

О взаимосвязи «эффекта обучения» и динамики процесса освоения-добычи углеводородов

В.А. Крюков, Д. Абугсиса, Д.И. Душенин

УДК 330.43

DOI: 10.30680/ECO0131-7652-2025-3-83-96

Аннотация. В статье представлены результаты исследования влияния эволюции ключевых инновационных и организационных технологий на экономическую эффективность разработки нетрадиционных источников углеводородов. Анализ проведен на примере построения модифицированных «кривых обучения» для двух добывающих компаний, участвующих и организующих процесс освоения формации сланцевых углеводородов Баккен в США. Также рассмотрены возможности применения методов машинного обучения для оценки скорости развития технологий в зависимости от степени участия вовлеченных в данный процесс компаний. Результаты подтверждают рабочую гипотезу о возможности построения «кривых обучения» с учётом влияния на скорость развития технологий слабо управляемых факторов. Обоснована значимость создания благоприятной среды для стимулирования инновационного роста и снижения затрат в ходе обмена знаниями и, как следствие, повышения темпов процесса обучения. Результаты исследования могут быть использованы для стимулирования развития инновационных процессов в нефтегазовом секторе.

Ключевые слова: добыча углеводородов; новые объекты освоения; новые типы объектов добычи углеводородов; прогнозирование; генерация знаний; кривые обучения; инновации; трудноизвлекаемые запасы

Введение

Совокупный объем и качество топливно-энергетических ресурсов (прежде всего, ископаемых) находятся в процессе непрерывных изменений. Главным образом – в силу открытия и постановки на балансовый учет новых и исчерпания «старых» месторождений. Но также благодаря влиянию инновационных технологий, применяемых на всех этапах освоения ресурсных объектов от поиска и разведки, до эксплуатации. Именно они, как правило, определяют экономическую эффективность добычи.

Современный период освоения нефтегазовых ресурсов в мире, и Россия здесь не исключение, отличает переход ко все более сложным и все менее традиционным (с точки зрения ранее апробированных технологий и организационных решений) типам объектов, которые часто определяются как

«трудноизвлекаемые»¹. Авторы стараются не использовать данный термин, поскольку его «наполнение» зависит не только от геологических характеристик объектов (залежей), но также в значительной мере определяется широким комплексом экономических и институциональных условий – таких как цены на углеводороды, формы кооперации и интеграции усилий компаний (что в целом ряде случаев ведет к снижению рисков и получению синергетического эффекта), и, конечно, подход к налогообложению (фискальный или рентоориентированный). Нам ближе понятие «нетрадиционные виды» нефтегазовых ресурсов и их содержащих объектов, используемое, например, в США. К последним обычно относят сверхтяжелую и тяжелую нефть, добываемую из битуминозных песков, керогеновую нефть, извлекаемую из горючих сланцев, легкую нефть из слабопроницаемых коллекторов – те виды углеводородов, которые сложно поддаются общепринятым способам разработки. Поэтому в данной работе мы будем использовать понятие «новые типы объектов добычи».

Число подобных новых типов объектов стремительно нарастает, и они играют все более важную роль в мировом энергоснабжении. Самый известный из них – так называемые сланцевые залежи нефти, активная разработка которых началась в 2005–2010-х гг. в США. На данный момент более половины выявленных ресурсов «сланцевой нефти» находится за пределами США, и сосредоточены они в четырех странах – России, Китае, Аргентине и Ливии².

Как показал опыт «сланцевой революции», эффективную при освоении и разработке новых типов объектов ключевую роль играют не только новые технологии и инженерно-экономические решения, но также и иные, более гибкие формы и рамки кооперации и интеграции усилий нефтегазовых и, прежде всего, нефтегазосервисных компаний самого разного профиля и специализации. Это касается большинства высокотехнологичных отраслей: помимо технологий важную роль в их инновационном развитии играют процессы взаимодействия различных компаний [Cooke, Leydesdorff, 2006].

К настоящему времени накоплен достаточный эмпирический материал об особенностях освоения нетрадиционных источников углеводородов, что позволяет применять разного рода математические модели для изучения и прогнозирования инновационного развития нефтегазовой отрасли, в частности, основанные на агентном [Turrell, 2016] и классическом имитационном

¹ Изначально так называли разведанные и количественно оцененные геологические запасы, разработка которых «существующими на данный момент» технологиями не может быть осуществлена с позиций достижения сложившихся ранее представлений об экономической и технологической эффективности (достижения приемлемого уровня нефтеотдачи). В настоящее время к ним относят геологические запасы, в отношении которых «существующие технологии не отвечают геологическим особенностям пласта», что делает их разработку нерентабельной [Шарф, Борзенкова, 2015].

² Shale oil and shale gas resources are globally abundant. Available at: <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=14431> (accessed 06.03.2025).

моделировании, использовании байесовских сетей, кривых обучения и статистического анализа [Крюков и др., 2022] и комбинирующие эти подходы.

