 1988). Что касается газовых УВ, то их миграция из матрицы материнских пород вполне вероятна.

Тогурская свита. Тогурская НГМС представлена аргиллитами и глинистыми алевролитами ранней юры на глубинах от 5048 до 5425 м. В породах этой свиты доминирует гумусовое ОВ со средним содержанием $C_{орг} = 1.09\%$, хотя в отдельных пропластах оно может повышаться до 7.1% (Белоконь-Карасева и др., 2006). В наших расчетах ОВ пород тогурской свиты представлялось смесью 30% стандартного керогена типа II с исходным потенциалом $HI = 377$ мг УВ/г $C_{орг}$ и 70% стандартного керогена типа III, так что полный исходный потенциал смеси $HI = 225.1$ мг УВ/г $C_{орг}$. Кинетический спектр, описывающий процесс генерации УВ этой смеси керогенов, определялся как сумма

стандартных четырехкомпонентных спектров соответствующих типов керогенов в указанных выше долях. Температурная история пород в основании и кровле этой свиты, а также изменение зрелости их ОВ, представлены кривыми 2 и 3 на рис. 5а и 5б. Внедрение силла 181 млн лет назад в приповерхностные слои фундамента привело к повышению температуры пород в основании тогурской свиты до 105°C (кривая 2 на рис. 5а) и увеличению степени созревания ОВ до значения ОСВ $R_o = 0.46\%$, близкого к началу формального окна генерации нефти (кривая 2 на рис. 5б). То же событие практически не отразилось на температурной ($T(t)$) и катагенерической ($R_o(t)$) истории пород в кровле тогурской свиты (кривые 3 на рис. 5а и 5б). Внедрение силла 181 млн лет назад не нашло отражение и в истории генерации УВ породами свиты (рис. 6б, 6в). Расчеты показывают, что генерация тяжелой нефти в породах основания свиты достигла максимума в альбе и на 20 млн лет позже в породах кровли свиты (кривые 2 на рис. 6б, 6в). Погружение свиты в позднем мелу сопровождалось деградацией тяжелой нефти в результате ее вторичного крекинга при непрерывном росте генерации легкой нефти и газа (кривые 2–4 на рис. 6б, 6в). При низком среднем содержании ОВ в породах тогурской свиты генерация ими жидких УВ была не достаточна для заполнения 20% порового пространства жидкими УВ, поэтому порог первичной эмиграции жидких УВ по критерию (Espitalie et al., 1988) здесь не достигался. Поэтому основной объем фракции тяжелой нефти жидких УВ, генерированный в породах свиты, оставался в матрице пород. Согласно расчетам он полностью деградировал к настоящему времени, и концентрация тяжелой нефти в современных породах подошвы и кровли свиты составляла 0.00765 и 0.165 мг УВ/г $C_{орг}$, соответственно (кривые 2 на рис. 6б, 6в).

Гидротермальный теплоперенос в нижних слоях осадочного покрова в позднем плиоцене-раннем плейстоцене вызвал повышение температуры в породах основания и кровли тогурской свиты до 200 и 185°C и увеличение степени созревания ОВ до 1.80 и 1.40% ($\%R_o$), соответственно (рис. 5а и 5б). Реализация потенциала генерации УВ выросла при этом до значений 193 и 180 мг УВ/г $C_{орг}$ (кривые 1 на рис. 6б, 6в). Тяжелая нефть, как отмечалось выше, почти полностью разложилась. Генерация легкой нефти достигла максимума около 72 мг УВ/г $C_{орг}$, причем в подошве свиты это событие имело место около 1.25 млн лет назад, а в ее кровле — около 0.75 млн лет назад. Затем эта нефть частично деградировала из-за реакций вторичного крекинга и в настоящее время ее концентрация по расчетам составляет 51.9 и 71.4 мг УВ/г $C_{орг}$ (кривые 3 на рис. 6б, 6в). Концентрация газовых УВ увеличилась за время гидротермальной активности в

позднем плиоцене-раннем плейстоцене от 47.7 до 77.5 мг УВ/г $C_{орг}$ в породах подошвы и от 39.4 до 56.3 мг УВ/г $C_{орг}$ в породах кровли свиты (кривые 4 на рис. 6б, 6в). Заканчивая рассмотрение тогурской свиты отметим, что при среднем содержании $C_{орг} = 1.09\%$ (Белоконь-Карасева и др., 2006) исходное содержание ОВ по оценкам должно было составлять 1.36 и 1.34% для пород в основании и кровле свиты. Такие значения оказались не достаточными для достижения порога эмиграции жидких УВ, упомянутого выше.

