

### ГЕНЕРАЦИЯ НОВЫХ ЗНАНИЙ В РЕСУРСНОМ СЕКТОРЕ ЭКОНОМИКИ<sup>1</sup>

**КРЮКОВ Валерий Анатольевич**, академик РАН, valkrvukov@mail.ru, Центр ресурсной экономики; Институт экономики и организации промышленного производства Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия  
ORCID: 0000-0002-7315-6044

**МИЛЯЕВ Дмитрий Владимирович**, к.э.н., milyaev.dv@yandex.ru, Институт экономики и организации промышленного производства Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия  
ORCID: 0000-0002-4620-2164

**ДУШЕНИН Дмитрий Игоревич**, к.ф.-м.н., dmdushenin@mail.ru, Институт экономики и организации промышленного производства Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия  
ORCID: 0000-0001-8132-2471

**САВЕЛЬЕВА Анастасия Денисовна**, anastasiya.savelieva13@yandex.ru, Институт экономики и организации промышленного производства Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия  
ORCID: 0000-0002-4648-2573

**СКУЗОВАТОВ Максим Юрьевич**, к.г.-м.н., skuzovatovmj@gmail.com, Институт экономики и организации промышленного производства Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия  
ORCID: 0000-0002-9035-2741

*В статье представлен математический аппарат, позволяющий прогнозировать развитие инновационных технологий, создающих основу для рентабельного освоения трудноизвлекаемых запасов углеводородного сырья. Авторский подход представляет симбиоз агентных моделей, байесовских сетей, кривых обучения, статистического анализа и численных методов имитационного моделирования. Обозначенные приемы ранее не применялись комплексно в исследованиях, связанных с нефтегазовой отраслью. Практическая значимость модельного инструментария заключается в приоритизации мер, направленных на инновационный рост в нефтегазовом секторе. Апробация подхода выполнена на основе тестовых расчетов для трех объектов: сложнопостроенных структур Предпатовского прогиба Восточной Сибири и Республики Саха (Якутия), залежей доюрского комплекса юго-востока Западной Сибири и природных битумов Республики Татарстан. Расчеты подтверждают рабочую гипотезу о целесообразности формирования технологических кластеров для эффективной добычи трудноизвлекаемых углеводородов.*

*Ключевые слова:* инновационная экономика, трудноизвлекаемые запасы, математическое моделирование, агентное моделирование, байесовская сеть.

DOI: 10.47711/0868-6351-192-28-41.

**Введение.** Россия обладает колоссальными ресурсами трудноизвлекаемых запасов (ТРИЗ) углеводородов. По причине постепенного истощения традиционных источников углеводородного сырья будущее российской нефтегазовой отрасли напрямую связано с возможностью промышленного освоения ТРИЗ, которое на данный момент сдерживается отсутствием эффективных и одновременно доступных по стоимости технологий их поиска и добычи.

---

<sup>1</sup> Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 19-18-00170 «Трансформация процессов развития российского ресурсного сектора в условиях становления экономики знаний».

Инновационное развитие как частный случай экономики знаний можно осмысленно стимулировать при наличии определенных умений и возможностей [1]. В связи с этим формируется интересная задача: что конкретно должно произойти, чтобы разработка определенных типов ТРИЗ перестала быть убыточной? Моделированию, связанному с решением этой проблемы в нефтегазовой отрасли, пока не оказывалось необходимого внимания исследователей. Для данных целей авторы предлагают методологию, объединяющую подходы агентного и классического имитационного моделирования [2-4], байесовских сетей, кривых обучения и статистического анализа.

В качестве апробации подхода проведены тестовые расчеты для трех типов ТРИЗ, каждый из которых обладает присущими ему особенностями:

- складчато-надвиговые ловушки Предпатомского регионального прогиба Восточной Сибири и Республики Саха (Якутия) требуют проведения высокоплотных геофизических работ;

- углеводородные залежи доюрского комплекса юго-востока Западной Сибири практически не поддаются оконтуриванию стандартными методами сейсморазведки;

- природные битумы Республики Татарстан по причине сверхвысокой вязкости трудно извлекаются на поверхность с помощью существующих технологий.