Более того, в связи нарастанием многообразия осваиваемых нефтегазовых объектов [Шафраник, Крюков, 2016], многие разработанные ранее модели требуют модернизации. Так, для профиля «кривых обучения» необходима разработка специальных алгоритмов, что продемонстрировано в настоящей статье на примере реальных данных по освоению формации Баккен, которая в настоящее время является одним из самых продуктивных месторождений сланцевой нефти в США. На примере данной формации показан один из способов учёта дополнительных – организационных (кооперации и интеграции) факторов при моделировании эволюции технологий добычи новых типов геологических объектов, содержащих углеводороды. Для этих целей использованы процедуры и методы машинного обучения.

Сланцевая нефть – важнейшие особенности процесса освоения

В США нарабатан колоссальный научно-технический и организационно-финансово-экономический опыт в освоении сланцевых залежей. В частности, американские разработки в области гидроразрыва пласта были успешно апробированы на таких уникальных геологических объектах, как Марселлус в Пенсильвании, Баккен в Северной Дакоте и Игл-Форд в Южном Техасе, и стали применяться не только на новых сланцевых месторождениях, но и в старых регионах нефтедобычи (Пермский бассейн), благодаря чему объемы добычи нефти и газа в стране за период с 2013 г. по 2023 г. практически удвоились [Statistical..., 2024], превратив Соединенные Штаты в крупнейшего производителя нефти в мире³.

Продемонстрируем ключевые подходы к добыче сланцевой нефти на примере формации Баккен. Ее геологию отличают, прежде всего, коллекторские свойства углеводородосодержащих пород (низкие пористость и проницаемость). Формация занимает площадь около полумиллиона квадратных километров; нефтегазоносный слой толщиной до 40 м сформирован из сланцев, песчаника и доломита и залегает на довольно большой глубине (2,5–3,5 км) [Прищепа и др., 2013]. Ресурсы нефти в низкопроницаемых коллекторах формации оцениваются в 23 млрд барр. Из них около 27% (6,2 млрд барр.) территориально относятся к штату Монтана, а 73% (16,8 млрд барр.) – к штату Северная Дакота⁴. Сложное геологическое строение Баккена породило большие трудности на ранних стадиях разработки [Abdulkareem et al., 2019].

³ The United States is now the largest global crude oil producer. Available at: <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=37053> (accessed 06.03.2025).

⁴ USGS releases oil and gas assessment for the Bakken and Three Forks formations of Montana and North Dakota. Available at: <https://www.usgs.gov/news/national-news-release/usgs-releases-oil-and-gas-assessment-bakken-and-three-forks-formations> (accessed 06.03.2025).

Добыча нефти здесь началась в самом начале 1950-х гг. на основе традиционного подхода – бурения вертикальных или наклонных скважин. Однако такой способ не обеспечивал доступа к значительной части ресурсов, которые были аккумулированы в очень плотных геологических структурах. Только новые научно-технологические решения начала XXI в., особенно в горизонтальном бурении и гидравлическом разрыве пласта (fracking), позволили активизировать освоение ресурсов данной формации⁵. Именно на Баккене горизонтальное бурение впервые обеспечило возможность доступа к большим участкам формации с помощью одной скважины, что значительно повысило и уровень, и эффективность добычи. При этом совершенствовался не только метод разрыва пласта (в известном смысле – формирования искусственной залежи), но также формы и способы координации усилий разных (как правило, узкоспециализированных добывающих и наукоемких сервисных) компаний.

Особенность координации состоит не только в узкой специализации (на отдельных операциях или даже их составляющих), но и в сроках, а также масштабах деятельности малых фирм в рамках того или иного проекта: как правило, они довольно быстро переходят с одного объекта на другой, основывая бизнес-модель не столько на объемах добычи с одного объекта, сколько на максимально полной реализации своих компетенций. Важно при этом, что финансовые институты, инвестирующие в подобные проекты, также «пошли навстречу» – разработали специальные условия и процедуры их финансирования. Все это вместе взятое позволило перевести потенциальные геологические ресурсы в запасы, рентабельные для освоения и последующей разработки, причем этот процесс был инициирован не столько работами по поиску и разведке новых объектов и залежей, сколько технологическими и организационно-экономическими достижениями начала XXI в.

Фактически это знаменовало собой зарождение в нефтеразработке эпохи динамичного обучения: генерации и реализации новых научно-технологических решений и развития новой экосреды для всех участников процесса изучения и освоения нефтегазовых ресурсов [Montgomery, Michael, 2010]. Подчеркнем, что отмеченный процесс отличали чрезвычайно высокие темпы развития [Lorwongngam et al., 2019].

Так, за двадцать лет число компаний на территории формации Баккен превысило 500 ед. Среди них есть как занимающиеся исключительно добычей (как правило, на основе инновационных технологий), так и имеющие навыки организации производственно-сервисного процесса, т.е. выполняющие функции операторов подобных проектов. При этом собственно сервисные компании – специализирующиеся на выполнении определенных видов работ – привлекаются на контрактной основе для их выполнения. В число лидеров вышли такие

⁵ Trends in U.S. Oil and Natural Gas Upstream Costs. Available at: <https://www.eia.gov/analysis/studies/drilling/pdf/upstream.pdf> (accessed 06.03.2025).