Тюменская свита. Тюменская НГМС выполнена глинистыми породами средней юры на глубинах от 4305 до 4705 м. В породах свиты также доминирует гумусовое ОВ со средним содержанием $C_{орг} \approx 2.00\%$ (Белоконь-Карасева и др., 2006; Конторович и др., 2002). Состав ОВ пород тюменской свиты предполагался аналогичным составу ОВ тогурской свиты, то есть кероген представлялся смесью 30% стандартного керогена типа II с исходным потенциалом $HI = 377$ мг УВ/г $C_{орг}$ и 70% стандартного керогена типа III, так что полный исходный потенциал смеси $HI = 225.1$ мг УВ/г $C_{орг}$. Температурная история пород в основании и кровле тюменской свиты вместе с изменением зрелости их ОВ показаны кривыми 4 и 5 на рис. 5а, 5б.

Согласно расчетам температура пород в основании свиты достигала максимума около 132°C в среднем палеоцене, затем снижалась до 103°C около 2 млн лет назад, потом снова поднималась до 174°C около 700 тысяч лет назад под влиянием гидротермальной активности в позднем плиоцене-раннем плейстоцене и опустилась до 138°C в настоящее время (кривая 4 на рис. 5а). ОСВ для пород основания свиты возрастала до 0.853% около 2 млн лет назад и затем до значения 1.11% в настоящее время (кривая 4 на рис. 5б). Соответственно, реализация УВ потенциала после постепенного роста до 122 мг УВ/г $C_{орг}$ около 2 млн лет назад резко увеличилась до 161 мг УВ/г $C_{орг}$ к настоящему времени (кривая 1 на рис. 7а). Расчеты показывают, что генерация тяжелой нефти в породах основания свиты достигла максимума в 51 мг УВ/г $C_{орг}$ в маастрихте, затем уменьшалась до 34 мг УВ/г $C_{орг}$ около 2 млн лет назад и деградировала до 2.8 мг УВ/г $C_{орг}$ в настоящее время из-за активности реакций вторичного крекинга (кривая 2 на рис. 7а). Концентрация легкой нефти постепенно росла до 39 мг УВ/г $C_{орг}$ около 2 млн лет назад и затем быстро увеличилась до 67.5 мг УВ/г $C_{орг}$ к настоящему времени (кривая 3 на рис. 7а). Последнее увеличение обязано как реакциям первичного крекинга керогена, так и вторичному крекингу тяжелой нефти при высоких температурах во время гидротермальной активности в позднем плиоцене-раннем плейстоцене. Генерация газообразных УВ постепенно

росла до 25.5 мг УВ/г $C_{орг}$ около 2 млн лет назад и скачком увеличилась до 45.3 мг УВ/г $C_{орг}$ к настоящему времени (кривая 4 на рис. 7а).