**Модель инновационного развития в нефтегазовой отрасли.** Промышленному освоению запасов, которые относят к трудноизвлекаемым, препятствует технологическая неготовность добывающих предприятий. Необходим качественный инновационный скачок, который улучшит экономическую привлекательность ТРИЗ – повысит производственную эффективность и снизит инвестиционные риски.

Прогноз разработки и внедрения новой технологии – нетривиальная задача ввиду высокой неопределенности производственных и финансовых показателей. В связи с этим привычные методы инвестиционного анализа малопригодны и требуется более сложный математический аппарат.

Задачу моделирования инновационной деятельности можно разбить на две подзадачи:

- определение требуемого состояния развития технологии;

- поиск условий достижения такого состояния.

Результатом для конкретного типа ТРИЗ должен стать практически применимый комплекс технологических и организационно-правовых механизмов, который в обозримом будущем позволит создать условия для рентабельного освоения объекта исследования.

Авторский подход к решению первой подзадачи заключается в применении порогового анализа, второй – в построении байесовской сети с использованием кривых обучения (рис. 1).

Каждая технология обладает набором характеристик, определяющих стоимость ее разработки, приобретения и последующего использования, применимость к конкретной задаче, производительность в тех или иных режимах эксплуатации. Комбинация значений характеристик определяет *состояние* развития технологии.

Модернизация технологии может заключаться как в снижении ее себестоимости, так и в повышении производственной эффективности. Тем самым, искомым является множество всех *целевых* состояний, удовлетворяющих заданным критериям: например, положительной ожидаемой доходности ( $EMV > 0$ )<sup>2</sup>, социально-экологическим требованиям (ESG обязательствам)<sup>3</sup>, корпоративному бюджету на модернизацию производства и т.д. Вычислительная процедура такого порогового анализа предполагает построение производственно-инвестиционной модели [5] и с ее помощью отбора целевых состояний технологии из множества всех возможных комбинаций.

---

<sup>2</sup> *Expected Monetary Value.*

<sup>3</sup> *Environmental, Social, Governance.*



Рис. 1. Схема моделирования инновационного развития, необходимого для освоения ТРИЗ

Метод перебора – самый простой способ реализации порогового анализа, но из-за трудоемкости вычислений он применяется только для вырожденных, как правило, сильно упрощенных задач. В работе [6] изложен практический подход, радикально сокращающий число расчетов на основе постепенного исключения заведомо нецелевых комбинаций.

Когда найдены целевые состояния развития технологии, необходимо сопоставить их с объективными реалиями: весьма вероятно, что все или большинство состояний в настоящее время не могут быть достигнуты. Например, для рентабельной добычи природных битумов потребуется удешевление технологии парогравитационного дренирования (SAGD)<sup>4</sup>. С какой вероятностью, за какой срок и какими средствами может быть достигнуто целевое состояние технологии? Ответы могут быть получены путем моделирования совместной инновационной деятельности предприятий.

Классически для проведения НИОКР формируется организационно-правовая единица, так называемый «научный кластер», состоящий из одного или нескольких агентов: недропользователей, научных центров, сервисных компаний, инвесторов, государственных органов. *Состав* кластера определяет его возможность воздействовать на развитие технологии в направлении одного или нескольких целевых состояний, поскольку каждый агент привносит уникальный вклад в виде кадровых, материально-технических, финансовых ресурсов и компетенций. Как следствие, каждому потенциальному составу кластера можно сопоставить набор измеримых численных характеристик, влияющих на скорость развития технологии его силами.

В математической постановке это может быть реализовано в виде байесовской сети [7-10], имеющей структуру взвешенного направленного дерева – ациклического графа с единственным корнем, в каждую некорневую вершину которого будет вести лишь одна дуга (рис. 2).

<sup>4</sup> Steam-Assisted Gravity Drainage.