добывающие компании, как Continental Resources (более чем 2500 операций по гидроразрыву в 2021 г.) и компания Hess (более чем 2000 операций). Именно они были выбраны нами для анализа и изучения процесса обучения (прежде всего, из-за доступности информации). При этом данные компании значительную часть операций осуществляют как собственными силами, так и с привлечением узкоспециализированных сервисных компаний.

Интересно, что по мере развития процесса обучения и повышения эффективности технологических и организационных решений разработки сланцевых залежей малые инновационные компании становятся привлекательными для крупного бизнеса. Так, компания Hess в 2023 г. перешла под контроль одной из ведущих транснациональных компаний США Chevron Corporation. При этом сделка включала в себя покупку не только принадлежащих Hess участков формации Баккен, но и участок Stabroek в Гайане. Последний факт говорит о расширении границ влияния процесса обучения: с уровня регионального он постепенно переходит на транснациональный, и в какой-то момент его результаты становятся общим достоянием всего мирового нефтегазового сектора.

Методология исследования

В основе разработанного подхода лежит предположение о том, что по мере усложнения ресурсной базы добычи углеводородов исчерпываются возможности эффективного применения ранее созданных и технологий, и организационных рамок реализации проектов. Важнейший индикатор такого исчерпания – нарастание неопределенности производственных и финансовых показателей, что делает прогноз технологического развития чрезвычайно сложной задачей. Коль скоро традиционные методы инвестиционного анализа не подходят для ее решения, необходимо применять адекватные изменившимся условиям математические модели.

При участии одного из авторов ранее была разработана модель инновационного развития нефтегазовой отрасли, предназначенная для прогноза процесса формирования научно-технологических решений, обеспечивающих эффективное освоение и разработку изменяющихся во времени запасов углеводородного сырья [Крюков и др., 2022]. Модель можно условно разделить на два блока (рис. 1).

Первый блок предназначен для определения таких обобщающих экономических характеристик технологий, которые могут обеспечить рентабельное освоение и разработку тех или иных типов запасов. По сути, речь идет о моделировании порогового анализа: строится классическая производственно-инвестиционная модель, с помощью которой путем решения обратной задачи находится «срез» достаточных обобщающих экономических характеристик развития ключевых технологий. При этом в процессе поиска используется оптимизационный подход на основе метода деревьев [Миляев и др., 2018].



Рис. 1. Блок-схема модели инновационного развития нефтегазовой отрасли

Второй блок моделирует различные варианты достижения уровней состояния развития технологий, найденных в рамках первого блока. При этом сначала нефтегазовые компании (добывающие, сервисные или инвестиционные) представляются как агенты, каждый из которых имеет свой набор характеристик. Затем строится байесовская сеть, имеющая структуру направленного дерева. Пути такого дерева можно интерпретировать следующим образом. «Вершины», находящиеся ближе к корню, обеспечивают формирование среды взаимодействия (в определенном смысле – научных кластеров, позволяющих обмениваться знаниями) – то есть участие агентов в процессе создания и развития технологий. Более отдаленные «вершины» работают непосредственно на основной результат – рост (в той или иной степени) эффективности применения технологии в рамках «среды взаимодействия». При этом «веса» ребер графа, обеспечивающих итоговый результат, определяются с помощью алгоритма сопоставления кривых обучения со статистикой, на основе которой они были построены.

В процессе работы с данной моделью мы убедились, что она позволяет строить дискретное вероятностное распределение потенциальных состояний технологий спустя заданный период времени, а главное – определять вероятность достижения их целевых состояний, которые позволяют приступить к рентабельному освоению изменившейся ресурсной базы.

Конечная цель исследования для определенного типа объектов заключается в разработке прообраза структуры технологических и организационно-правовых механизмов, направленной на появление условий для экономически эффективного освоения участка недр.

Для понимания экономических перспектив проекта чрезвычайно важно проанализировать кривые обучения также и с точки зрения того, как при их построении могут и должны учитываться различные организационно-экономические факторы взаимодействия компаний (а не только статистические данные, характеризующие их деятельность). В этом плане выбранная нами формация Баккен является удачным объектом для демонстрации предлагаемого подхода, так как процесс обучения, технологические и организационно-экономические инновации при ее освоении имели и до сих пор сохраняют решающее значение.