Для пород кровли тюменской свиты характерна менее напряженная история изменения температуры пород и зрелости их ОВ. По мере погружения породы температура росла до 125°C в среднем палеоцене, затем плавно снижалась до 94°C около 2 млн лет назад, резко увеличилась до 159°C около 660 тысяч лет назад под влиянием гидротермальной активности в позднем плиоцене-раннем плейстоцене и опустилась до 129°C в настоящее время (кривая 5 на рис. 5а). Степень созревания ОВ пород кровли свиты постепенно росла до 0.73% около 2 млн лет назад, а затем быстро увеличилась до 0.86% в настоящее время (кривая 5 на рис. 5б). Соответственно, реализация УВ потенциала после постепенного роста до 85 мг УВ/г $C_{орг}$ около 2 млн лет назад резко возросла до 124 мг УВ/г $C_{орг}$ к настоящему времени (кривая 1 на рис. 7б). Генерация тяжелой нефти в породах кровли тюменской свиты постепенно увеличивалась до 50 мг УВ/г $C_{орг}$ до палеоцена и почти не менялась до плейстоцена. Во время гидротермальной активности около 900 тысяч лет назад она достигла максимума (51.2 мг УВ/г $C_{орг}$) и частично деградировала до 43.2 мг УВ/г $C_{орг}$ в настоящее время из-за активности реакций вторичного крекинга (кривая 2 на рис. 7б). Генерация легкой нефти постепенно росла до 16.1 мг УВ/г $C_{орг}$ около 2 млн лет назад и затем скачком увеличилась до 35.8 мг УВ/г $C_{орг}$ к настоящему времени (кривая 3 на рис. 7б). Генерация газообразных УВ плавно увеличивалась до 11.5 мг УВ/г $C_{орг}$ около 2 млн лет назад и затем скачком росла до 24 мг УВ/г $C_{орг}$ к настоящему времени (кривая 4 на рис. 7б).

При среднем содержании $C_{орг} = 2\%$ в породах тогурской свиты (Белоконь-Карасева и др., 2006) исходное содержание ОВ по оценкам должно было составлять 2.38 и 2.28% для пород в основании и кровле свиты. Как и для тогурской свиты, такие значения исходного $C_{орг}$ оказались не достаточными для достижения порога первичной эмиграции жидких УВ из матрицы пород тюменской свиты по критерию (Espitalie et al., 1988), и генерированные жидкие УВ должны бы остаться в пределах матрицы материнских пород.

Баженовская свита – самая известная из НГМС юры. В скв. Тюменская СГ-6 она представлена преимущественно аргиллитами позднечуковского возраста на глубинах от 3782 до 3844 м (рис. 2). Породы содержат в основном аквагенный тип ОВ. Его содержание ($C_{орг}$) колеблется от 1.68 до 9.83%. Относительно высокие значения водородного индекса HI ($HI = 200–590$ мг УВ/г $C_{орг}$) свидетельствуют о сохранении высокого нефтегенерационного потенциала отложений, что харак-

терно как для изучаемой площади, так и почти для всей территории Западной Сибири (Богоявленский и др., 2013). ОВ пород баженовской свиты в наших расчетах представлено смесью 70% стандартного морского керогена типа II с исходным потенциалом $HI = 611$ мг УВ/г $C_{орг}$ и 30% стандартного керогена типа III, так что полный исходный потенциал смеси $HI = 476$ мг УВ/г $C_{орг}$. Как и выше, кинетический спектр, описывающий процесс генерации УВ такой смесью керогенов, определялся как сумма стандартных четырехкомпонентных спектров соответствующих типов керогенов со своими энергиями активации, своим частотным фактором и с исходными потенциалами реакций, нормированными на долю данного керогена в смеси. Кривые 6 на рис. 5а и 5б представляют численные реконструкции температурной и катагенической истории пород баженовской свиты в осадочном разрезе скв. Тюменская СГ-6. Согласно рис. 5а температура пород в процессе погружения баженовской свиты постепенно увеличивается до 115°C в палеоцене, затем плавно снижается до 84°C около 2 млн лет назад, снова растет до 142°C около 760 тысяч лет назад под влиянием гидротермальной активности в позднем плиоцене-раннем плейстоцене и опускается до 117°C в настоящее время (кривая 6 на рис. 5а). Степень преобразования ОВ пород свиты постепенно растет до 0.64% около 2 млн лет назад и потом скачком до 0.68% в настоящее время (кривая 6 на рис. 5б). Реализация УВ потенциала после постепенного роста до 154 мг УВ/г $C_{орг}$ около 2 млн лет назад быстро увеличивается до 202 мг УВ/г $C_{орг}$ к настоящему времени (кривая 1 на рис. 7в). Генерация тяжелой нефти в породах баженовской свиты постепенно росла до 118 мг УВ/г $C_{орг}$ до плейстоцена и достигла максимума (148 мг УВ/г $C_{орг}$) в настоящее время (кривая 2 на рис. 7в). Генерация легкой нефти также постепенно увеличивалась до 19.1 мг УВ/г $C_{орг}$ около 2 млн лет назад и затем скачком до 27.2 мг УВ/г $C_{орг}$ к настоящему времени (кривая 3 на рис. 7в). И, наконец, генерация газообразных УВ плавно растет, достигая значения 14 мг УВ/г $C_{орг}$ около 2 млн лет назад, и скачком увеличивается до 20 мг УВ/г $C_{орг}$ к настоящему времени (кривая 4 на рис. 7в). Верхнеюрские аргиллиты баженовской свиты (интервал 3783–3844 м) содержат высокие концентрации ОВ (2.6–12.6%, в среднем 5.1%; Конторович и др., 2002). При среднем современном содержании $C_{орг} = 5.1\%$ в породах баженовской свиты исходное содержание ОВ по оценкам должно было составлять 6.39%. Относительно высокие значения $C_{орг}$ и исходного потенциала генерации УВ ($HI = 476$ мг УВ/г $C_{орг}$) были достаточны для достижения порога первичной миграции жидких УВ из матрицы пород баженовской свиты, определяемого по заполнению 20% порового пространства

