

А. С. Виноградов¹✉, П. И. Сафронов¹, А. Н. Фомин¹, И. А. Губин¹, М. О. Федорович¹

Масштабы генерации углеводородов в кембрийских отложениях Вилуйской гемисинеклизы

¹ Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука Сибирского отделения
Российской академии наук, г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: vinogradov.as@petrogm.com

Аннотация. Выполнено бассейновое моделирование генерации и аккумуляции углеводородов во время формирования осадочного чехла Вилуйской гемисинеклизы. Рассмотрены теоретические основы методов историко-геологического моделирования. Показано, что интенсивная генерация углеводородов в осадочном чехле началась около 300 млн лет назад с очагами генерации в северо-восточной и северо-западных частях бассейна. Показано, что новообразованная нефть не подвергалась термическому разрушению лишь в узкой полосе вдоль склонов Вилуйской гемисинеклизы. Оценены масштабы генерации жидких и газообразных углеводородов в кембрийских отложениях. Учтена роль денудационных процессов, протекающих в кембрий-силлурийское время.

Ключевые слова: Лено-Вилуйская нефтегазоносная область, генерация углеводородов, бассейновое моделирование, куонамская толща

S. Vinogradov¹✉, P. I. Safronov¹, A. N. Fomin¹, I. A. Gubin¹, M. O. Fedorovich¹

The scale of hydrocarbon generation in the Cambrian deposits of the southern regions of the Vilyui hemisyncline

¹ A. A. Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: vinogradov.as@petrogm.com

Abstract. Basin modeling of hydrocarbon generation and accumulation during the formation of the sedimentary basin of the Vilyui hemisyncline is performed. The theoretical basis of historical-geological modeling methods is considered. It is shown that intensive hydrocarbon generation in the sedimentary basin began about 300 Ma with generation centers in the northeastern and northwestern parts of the basin. It is shown that the newly formed oil was not subjected to thermal destruction only in a narrow strip along the slopes of the Vilyui hemisyncline. The scale of generation of liquid and gaseous hydrocarbons in the Cambrian sediments is estimated. The role of denudation processes occurring in the Cambrian-Silurian time is taken into account.

Keywords: Lena-Vilyui oil and gas region, hydrocarbon generation, basin modeling, Kuonamka formation

Введение

Применение метода историко-геологических реконструкций для моделирования основных процессов, отвечающих за формирование осадочного чехла, началось с 70-х годов прошлого века. Бассейновое моделирование направлено на создание согласованной хронологической физико-математической модели исто-

рии формирования осадочного бассейна, характеризующей осадконакопление, тектонику, историю прогрева пород, гидродинамический режим, накопление нефтегазопроизводящих толщ, генерацию, миграцию и аккумуляцию углеводородов. Метод предъявляет высокие требования к объему и качеству начальной геологической, геофизической и геохимической информации, но при этом позволяет оценить динамику генерации и аккумуляции углеводородов изучаемой территории. Методика бассейнового моделирования учитывает влияние многих физических и химических законов, влияющих на образование нефти и газа, процессы генерации, миграции и аккумуляции углеводородов. На каждом этапе построения модели проводится проверка результатов на соответствие наблюдаемым данным, чтобы итоговая модель как можно лучше отражала современные представления о строении и истории формирования бассейна. Сегодня освоение новых нефтегазоносных провинций практически не обходится без применения методов историк-геологических реконструкций.

Методы и материалы

О истории развития метода и процессе моделирования. Геология и геохимия осадочных бассейнов изучались на протяжении последних 90 лет. Информация об этом систематизирована и обобщена в работах Tissot и Welte (1984); Hunt (1996); Gluyas and Swarbrick (2004); Peters et al. (2005); Allen and Allen (2005), Hantschel (2009), Конторовича А.Э. (1976), Вассоевича Н.Б., Галушкина Ю.И. и многих других ученых.

Моделирование с использованием современных представлений о процессах формирования осадочных бассейнов и баз данных позволяет численно восстанавливать изменение температуры, степени катагенеза органического вещества и реализацию генерационного потенциала нефтепроизводящих толщ в процессе погружения.