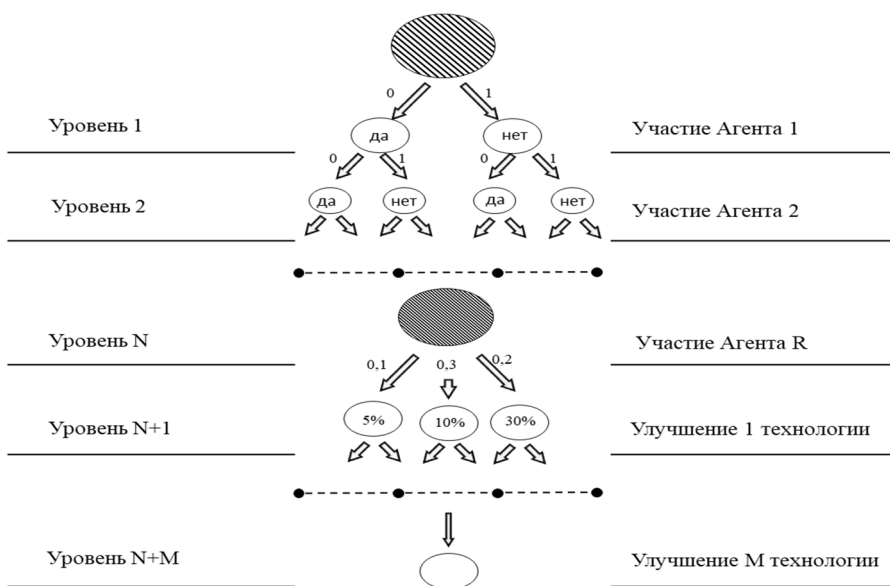


Рис. 2. Структура байесовской сети для прогноза технологических успехов кластера

Каждый путь байесовской сети от корня до концевой вершины соответствует отдельному сценарию развития технологии сформированным кластером. Первые R уровней пути содержат всю информацию о составе кластера, последующие M – все возможные направления совершенствования технологии. Вероятность наступления событий на верхних уровнях сети задается бинарными переменными, а для нижних оценка этой вероятности представляет нетривиальную задачу, решаемую с помощью кривых обучения (LC)<sup>5</sup>.

Кривые обучения обеспечивают математическое представление процесса обучения в процессе повторения задач. Эти кривые были первоначально предложены в 1936 г. для оценки снижения затрат и времени изготовления изделия в результате повторяющихся действий на производственных предприятиях [11]. Позднее подход был модифицирован для моделирования технологического развития [12].

По сравнению с экспертными оценками LC имеют неоспоримые преимущества, так как строятся на основе ретроспективы совершенствования реальных технологий, близких к исследуемой по концепции развития. К недостаткам LC можно отнести эмпирический характер зависимостей и чувствительность к случайным экстремальным значениям в исходных данных.

Можно обозначить два типа кривых обучения: многофакторные (зачастую двухфакторные – TFLC)<sup>6</sup> и однофакторные (OFLC)<sup>7</sup>. Первые выделяют два наиболее влиятельных фактора: обучение делом (производство) и обучение исследованием (НИОКР). Согласно кибернетическому подходу, невозможно провести различие между этими эффектами [13-15]. Они действительно существуют и оказывают совместное неотделимое влияние на процесс обучения. Ограниченная доступность согласованных наборов данных снижает надежность TFLC.

<sup>5</sup> Learning Curve.

<sup>6</sup> Two-Factor Learning Curve.

<sup>7</sup> One-Factor Learning Curve.

Вторые оперируют только с накопленными знаниями, измеряемыми в физическом или денежном выражении. Они менее требовательны к исходным данным и могут быть описаны любой функцией (линейной, логарифмической, экспоненциальной и т.д.).

В данной работе мы используем OFLC следующего общего вида:

$$Y = a \cdot \ln(X) + b, \quad (1)$$

где  $X$  – основной по степени влияния фактор (например, инвестиции в развитие технологии);  $a, b$  – численные коэффициенты.

В общем случае LC рассматривают обучение как детерминированный процесс, но существуют подходы, позволяющие учесть его стохастическую природу [16]. Один из них описан ниже в виде последовательности действий и упрощенно проиллюстрирован на рис. 3.