жидкими УВ (Espitalie et al., 1988). Согласно расчетам этот порог достигается на границе мела и кайнозоя (около 65 млн лет назад), когда зрелость ОВ достигла значения 0.6% R_0 (кривая 6 на рис. 5б).

ОБСУЖДЕНИЕ

Термическая история литосферы Колтогорско-Уренгойского грабена в районе скв. СГ-6, представленная на рис. 2, использовалась в данной статье для расчета генерации УВ породами материнских свит бассейна. Эта история отличается от предшествующей реконструкции термической истории бассейна в (Галушкин и др., 1996) и от реконструкций, предложенных в работах (Конторович и др., 2013; Добрецов и др., 2013). Последние были получены в рамках традиционной системы моделирования бассейнов TEMIS с подбором теплового потока в основании осадочной толщи. Основное отличие модели термического развития бассейна, представленной на рис. 2, от предшествующих касается предположений о внедрении силла в приповерхностные слои фундамента в ранней юре и о гидротермальной активности в позднем плиоцене-раннем плейстоцене. Предположения основаны на детальном анализе изменения ОСВ в породах юры и триаса. Оба события оказали заметное влияние на историю реализации УВ потенциала НГМ пород триаса и юры. Так, внедрение силла в ранней юре привело к выходу пород пурской свиты из “окна генерации нефти” ($0.5 \lesssim R_0 \lesssim 1.30\%$), достижению ими высокой степени катагенеза (1.5%), и почти полной деградации генерированной тяжелой нефти (рис. 6а). Потенциал генерации УВ был реализован при этом почти наполовину (кривая 1 на рис. 6а) и генерированные УВ представлены легкой нефтью и газом (кривые 3 и 4 на рис. 6а).

Влияние теплового импульса от ранне-юрского силла почти не затронуло генерационную историю юрских отложений (кривые 2–6 на рис. 5б; рис. 6б, 6в и 7а, 7б, 7в), в то время как второй импульс тепла, который в нашей модели связан с гидротермальной активностью в нижних горизонтах осадочного покрова в течение позднего плиоцена-раннего плейстоцена, отразился на реализации УВ потенциала НГМ пород как триаса, так и юры (рис. 5, 6, 7). Для пурской свиты триаса он привел к скачкообразному увеличению реализации потенциала генерации УВ с 47 до 84%, деградации более 97% массы легкой нефти, генерированной в матрице пород свиты и удвоению генерированной массы газа (рис. 6а). Дополнительный перенос тепла гидротермами в раннем плиоцене-позднем плейстоцене привел к увеличению реализации потенциала генерации УВ на 17 и 24% в НГМ породах подошвы и кровли тогурской свиты, соответственно (кривые 1 на рис. 6б, 6в). При этом концентрация легкой нефти, достигнув мак-

симума около 72 мг УВ/г $C_{орг}$, сократилась на 39% в подошве и менее чем на 1% в кровле свиты (кривые 3 на рис. 6б, 6в). За то же время концентрация газовых УВ, генерируемых НГМ породами подошвы и кровли тогурской свиты, увеличилась на 62 и 43% соответственно.