Формирование и развитие осадочного бассейна - очень сложный и комплексный процесс. В ходе моделирования сначала проводится анализ данных из всех возможных источников информации о развитии бассейна, включающий измерения в скважинах, геологических обнажениях, геохимический анализ образцов керна, сейсмические данные и многое другое.

Программные пакеты моделирования включают в себя три основных блока компьютерного анализа: 1) блок ввода данных по структуре и эволюции бассейна; 2) блок подготовки исходных параметров для моделирования бассейнов с использованием численной обработки этих данных; 3) блок численного моделирования процессов погружения, теплопереноса, генерации и накопления углеводородов в бассейне.

Значение современного геотермического градиента, распределения современных и палеотемператур в разрезе осадочного чехла, значение плотности теплового потока у основания осадочного чехла и сравнение их с расчетными значениями являются важнейшими контролирующими факторами модели. Для восстановления тепловой истории пород используются замеры отражательной спо-

способности витринита, характеризующие максимальные температуры, которым подвергались отложения.

Геологическая характеристика изучаемой области. Главные геологические представления о районе были представлены в публикациях Г. Д. Бабаяна, В. Е. Бакина, Е. И. Бодунова, А. Г. Березина, В. Г. Васильева, А. А. Граусмана, В. И. Вожова, Л. А. Грубова, А. Н. Дмитриевского, М. И. Дормана, М. Л. Кокоулина, В. В. Забалуева, А. Э. Конторовича, К. И. Микуленко, В. Д. Матвеева, К. Б. Мокшанцева, В. С. Ситникова, Ю. Л. Сластенова, А. Ф. Сафронова, А. А. Трофимука, Г. С. Фрадкина, Н. С. Черского и многих других авторов.

Вилюйская гемисинеклиза территориально совпадает в Вилюйской нефтегазоносной областью Лено-Вилюйской нефтегазоносной провинции. Вилюйская гемисинеклиза – это элемент плиты: область развития повышенных толщин чехла и отличающимися условиями осадконакопления по сравнению с окружающими ее пространствами [Башарин А.К. и Фрадкин Г.С., 2005].

Вилюйская гемисинеклиза рассматривается как крупная краевая и самая глубокая депрессия Сибирской платформы, выполненная осадочным чехлом мощностью 12-15 км [Конторович А.Э. и др, 2024].

Фактический материал.

В основу работы положены результаты исследований Лено-Вилюйской нефтегазоносной провинции, полученные в ИНГГ СО РАН:

- 12 скважин
- 11 структурных карт с дифференциацией по времени, начиная с кровли нижнего кембрия, заканчивая подошвой мела (материалы Губина И.А., и Федорович М.О)
- Замеры значений отражательной способности витринита (выполненные Фоминым А.Н.)
- Современные значения $C_{орг}$ в породах куонамского комплекса (материалы Парфеновой Т.М.)
- Мощности размывов с дифференциацией по времени в скважинах на исследуемой территории

Результаты

Построение модели производилось в программном пакете «Temis» (Beicip-Franlab).

Территория изучаемого района соответствует границам Вилюйской гемисинеклизы. Общая площадь – 271 100 км². Модель имеет региональный характер. Шаг сеточных построений составляет 1 км. Модель состоит из 12 слоев. Общее количество узлов 748 000.

Важными входными данными для моделирования истории генерации углеводородов послужили карты значений плотности эффективного теплового потока и карта отсутствующих отложений кембрийско-силурийского возраста, полученных из анализа толщин в скважинах.

Геохимические параметры куонамского комплекса пород изучаемого района детально описаны в работах Парфеновой Т. М. и др. (2009), Ярославцевой Е. С. и др. (2022), а также Бурштейна Л. М. и др. (2022) и других авторов. По результатам работы Бурштейна Л.М. с соавторами была обоснована схожесть органического вещества куонамского комплекса с керогеном II типа Menil-1. Также в работе (Бурштейн и др., 2022) приведено распределение значений водородного индекса по энергиям активации для керогена куонамского комплекса пород, использованное при моделировании генерации углеводородов.