Кривые обучения изначально создавались как метод математического представления процесса обучения с накоплением опыта при повторении одних и тех же задач. Они обладают явным преимуществом по сравнению с обычными экспертными оценками, так как строятся на основе реальных ретроспективных данных. Несмотря на то, что традиционно этот инструмент использовался для анализа инновационных процессов в обрабатывающей промышленности, мы полагаем, что он может быть адаптирован также и для прогноза динамики затрат и повышения эффективности разработки меняющихся по характеристикам объектов добычи углеводородов. В поддержку этой гипотезы можно привести исследование взаимосвязи между накопленным выпуском продукции и динамикой затрат в проектах ветроэнергетики, в котором было показано, как рост опыта и научно-технологическое развитие способствовали устойчивому снижению эксплуатационных расходов с течением времени [Крюков, Горлов, 2019].

В качестве показателей, отражающих динамику процесса обучения, исследовались объем закачиваемой жидкости при проведении гидроразрыва пласта и изменение удельных затрат на бурение скважин в зависимости от объема инвестиций. Их улучшение свидетельствует не только о росте эффективности добычи, но и о снижении инвестиционных рисков. Кроме того, поскольку с точки зрения инвестиций разработка участка формации представляет собой сложный проект, анализ включает влияние на процесс обучения совокупности институциональных, социальных и иных внешних факторов.

Напомним, кривые обучения, демонстрирующие процесс развития новых технологий, строились на основе кейсов двух добывающих компаний, работающих на формации Баккен – Continental Resources и Hess. Исходные данные для моделирования были взяты из годовых отчетов компаний с 2011 г. по 2021 г. и ежемесячной статистики добычи нефти в рамках формации Баккен, предоставляемой Департаментом минеральных ресурсов Северной Дакоты и FracTracker Alliance.

Была использована однофакторная кривая обучения вида:

$$Y = a \cdot \ln(X) + b,$$

где X – основной влияющий на процесс обучения фактор (например, инвестиции в совершенствование технологии), а Y – зависимая переменная, которая ассоциируется с результатом обучения (например, стоимость, время или эффективность). Число a – коэффициент наклона кривой, который указывает на скорость обучения, b – свободный член уравнения и начальная точка кривой, отражающая базовый уровень развития технологии на начальном этапе эволюции.

Кривые обучения

На рисунке 2 представлены тенденции снижения удельных затрат Continental Resources на бурение за два отдельных периода: 2011–2017 гг. и 2018–2021 гг. Такое разделение данных отражает динамичный характер процесса развития технологий (их эволюцию). Первый период охватывает этап первоначального обучения (становления технологий), а второй (период развития и распространения технологий) отражает более агрессивное сокращение затрат, что свидетельствует об ускоренных темпах обучения и применения технологических новшеств.

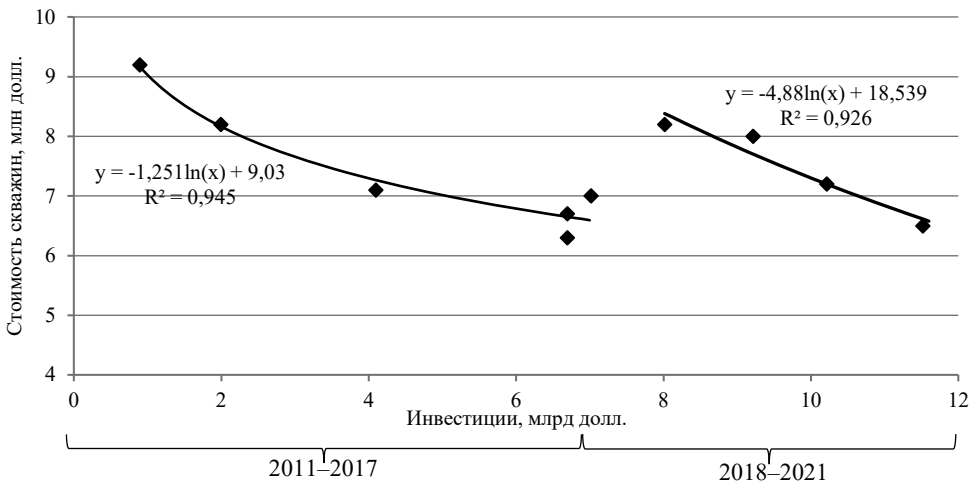


Рис. 2. Снижение затрат Continental Resources на бурение скважин за периоды 2011–2017 гг. и 2018–2021 гг., млрд долл.

Затраты бурения в 2011–2017 гг. следуют логарифмическому тренду: $y = -1,251 \cdot \ln(x) + 9,03$ с $R^2 = 0,945$, что указывает на практически полное соответствие модели реально имевшему место процессу. По мере увеличения инвестиций затраты на бурение скважин существенно снижаются.

В 2018–2021 гг. наблюдается более крутой логарифмический тренд: $y = -4,88 \cdot \ln(x) + 18,539$ с $R^2 = 0,926$, что показывает более результативное снижение удельных затрат на доллар инвестиций. Вероятно, это отражает процесс совершенствования технологии горизонтального бурения и, как следствие – повышения операционной эффективности.