В породах кровли и подошвы тюменской свиты эта гидротермальная активность увеличила реализацию УВ потенциала на 32 и 46% соответственно (кривые 1 на рис. 7а, 7б). При этом концентрация легкой нефти возросла почти в два раза (кривые 3 на рис. 7а, 7б) во многом за счет деградации тяжелой нефти. Последняя почти полностью деградировала в породах подошвы свиты и сократила свою массу почти на 20% в ее кровле (кривые 2 на рис. 7а, 7б). Концентрация газовых УВ, генерируемых породами подошвы и кровли тюменской свиты, увеличилась за то же время на 78 и 109%, соответственно (кривые 4 на рис. 7а, 7б).

В НГМ породах баженовской свиты тепловой импульс от гидротермальной активности в позднем плиоцене-раннем плейстоцене увеличил реализацию УВ потенциала на 31% (кривая 1 на рис. 7в), генерацию тяжелой нефти на 25% (кривая 2 на рис. 7в), генерацию легкой нефти на 42% (кривая 3 на рис. 7в) и генерацию газа на 43% (кривая 4 на рис. 7в).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для расчетов генерации УВ материнскими породами триаса и юры использована термическая модель развития ЗСБ в районе скв. СГ-6, основанная на анализе вариаций тектонического погружения бассейна и согласии вычисленного и наблюдаемого осадочного разреза бассейна, а также вычисленных и наблюдаемых значений температур и ОСВ. Модель предполагает, что внедрение силла в приповерхностные слои фундамента в ранней юре и гидротермальная активность в нижних горизонтах осадочного покрова в позднем плиоцене-раннем плейстоцене оказали заметное влияние на историю реализации потенциала генерации УВ этих пород. Тяжелая нефть, генерированная породами пурской, тогурской и нижних горизонтов тюменской свит, деградировала почти полностью в результате вторичного крекинга (рис. 6, 7а). В породах баженовской и кровли тюменской свит тяжелая нефть преобладает среди генерируемых фракций УВ (рис. 7б, 7в). Согласно расчетам, к настоящему времени легкая нефть, не покинувшая матрицы материнских пород, полностью деградировала в породах триаса (рис. 6а), составляет заметную долю продуктов генерации УВ в породах подошвы тогурской свиты (рис. 6б) и кровле тюменской (рис. 7б) и преобладает в породах кровли тогурской (рис. 6в) и основания тюменской (рис. 7а) свит. Газовые УВ составляют заметную часть продуктов генерации

Таблица 2. Кинетические параметры реакций четырехфракционного крекинга морского керогена типа II с исходным протенциалом 611 мг УВ/г $C_{орг}$ (Французский Институт Нефти, данные из ThemisSuite 2008, Menil-2002)

N	E_n , энергия активации, Ккал/моль	A_n , частотный фактор, c^{-1}	C14+	C6–C13	C1–C5	Кокс	HI_n
ПЕРВИЧНЫЙ КРЕКИНГ			Исходный потенциал реакций (мг УВ/г $C_{орг}$)				
1	46	1.6×10^{14}	0.70	0.60	0.10	0.0	1.40
2	48	1.6×10^{14}	6.45	3.08	1.09	0.0	10.63
3	50	1.6×10^{14}	53.74	7.92	5.43	0.0	67.09
4	52	1.6×10^{14}	156.63	14.04	14.04	0.0	184.71
5	54	1.6×10^{14}	249.81	19.94	15.10	0.0	284.85
6	56	1.6×10^{14}	7.43	7.31	14.16	0.0	28.90
7	58	1.6×10^{14}	1.39	0.40	8.17	0.0	9.96
8	60	1.6×10^{14}	0.00	0.00	9.78	0.0	9.78
9	62	1.6×10^{14}	0.00	0.00	7.39	0.0	7.39
10	64	1.6×10^{14}	0.00	0.00	5.07	0.0	5.07
11	66	1.6×10^{14}	0.00	0.00	1.22	0.0	1.22
ВТОРИЧНЫЙ КРЕКИНГ			Весовые коэффициенты реакций (%)				
Тип УВ	E_i	A_i	C_i , %	C(6–13)%	C(1–5)%	$C_{кокс}$, %	
C14+	47	4.60×10^{10}	24	41.63	23.09	35.28	
	51.6	1.90×10^{13}	26	41.63	23.09	35.28	
	65.1	3.85×10^{16}	50	41.63	23.09	35.28	
C6–C13	55.5	3.76×10^{12}	50	–	58.75	41.25	
	67.2	3.85×10^{16}	50	–	58.75	41.25	