Литология отложений характеризовалась набором стандартных литотипов из библиотеки программного комплекса «Темис» (Beicip-Franlab). Установка литологии производилась в соответствии с изохронными комплексами отложений, которые были выделены по результатам сейсмических данных.

Восстановлена история генерации жидких и газообразных углеводородов, при этом предполагалось, что образованные жидкие углеводороды в куонамской толще подвергались термической деструкции (вторичному крекингу) за счет погружения пород.

Выполнено построение карт кумулятивной плотности генерации жидких и газообразных углеводородов с помощью данных, полученных на основе трехмерного моделирования (рис. 1,2).

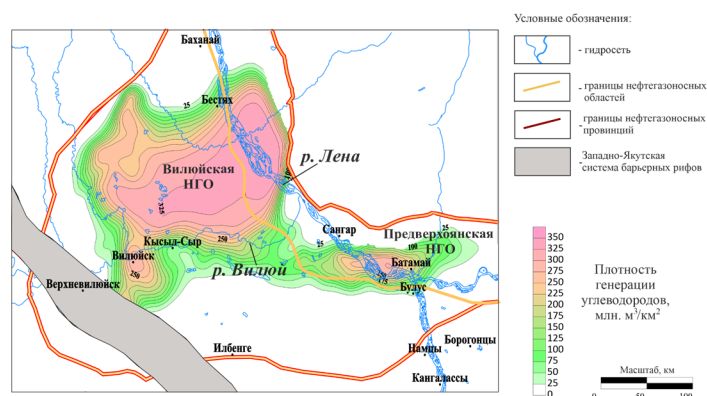


Рис. 1 Масштабы генерации газообразных углеводородов на территории Вилуйской гемисинеклизы куонамской нефтегазопроизводящей толщ.

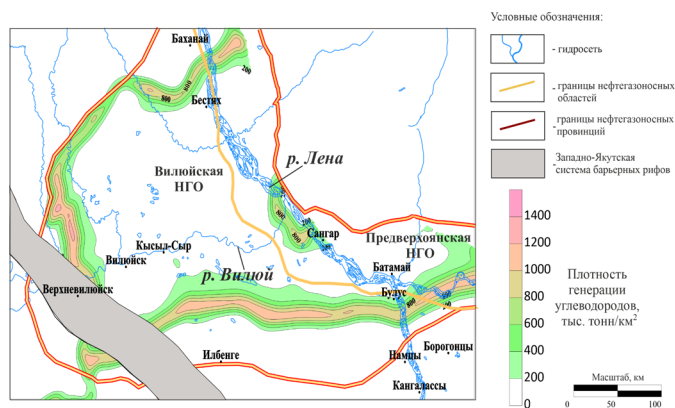


Рис. 2 Масштабы генерации жидких углеводородов на территории Вилуйской гемисинеклизы куонамской нефтегазопроизводящей толщ.

Восстановлена динамика генерации жидких и газообразных углеводородов на всей территории Вилуйской гемисинеклизы. Предполагалось, что новообразованные углеводороды подвергались процессам термической деструкции (рис. 3,4).

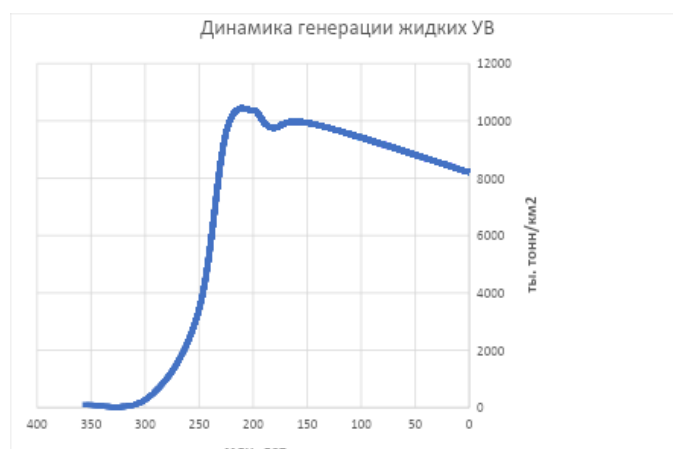


Рис. 3 Динамика генерации жидких углеводородов в куонамском комплексе пород Вилуйской гемисинеклизы



Рис. 4 Динамика генерации газообразных углеводородов в куонамском комплексе пород Вилуйской гемисинеклизы

Заключение

На основе открытых литературных источников и накопленных в ИНГГ СО РАН материалов в программном комплексе «Temis» (Beicip-Franlab) построена трехмерная модель палеозойско-кайнозойского осадочного чехла Вилуйской гемисинеклизы.