О взаимосвязи «эффекта обучения»
и динамики процесса освоения-добычи углеводородов

Аналогичный график снижения удельных затрат на бурение компанией Hess в период 2011–2017 гг. показывает логарифмический тренд $y = -2,113 \cdot \ln(x) + 10,557$ с $R^2 = 0,897$, что также предполагает высокое соответствие модели, хотя и с немного более слабой корреляцией по сравнению с Continental Resources (рис. 3). В 2018–2021 гг. сложился гораздо более крутой логарифмический тренд: $y = -6,64 \cdot \ln(x) + 23,91$ с $R^2 = 0,964$, что говорит о более высоком темпе снижения удельных затрат на бурение компанией Hess по сравнению с Continental Resources в эти же годы. По нашему мнению, это может быть связано с распространением новых технологических приемов и подходов.

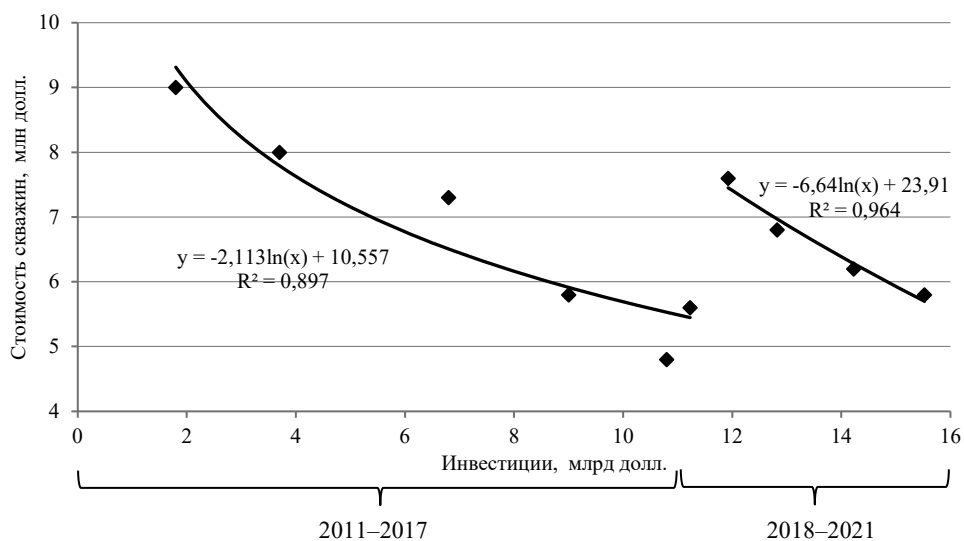


Рис. 3. Снижение затрат Hess на бурение скважин за периоды 2011–2017 гг. и 2018–2021 гг., млрд долл.

Обе компании снижали удельные затраты на бурение скважин гораздо более высокими темпами в 2018–2021 гг.

Динамика изменения среднего расхода жидкости при проведении одной операции гидроразрыва компанией Continental Resources за периоды 2011–2017 гг. и 2018–2021 гг. показана на рисунке 4.

Средний расход жидкости в 2011–2017 гг. следует логарифмическому тренду: $y = 5,482 \cdot \ln(x) - 1,613$ с $R^2 = 0,696$, что в целом указывает на соответствие модели. Затем наступает переломный момент, после которого наблюдается обратный логарифмический тренд: $y = -4,881 \cdot \ln(x) + 19,794$ с $R^2 = 0,782$. Вероятно, это говорит о том, что до 2017 г. компания Continental Resources повышала эффективность гидроразрыва за счёт увеличения объёма используемой жидкости. Начиная с 2018 г. развитие и расширение масштабов применения новых решений и навыков позволило снижать расход жидкости без ущерба для получаемого эффекта.

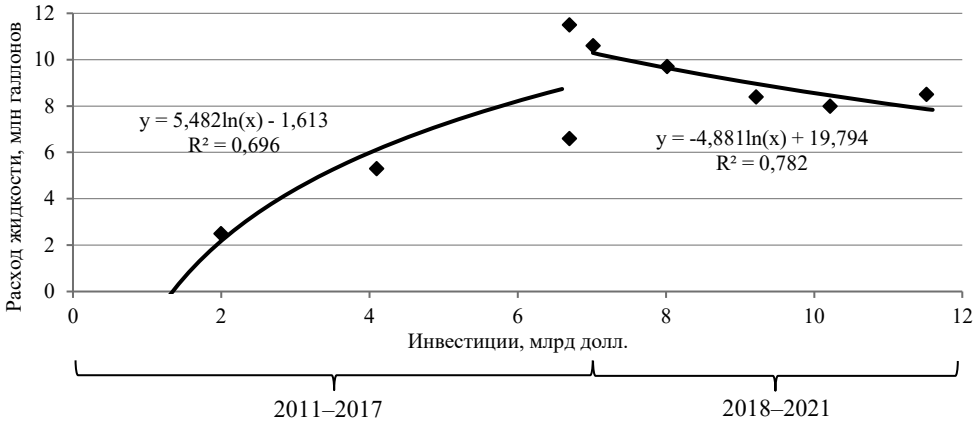


Рис. 4. Расход жидкости при проведении одной операции фрекинга компанией Continental Resources за периоды 2011–2017 гг. и 2018–2021 гг., млн галлонов