N – номер реакции первичного крекинга керогена. HI_n – исходный потенциал интегральной генерации УВ. E_i – энергии активации реакций вторичного крекинга тяжелой (C14+) и легкой (C6–C13) нефти (Ккал/моль). A_i – частотный фактор реакций вторичного крекинга (1/с). C_i – доля i-той реакции в процессе вторичного крекинга (в %). C(6–13). C(1–5). $C_{кокс}$ – доля (в %) легкой нефти, конденсата + сухого газа и кокса в продукте вторичного крекинга керогена.

УВ в тогурской и тюменской свитах и доминируют в пурской свите.

При относительно низких значениях $C_{орг}$ и исходного потенциала генерации УВ генерации жидких УВ породами пурской, тогурской и тюменской свит было не достаточно для заполнения 20% порового пространства жидкими УВ, а значит, и для достижения порога эмиграции жидких УВ по критерию, предложенному в (Espitalie et al., 1988). Следовательно, вполне вероятно, что генерированные жидкие УВ не покидали матрицы этих пород и могли заметно деградировать в процессе вторичного крекинга. Что касается газовых УВ, то их миграция из матрицы материнских вполне вероятна. Для пород баженовской свиты с богатым исходным потенциалом генерации УВ и высоким $C_{орг}$ порог первичной миграции жидких УВ достигался, по оценкам, около 65 млн лет назад и генерированные УВ, мигрировавшие в сторону ловушек, могли принимать участие в формировании месторождений жидких УВ.

В заключении отметим еще раз, что реконструкция термической истории бассейна и выбор кинетических спектров для описания крекинга

керогена материнских пород являются сложными и неоднозначными задачами, которые будут уточняться по мере поступления новых данных. Поэтому история генерации УВ, представленная в данной статье и опирающаяся на предполагаемые кинетические спектры крекинга керогенов и температурную историю погружающихся материнских свит бассейна на рис. 2а, можно рассматривать лишь как один из вероятных вариантов истории реализации нефтегазоматеринского потенциала бассейна.

Автор искренне благодарен научному редактору журнала “Геохимия” В.С. Севостьянову и своим рецензентам, замечания которых способствовали заметному улучшению содержания статьи.

ПРИЛОЖЕНИЕ: КИНЕТИЧЕСКИЕ СПЕКТРЫ КРЕКИНГА КЕРОГЕНОВ

Как отмечалось, кинетический спектр крекинга керогена конкретной материнской свиты строился на основе 4-х компонентных спектров трех стандартных типов керогена, взятых из базы данных ThemisSuite 2008: морского керогена типа II с исход-

Таблица 3. Кинетические параметры реакций четырехфракционного крекинга континентального керогена типа III с исходным потенциалом 160 мг УВ/г $C_{орг}$ (Французский Институт Нефти; данные из ThemisSuite 2008; Mahakam III)