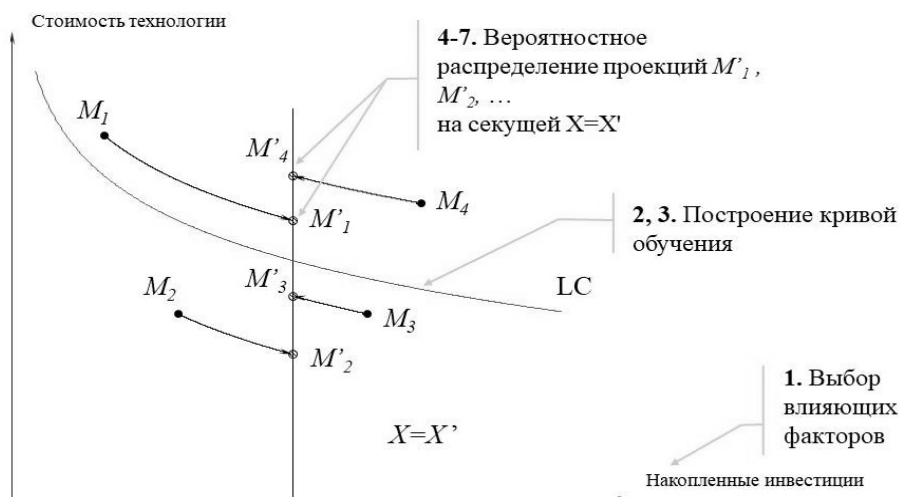


Рис. 3. Вероятностный анализ кривых обучения

1. Выбирается основной по степени влияния фактор в зависимости от специфики рассматриваемого события (дуги) байесовской сети.

2. Строится зависимость (1) целевого индикатора от влияющего фактора по принципу минимального суммарного отклонения от ретроспективных точек  $M_1, M_2, \dots$

3. Полученная кривая (1) и все точки  $M_i$  нормируются таким образом, чтобы максимально соответствовать истории развития и текущему состоянию технологии, которую предстоит развивать.

4. К графику LC добавляется прямая  $X = X'$ . Точка ее пересечения с LC соответствует детерминированной оценке  $Y$  в результате вложений  $X'$  инвестиций.

5. Пусть  $\{M_1(X_1, Y_1), \dots, M_n(X_n, Y_n)\}$  – множество точек, по которым строится LC. Для каждого  $i \in \{1, \dots, n\}$  определяется проекция  $M'_i(X'_i, Y'_i)$  точки  $M_i(X_i, Y_i)$  на прямую  $X = X'$  – пересечение графика функции  $Y = a \cdot \ln(X) + (Y_i - a \cdot \ln(X_i))$  с данной прямой (рис. 3). С помощью элементарных преобразований вычисляются координаты проекции:  $M'_i(X', a \cdot (\ln(X') - \ln(X_i)) + Y_i)$ .

6. Множество  $\vec{Y}' = \{Y'_1, \dots, Y'_n\}$ , составленное из вторых координат точек  $\{M'_1, \dots, M'_n\}$ , является выборкой из распределения случайной величины – влияния эффекта обучения на эффективность технологии после  $X'$  инвестиций.

7. С помощью классических методов проверки статистических гипотез подбирается вероятностное распределение, которому принадлежит выборка  $\vec{Y} = \{Y'_1, \dots, Y'_n\}$ . В противном случае по выборке  $\vec{Y}$  строится эмпирическая функция распределения, используемая для вероятностного анализа эффекта обучения. Она и является искомой, поскольку позволяет строить различные вероятностные сценарии для моделирования процесса обучения.

Таким образом, кривая обучения позволяет определять так называемые «веса дуг байесовской сети». Далее вероятность реализации сценария развития технологии вычисляется на основе перемножения весов всех дуг выбранного пути.

В результате описанных вычислений находится вероятностное распределение потенциальных состояний технологии, а главное – вероятность достижения ее целевого состояния. Соответствующий путь байесовской сети характеризует механизм инновационного развития.