Динамика среднего расхода жидкости при проведении гидроразрыва компанией Hess имеет другие тенденции: в 2011–2017 гг. он меняется несущественно, поэтому значение коэффициента детерминации довольно низкое: $y = 0,659 \cdot \ln(x) + 1,196$ с $R^2 = 0,193$ (рис. 5). В 2018–2021 гг. произошел резкий рост среднего объема используемой жидкости, соответствующий логарифмическому тренду: $y = 10,145 \cdot \ln(x) - 18,621$ с $R^2 = 0,879$. Вероятно, условия применения технологии гидроразрыва только к началу второго периода позволили получать положительный эффект от увеличения расхода жидкости.

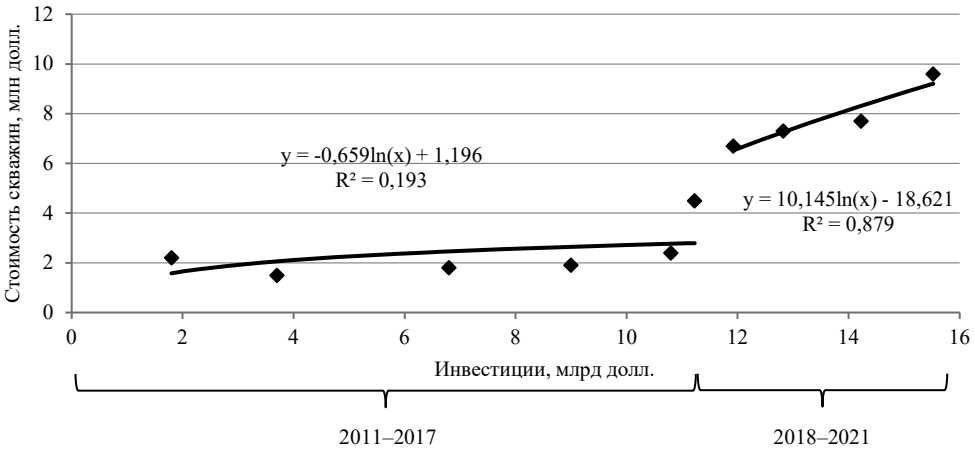


Рис. 5. Расход жидкости при проведении одной операции гидроразрыва компанией Hess за периоды 2011–2017 гг. и 2018–2021 гг., млн галлонов

Моделирование условий изменения и развития технологий

Одно из важнейших направлений модернизации модели инновационного развития нефтегазового сектора заключается в разработке подходов для количественного анализа синергетического эффекта совместной деятельности нескольких компаний.

Современные инновационные процессы предполагают создание и развитие не только новых технологических решений, но и условий для взаимодействия и кооперации компаний, каждая из которых имеет свои уникальные (как правило, локальные) знания и навыки. Только в случае их взаимодействия можно рассчитывать на появление синергетического эффекта. Главным препятствием для изучения данного вопроса является доступ к необходимой информации, которая должна довольно детально отражать ход и результаты совместных проектов, чтобы сделать возможными количественные оценки.

Нами разработан подход к изучению и оценке данной группы вопросов на основе дерева принятия решений и метода случайного леса⁶, поскольку эти инструменты хорошо зарекомендовали себя при решении задач поиска причинно-следственных связей [Ali et al., 2012].

В данном случае ориентиром могут стать исследования эволюции условий взаимодействия различных инновационных компаний.

Например, в одной из работ рассматривается процесс технологического развития в рамках взаимодействия между компаниями, имеющими различные, но дополняющие друг друга технологические решения, причем инновации вовсе не обязательно создаются и развиваются в одних и тех же регионах [Basilico, Graf, 2023]. В другой работе доказано, что, как правило, имеет место устойчивая положительная связь между исходным научно-технологическим уровнем и возможными направлениями инновационного развития [Zhang et al., 2024]. Важно, что в случае регионов нефтегазовой специализации, имеющих, по большому счету, сходные проблемы, такой путь развития инновационных процессов имеет значительно больший потенциал реализации [Barbero et al., 2024].

Заключение

Мы глубоко убеждены, что наиболее адекватным направлением изучения и прогнозирования вовлечения в освоение и последующую разработку меняющихся во времени нефтегазовых ресурсов является подход с позиций процесса обучения. Анализ результатов применения новых научно-технологических и организационно-экономических решений на примере формации Баккен (США) показывает их тесную связь с динамикой не только инвестиций, но и количества вовлеченных в данный процесс компаний, как добывающих, так и оказывающих услуги производственно-сервисного характера.

⁶ Random Decision Forest в обучении с подкреплением. Available at: <https://www.mql5.com/ru/articles/3856> (accessed 06.03.2025).