N	E_n , энергия активации, Ккал/моль	A_n , частотный фактор, c^{-1}	C14+	C6–C13	C1–C5	Кокс	HI_n
ПЕРВИЧНЫЙ КРЕКИНГ			Исходный потенциал реакций (мг УВ/г $C_{орг}$)				
1	50	3.0×10^{15}	1.28	0.00	0.16	0.0	1.44
2	52	3.0×10^{15}	2.51	0.31	0.38	0.0	3.20
3	54	3.0×10^{15}	5.96	1.13	1.07	0.0	8.16
4	56	3.0×10^{15}	25.31	2.00	2.93	0.0	30.24
5	58	3.0×10^{15}	30.91	5.94	5.55	0.0	42.40
6	60	3.0×10^{15}	15.59	3.86	7.75	0.0	27.20
7	62	3.0×10^{15}	5.00	2.64	6.28	0.0	13.92
8	64	3.0×10^{15}	1.59	1.06	10.95	0.0	13.60
9	66	3.0×10^{15}	0.30	0.52	11.66	0.0	12.48
10	68	3.0×10^{15}	0.00	0.00	4.00	0.0	4.00
11	70	3.0×10^{15}	0.00	0.00	3.04	0.0	3.04
12	72	3.0×10^{15}	0.00	0.00	0.32	0.0	0.32
ВТОРИЧНЫЙ КРЕКИНГ			Весовые коэффициенты реакций (%)				
Тип УВ	E_i	A_i	C_i , %	C(6–13)%	C(1–5)%	$C_{\text{кокс}}$, %	
C14+	47	4.60×10^{10}	24	41.63	23.09	35.28	
	51.6	1.90×10^{13}	26	41.63	23.09	35.28	
	65.1	3.85×10^{16}	50	41.63	23.09	35.28	
C6–C13	55.5	3.76×10^{12}	50	–	58.75	41.25	
	67.2	3.85×10^{16}	50	–	58.75	41.25	

N – номер реакции первичного крекинга керогена. HI_n – исходный потенциал интегральной генерации УВ. E_i – энергии активации реакций вторичного крекинга тяжелой (C14+) и легкой (C6–C13) нефти (Ккал/моль). A_i – частотный фактор реакций вторичного крекинга (1/с). C_i – доля i-той реакции в процессе вторичного крекинга (в %). C(6–13). C(1–5). $C_{\text{кокс}}$ – доля (в %) легкой нефти, конденсата + сухого газа и кокса в продукте вторичного крекинга керогена.

ным потенциалом генерации $HI = 611$ мг УВ/г $C_{орг}$ (Menil-2002), керогена типа II, но с более бедным исходным потенциалом $HI = 377$ мг УВ/г $C_{орг}$ и континентального керогена типа III с $HI = 160$ мг УВ/г $C_{орг}$ (Mahakam III). Кинетические спектры для крекинга этих типов керогенов в рамках 4-х фракционной модели разработаны во Французском Институте Нефти и применяются в широко распространенном пакете моделирования МАТОИ. Эти спектры приведены в табл. 2 и 3. Отметим, что параметры реакций вторичного крекинга тяжелой и легкой нефти одинаковы для II-ого и III-его типов керогена. 4-х фракционный кинетический спектр крекинга керогена типа II с бедным исходным потенциалом $HI = 377$ мг УВ/г ТОС был аналогичным спектру в табл. 2, но с нормировкой исходных потенциалов реакций первичного крекинга на суммарный потенциал 377 мг УВ/г $C_{орг}$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Белоконь-Карасева Т.В., Башкова С.Е., Беляева Г.Л., Ехлаков Ю.А., Горбачев В.И. (2006) Перспективы нефтегазоносности глубоководных отложений севера Западной Сибири по данным сверхглубокого бурения. <http://www.geolib.ru/OilGasGeo/2006/06/Stat/stat01.html>
- Беляева Г.Л. (2005) Закономерности изменения степени катагенеза ОВ пород больших глубин в связи с прогнозом нефтегазоносности (на примере глубоких и сверхглубоких скважин). Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук. Пермский государственный технический университет, Пермь, 2005.
- Богоявленский В.И., Полякова И.Д., Богоявленский И.В., Будагова Т.А. (2013) Перспективы нефтегазоносности больших глубин шельфа и суши Южно-Карского региона. *Георесурсы, геознергетика, геополитика*. 2(6), 1-21.