При моделировании генерации углеводородов в куонамской НГПТ использованы кинетические характеристики керогена Куонам-1м [Бурштейн и др., 2023]. Новообразованные жидкие углеводороды подвергались термическому крекингу в условиях высоких температур.

В результате геологической истории Вилуйской гемисинеклизы генерация газообразных углеводородов в куонамском комплексе пород происходила как за счет новообразования газа за счет деструкции керогена, так и из-за термической деструкции нефти.

Согласно результатам моделирования, большая часть жидких углеводородов в осевой части гемисинеклизы была преобразована в газообразные. Новообразованная нефть не подвергалась термическому разрушению лишь в узкой полосе вдоль склонов Вилуйской гемисинеклизы.

Получены карты генерации жидких (с учетом потерь на термокрекинг) и газообразных углеводородов. Наиболее интенсивная генерация углеводородов начала происходить около 300 млн. лет назад с очагами генерации в северо-восточной и северо-западных частях бассейна. На данный момент распределение газообразных углеводородов охватывает большую часть синеклизы, за исключением узких полос вдоль бортовых частей. Современные области генерации жидких углеводородов распложены на периферийных частях синеклизы в виде вытянутых тонких полос вдоль бортов.

По результатам моделирования объемы генерации жидких УВ составила 8210 тыс. тонн для всей гемисинеклизы. Объемы генерации газообразных составила 3.75 млрд. м³. Перспективы нефтегазоносности в нижне-среднекембрийских отложениях Вилуйской гемисинеклизы можно связывать с преимущественно газовыми залежами в осевой части гемисинеклизы и нефтяными залежами на ее бортах.

Благодарности

Работа выполнена в рамках проектов фундаментальных научных исследований № FWZZ-2022-0008 и № FWZZ-2022-0011 программы ФНИ

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Espitalie, J. Primary cracking of kerogens. Experimenting and modelling C1, C2–C5, C6–C15 and C15+ classes of hydrocarbons formed / J. Espitalie, P. Ungerer, I. Irwin, F. Marquis // Organic Geochemistry. – 1988. – Vol. 13, № 4 – 6. – P. 893 – 899.
2. Thomas Hantschel, Armin I. Kauerauf. Fundamentals of Basin and Petroleum Systems
3. Waples, DW; Cunningham, R (1985): Leg 80 shipboard organic geochemistry. In: De Graciansky, PC; Poag, CW; et al. (eds.), Initial Reports of the Deep-Sea Drilling Project, Washington (U.S. Gov. Printing Office)
4. Арчegov В. Б., Степанов В. А. История нефтегазогеологических работ на территории сибирской платформы и сопредельных структур // Нефтегазовая геология. Теория и практика. - Санкт-Петербургский государственный горный институт им. Г. В. Плеханова (технический университет), Санкт-Петербург, Россия, 2009. – С. 1-34
5. Баженова Т. К., Белецкая С. Н., Беляева Л.С., Бодунов Е. И. Органическая геохимия палеозоя и допалеозоя Сибирской платформы и прогноз нефтегазоносности. Л., Недра, 1981, 211 с.
6. Бахтуров С. Ф. Евтушенко В. М., Переладов В. С. Куонамская битуминозная карбонатно-сланцевая формация. Новосибирск, Наука 1988, 160 с.
7. Башарин А. К., Фрадкин Г. С. Лено-Вилуйский нефтегазоносный бассейн: строение и тектоническая эволюция // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений, 2005 С. 22-33
8. Бурштейн Л. М., Дешин А. А., Парфенова Т. М., Ярославцева Е. С., Козырев А. Н., Сафронов П. И. Кинетические характеристики керогенов куонамского комплекса нижнего и среднего кембрия Сибирской платформы // Геология и геофизика, т. 65, № 1, 2023, с. 133–150