Важную роль в анализе и оценке состояния и перспектив применения тех или иных научно-технологических решений играет применение «кривых обучения». Последние визуализируют целевую направленность как процессов создания и совершенствования технологий, так и форм и рамок взаимодействия компаний-участников. Применяя данный инструментарий, компании могут с большей степенью обоснованности прогнозировать динамику ключевых показателей освоения и разработки меняющихся во времени объектов добычи нефтегазовых ресурсов.

В заключение подчеркнем, что все вышесказанное предполагает возрастание значения квалификации и знаний работников, вовлеченных в процесс освоения меняющихся ресурсов.

Литература/References

- Крюков В.А., Горлов А.А. Прогнозирование процессов развития ветровой энергетики в бассейне Северного моря на базе кривых обучения // Проблемы прогнозирования. 2019. № 2. С. 93–103.
- Kryukov, V.A., Gorlov, A.A. (2019). Forecasting of wind energy development processes in the North Sea basin based on learning curves. *Studies on Russian Economic Development*. No. 2. Pp. 93–103. (In Russ.).
- Крюков В.А., Мильяев Д.В., Душенин Д.И., Савельева А.Д., Скузоватов М.Ю. Генерация новых знаний в ресурсном секторе экономики // Проблемы прогнозирования. 2022. № 3. С. 28–41. DOI: 10.47711/0868–6351–192–28–41
- Kryukov, V.A., Milyaev, D.V., Dushenin, D.I., Savelyeva, A.D., Skuzovatov, M. Yu. (2022). Generation of new knowledge in the resource sector of the economy. *Studies on Russian Economic Development*. No. 3. Pp. 28–41. (In Russ.). DOI: 10.47711/0868–6351–192–28–41
- Мильяев Д.В., Душенин Д.И., Киданова О.А. Эффект накопления знаний при определении критериев рентабельности сырьевых проектов // Мир экономики и управления. 2018. Т. 18, № 1. С. 54–69. DOI 10.25205/2542–0429–2018–18–1–54–69
- Milyaev, D.V., Dushenin, D.I., Kidanova, O.A. (2018). The effect of knowledge accumulation in determining the criteria of profitability of resource projects. *World of Economics and Management*. Vol. 18, No. 1. Pp. 54–69. (In Russ.). DOI 10.25205/2542–0429–2018–18–1–54–69
- Прищепина О.М., Аверьянова О.Ю., Высоцкий В.И., Морариу Д. Формация Баккен: геология, нефтегазосность и история разработки // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2013. Т. 8, № 2. URL: http://www.ngtp.ru/rub/9/19_2013.pdf (дата обращения: 06.03.2025). DOI: 10.17353/2070–5379/19_2013
- Prishchepa, O.M., Averyanova, O. Yu., Vysotsky, V.I., Morariu, D. (2013). Bakken Formation: geology, oil and gas content and development history. *Neftegasovaya Geologiya. Teoriya i Praktika*. Vol. 8, No. 2. Available at: http://www.ngtp.ru/rub/9/19_2013.pdf (accessed 06.03.2025) (In Russ.). DOI: 10.17353/2070–5379/19_2013.
- Шарф И.В., Борзенкова Д.Н. Трудноизвлекаемые запасы нефти: понятие, классификационные подходы и стимулирование разработки // Фундаментальные исследования. 2015. № 2. С. 3593–3597.
- Sharf, I.V., Borzenkova, D.N. (2015). Hard-to-recover oil reserves: concept, classification approaches and stimulation of development. *Fundamental Research*. No. 2. Pp. 3593–3597. (In Russ.).