- Галушкин Ю.И., Симоненкова О.И., Лопатин Н.В. (1999) Влияние формирования гигантских скоплений газа на термический режим осадочной толщи Уренгойского месторождения Западно-Сибирского месторождения. *Геохимия*. (12), 1335-1344.
- Галушкин Ю.И. Моделирование осадочных бассейнов и оценка их нефтегазоносности. М.: Научный мир, 2007, 456 с.
- Галушкин Ю.И., Котик И.С. (2023) Оценка реализации углеводородного потенциала нефтегазоматеринских пород юго-западного борта Коротайхинской впадины, Тимано-Печорский бассейн. *Геохимия*. **68**(4), 395-408.
- Добрецов Н.Л., Полянский О.П., Ревердатто В.В., Бабичев А.В. (2013) Динамика нефтегазоносных бассейнов в Арктике и сопредельных территориях как отражение мантийных плюмов и рифтогенеза. *Геология и геофизика*. **54** (8), 1145-1161.
- Конторович А.Э., Нестеров И.И., Салманов Ф.К. и др. (1975) *Геология нефти и газа Западной Сибири*. М.: Недра, 250 с.
- Конторович А.Э., Данилова В.П., Фомин А.Н., Костырева Е.А., Борисова Л.С., Меленевский В.Н. (2002) Перспективы нефтегазоносности глубокозалегающих горизонтов севера Западной Сибири (Тюменская сверхглубокая скважина № 6) Известия Томского политехнического университета, *Геология и геохимия нефти и газа*. **303**(8), 45-48.
- Конторович А.Э., Бурштейн Л.М., Малышев Н.А. и др. (2013) Историко-геологическое моделирование процессов нефтидогенеза в мезозойско-кайнозойском осадочном бассейне Карского моря (бассейновое моделирование). *Геология и геофизика*. **54**(8), 1179-1226.
- Коробов А.Д., Коробова Л.А., 2011. Нефтегазоперспективный рифтогенно-осадочный формационный комплекс как отражение гидротермальных процессов в породах фундамента и чехла. *Геология нефти и газа*. (3), 15-24.
- Кравченко М.Н. (2012) Ресурсный потенциал углеводородов нижне-среднеюрских и доюрских глубокозалегающих горизонтов осадочного чехла северных районов Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции. Автореферат, Москва, МГУ им. М.В. Ломоносова, каф. геологии и геохимии горючих ископаемых.
- Мясникова Г.П., Оксенюк Е.Е. (2012) Некоторые геологические результаты сверхглубокого бурения в Западной Сибири. *Нефть и газ*. **3**, 13-19.
- Фомин А.Н., Конторович А.Э., Красавчиков В.О. (2001) Катагенез органического вещества и перспективы нефтегазоносности юрских, триасовых и палеозойских отложений северных районов Западно-Сибирского мегабассейна. *Геология и Геофизика*. **42**(11-12), 1875-1887.
- Burnham A.K. (2017). *Advances needed for kinetic models of vitrinite reflectance*. Technical Report, December 2017, Stanford University.
- Burnham A.K., Peters K.E., Schenk O. (2017) Evolution of Vitrinite Reflectance Models. *AAPG Search and Discovery Article #41982*.
- Espitalie, J., Ungerer P., Irvin I., Marquis E. (1988). Primary cracking of kerogens. Experimenting and modelling C1, C2-C5, C6-C15 classes of hydrocarbons formed *Org. Geochemistry*. **13**(4-6), 893-899.
- Galushkin Yu.I. (2016) *Non-standard problems in basin modeling*. Springer International Publishing Switzerland, 268 p.
- Galushkin Yu.I. (2023) Thermal history of the permafrost zone in the vicinity of the deep Tyumen SG-6 well, West Siberian Basin *Permafrost and Periglacial Processes*. **34**(1), 108-121. Article DOI; Internal Article ID: 17501252; Article ID: PPP2168.
<https://doi.org/10.1002/ppp.2168>
- Melnik E.A., Suvorov V.D., Pavlov E.V., Mishenkina Z.R. (2015) Seismic and density heterogeneities of lithosphere beneath Siberia: Evidence from the Craton long-range seismic profile *Polar Science*. **9**. 119-129.
- Nielsen S.B., Clausen O.R., McGregor E. (2015) Basin %Ro: A Vitrinite Reflectance Model Derived from Basin and Laboratory Data. *Basin Research*. **29**(S1), 515-536.
- 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.