9. Васильев С. А., Соболев П. Н., Таффарель Е. С., Голованова М. П., Гарифуллин И. И. Нефтегазоносность вилуйской синеклизы и перспективы поисков залежей углеводородов // Геология, геофизика и разработка нефтяных месторождений, 2018 С. 14-26
10. Галушкин, Ю. И. Моделирование осадочных бассейнов и оценка их нефтегазоносности / Ю. И. Галушкин. – М. : Научный мир, 2007. – 455 с.
11. Губин И. А. Уточнение строения Вилуйской гемисинеклизы по результатам переинтерпретации сейсморазведочных работ – Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Новосибирск, 2020 -52 с.
12. Закономерности распределения содержания органического вещества в породах куонамской свиты и ее стратиграфических аналогов (кембрий Сибирской платформы) / Е. С. Ярославцева, Л. М. Бурштейн, А. Э. Конторович, Т. М. Парфенова // Успехи органической геохимии : Материалы 2-й Всероссийской научной конференции с участием иностранных ученых, посвященной 120-летию со дня рождения члена-корреспондента АН СССР Н.Б. Вассовича и 95-летию со дня рождения заслуженного геолога РСФСР, профессора С.Г. Неручева, Новосибирск, 05–06 апреля 2022 года. – Новосибирск: Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, 2022. – С. 310-313. – DOI 10.25205/978-5-4437-1312-0-310-313. – EDN CKNLPA.
13. Конторович А. Э., Геохимические методы количественного прогноза нефтегазоносности - Москва : Недра, 1976. - 248 с. : ил.; 22 см. - (Труды/ М-во геологии СССР. Сиб. науч.-исслед. ин-т геологии, геофизики и мин. сырья; Вып. 229) (Серия нефтяной геологии).
14. Конторович А. Э., Бурштейн Л. М., Губин И. А., Парфенова Т. М., Сафронов П.И. Глубокопогруженные нефтегазовые системы нижнего палеозоя на востоке Сибирской платформы: геолого-геофизическая характеристика, оценка ресурсов углеводородов // Записки Горного института. – 2024. – Т. 269. – С. 721-737.
15. Конторович А. Э., Евтушенко В. М., Ивлев Н. Ф., Ларичев А. И. Закономерности накопления органического вещества на территории Сибирской платформы в докембрии и кембрии // Литология и геохимия нефтегазоносных толщ Сибирской платформы. М., Наука, 1981 с. 19–42.
16. Конторович А. Э., Изосимова А. И., Занин Ю. И., Замирайлова А. Г. Сравнительный анализ биомаркеров фосфоритов и углеродистых аргиллитов куонамской формации Сибирской платформы // Минералогия и жизнь: биомаркерные взаимодействия: Расширенные тез. докл. II Междунар. семинара. Сыктывкар 1996, с. 96-97.
17. Конторович А. Э., Савицкий В. Е. К палеографии Сибирской платформы в раннюю и среднюю кембрийские эпохи // Вопросы литологии и палеографии Сибири. Новосибирск, 1970, с. 95-108 (Тр. СНИИГиМСа; вып. 106).
18. Конторович А. Э., Трофимук А. А. Литогенез и нефтегазообразование // Горючие ископаемые. Проблемы геологии и геохимии нафтидов и битуминозных пород. М.: Наука, 1976. с. 19–36
19. Парфенова, Т. М. Геохимические предпосылки нефтеносности пород инниканской свиты нижнего и среднего кембрия на юго-востоке Сибирской платформы / Т. М. Парфенова, Д. С. Мельник, И. В. Коровников // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. – 2022. – № S11. – С. 64-71. – DOI 10.20403/2078-0575-2022-11с-64-71. – EDN PKAVRX.

© А. С. Виноградов, П. И. Сафронов, А. Н. Фомин, И. А. Губин, М. О. Федорович, 2025