- Шафраник Ю.К., Крюков В.А. Нефтегазовые ресурсы России: трудный путь к многообразию. М.: Перо, 2016. 272 с.
- Shafraniuk, Yu.K., Kryukov, V.A. (2016). *Oil and gas resources of Russia: a difficult path to diversity*. Moscow: Pero Publ., 272 p. (In Russ.).
- Abdulkareem, S.A., Mustafa, Y.T., Augustijn, E.W., Filatova, T. (2019). Bayesian Networks for Spatial Learning: A Workflow on Using Limited Survey Data for Intelligent Learning in Spatial Agent-Based Models. *Geoinformatica*. Vol. 23 (2). Pp. 243–268.
- Ali, J. et al. (2012). Random forests and decision trees. *International Journal of Computer Science Issues (IJCSI)*. Vol. 9 (5). P. 272.
- Barbero, J. et al. (2024). Technologically related diversification: One size does not fit all European regions. *Research Policy*. Vol. 53 (3). P. 104973. DOI: 10.1016/j.respol.2024.104973
- Basilico, S., Graf, H. (2023). Bridging technologies in the regional knowledge space: measurement and evolution. *Journal of Evolutionary Economics*. Vol. 33 (4). Pp. 1085–1124.
- Cooke, P., Leydesdorff, L. (2006). Regional Development in the Knowledge-Based Economy: The Construction of Advantage. *The Journal of Technology Transfer*. Vol. 31 (1). Pp. 5–15.
- Lorwongngam, A.O., Cipolla, C., Gradl, C., Gil Cidoncha, J., Davis, B. (2019). Multidisciplinary data gathering to characterize hydraulic fracture performance and evaluate well spacing in the Bakken / *SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference and Exhibition*, Conference Paper. DOI: 10.2118/194321-MS.
- Montgomery, C.T., Michael, B. (2010). Hydraulic fracturing: History of an enduring technology. *Journal of Petroleum Technology*. Vol. 62 (12). Pp. 26–40. DOI: 10.2118/1210–0026-JPT
- Statistical Review of World Energy – 2024, 73rd edition. P. 20. Available at: <chrome-extension://efaidnbmninnbpcjpcgclcfndmkaj/https://www.connaissancedesenergies.org/sites/connaissancedesenergies.org/files/pdf-actualites/Statistical%20Review%20of%20World%20Energy%202024.pdf> (accessed 06.03.2025).
- Turrell, A. (2016). Agent-Based Models: Understanding the Economy from the Bottom Up / Quarterly Bulletin, Q4. – Bank of England. Pp. 173–188. Available at: <chrome-extension://efaidnbmninnbpcjpcgclcfndmkaj/https://faculty.sites.iastate.edu/tesfatsi/archive/tesfatsi/ABMOverview.BankOfEngland.ATurrell2017.pdf> (accessed 06.03.2025).
- Zhang, J. et al. (2024). The Path Innovation of Regional Economic Growth: Data Analysis Based on China. *Journal of the Knowledge Economy*. Vol. 15 (4). Pp. 20111–20134. DOI:10.1007/s13132–024–01847–7

Статья поступила 04.03.2025

Статья принята к публикации 10.03.2025

Для цитирования: Крюков В.А., Абугсиса Д., Душенин Д.И. О взаимосвязи «эффекта обучения» и динамики процесса освоения-добычи углеводородов // ЭКО. 2025. № 3. С. 83–96. DOI: 10.30680/ЕСО0131–7652–2025–3–83–96

Информация об авторах

Крюков Валерий Анатольевич (Новосибирск) – академик РАН, доктор экономических наук, профессор. Институт экономики и организации промышленного производства СО РАН; Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (Москва).

E-mail: valkryukov@mail.ru; ORCID: 0000–0002–7315–6044

Абугсиса Джехад (Москва) – аспирант.

Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики».

E-mail: gabu@hse.ru; ORCID: 0000-0002-4965-3622

Душенин Дмитрий Игоревич (Новосибирск) – кандидат физико-математических наук. Институт экономики и организации промышленного производства СО РАН.

E-mail: dmdushenin@mail.ru; ORCID: 0000-0001-8132-2471

Summary

V.A. Kryukov, D. Abugsis, D.I. Dushenin

Correlation between the “Learning effect” and Hydrocarbon Recovery Dynamics

Abstract. The authors summarize the findings of research into the impact of evolving critical innovative and organizational technologies on the economic efficiency of unconventional hydrocarbon sources development. The analysis is based on the example of building “learning curves” for two production companies participating in and organizing the process of developing the Bakken shale hydrocarbon formation in the United States. The possibilities of using machine learning methods to estimate the speed of technology development depending on the degree of participation of the companies involved in this process are also considered. The results confirm the working hypothesis about the possibility of constructing “learning curves” taking into account the influence of poorly controlled factors on the speed of technology development. The next direction of modification of the model of evolution of innovative technologies is related to the substantiation of the importance of creating a favorable environment to stimulate innovative growth and reduce costs in the course of knowledge sharing and, as a consequence, to increase the rate of learning. The results of this research can be used to stimulate development of innovation processes in the oil and gas sector.

Keywords: *hydrocarbon production; new development objects; new types of hydrocarbon production objects; forecasting; knowledge generation; learning curves; innovation; hard-to-recover oil reserves*

For citation: Kryukov, V.A., Abuksis, J., Dushenin, D. I. (2025). Correlation between the “Learning effect” and Hydrocarbon Recovery Dynamics. *ECO*. No. 3. Pp. 83–96. (In Russ.). DOI: 10.30680/ECO0131-7652-2025-3-83-96

Information about the authors

Kryukov, Valery Anatolievich (Novosibirsk) – Academician of the RAS, Doctor of Economic Sciences, Professor. Institute of Economics and Industrial Engineering, SB RAS; National Research University Higher School of Economics (Moscow).

E-mail: valkryukov@mail.ru; ORCID: 0000-0002-7315-6044

Abuksis, Jihad (Moscow) – PhD student.

National Research University Higher School of Economics.

E-mail: gabu@hse.ru; ORCID: 0000-0002-4965-3622

Dushenin, Dmitry Igorevich (Novosibirsk) – Candidate of Physical and Mathematical Sciences. Institute of Economics and Industrial Engineering, SB RAS.

E-mail: dmdushenin@mail.ru; ORCID: 0000-0001-8132-2471