**Объекты апробации.** Первым объектом апробации описанного метода стали перспективные на углеводороды (УВ) сложностроенные структуры Предпатомского регионального прогиба, расположенного в юго-восточной части Лено-Тунгусской провинции и непосредственно примыкающего к горно-складчатым сооружениям Патомского нагорья. Эти структуры слабо изучены геолого-геофизическими методами, но они привлекательны для поисков нефти и газа по причинам схожести геологического строения с другими подобными объектами с установленной промышленной нефтегазоносностью, а также близости к магистральным нефтепроводам «Восточная Сибирь – Тихий Океан» и газопроводу «Сила Сибири».

Особенности территории Предпатомского прогиба заключаются в сложных поверхностных и глубинных сейсмогеологических условиях; в связи с этим достоверные результаты сейсморазведочных работ могут быть получены только при высокой плотности наблюдений и усовершенствовании методики буровзрывных работ. Повышение эффективности геологоразведки также может быть достигнуто за счет проведения опережающих сейсморазведочных работ 3D (детализированных) на ранней разведочной стадии.

Данные факторы значительно увеличивают стоимость полевых работ, а риски отрицательных результатов поискового бурения остаются высокими по сравнению с традиционными месторождениями. В настоящий момент поиск и освоение скопленных УВ в этом районе являются нерентабельными.

В качестве *второго* объекта апробации были выбраны залежи доюрского комплекса юго-востока Западной Сибири, имеющие блоковый характер и отличающиеся резким латеральным изменением вещественного состава пород, типа коллектора и его фильтрационно-емкостных свойств.

Сложность геологического строения объектов доюрского комплекса приводит к низкой эффективности стандартной сейсморазведки МОГТ 2D<sup>8</sup> в силу невозможности точного определения границ водонефтяного контакта. Расхождение по результатам бурения и данных сейсморазведки может достигать 150 м, что сопоставимо, а в некоторых случаяхкратно превышает размеры открытых в доюрском комплексе залежей. В свою очередь, некорректность определения местоположения поисковых и разведочных скважин из-за недостатка геологической информации приводит к внушительному удорожанию геологоразведочных работ за счет лишнего пробуренного метража. Более того, корректная оценка крупности залежей может быть получена лишь на последних этапах разведки, что, естественно, увеличивает объем рискованного капитала проекта и тем самым занижает показатель ожидаемой доходности (EMV).

<sup>8</sup> Метод общей глубинной точки 2D.

Перспективы рентабельного освоения доюрских отложений могут быть связаны с модернизацией современных методов сейсмической разведки в комплексе с другими геофизическими и геохимическими методами, а также с усовершенствованием подходов к их интеграции с доступными скважинными данными.

*Третий* объект апробации – природные битумы Республики Татарстан. Это в различной степени сверхвязкие производные нефти, залегающие на глубинах от 30 до 400 м, скважинная добыча которых связана с использованием термических методов воздействия на пласт.

В настоящий момент существуют пилотные проекты по испытанию модифицированной технологии парогравитационного дренирования (SAGD)<sup>9</sup>, которая совместно с обработкой пласта растворителем, термогелевым и кислотным составом позволяет достичь дебитов нефти выше 20 т/сутки.

Тем не менее, технология скважинной добычи битумных месторождений в настоящее время является слишком дорогой, чтобы считать ее экономически привлекательной без государственной поддержки.

**Апробация модели.** В расчетах рассматриваются типовые углеводородные структуры с усредненными геолого-промысловыми характеристиками, взятыми с месторождений-аналогов.

Данные о стоимостных показателях были получены из отчетов предприятий нефтегазового сектора за 2015-2020 гг., технологических схем разработки и протоколов заслушиваний недропользователей территориальными органами по сопоставимым объектам недропользования и индексированы к текущему моменту времени. Предварительно была проведена аналитическая обработка значений по критериям достоверности и информативности [17] и оценена степень влияния структурных и инфраструктурных факторов. На основе этого выделена ключевая группа «надежных» данных для использования в расчетах.

Аккумулированная база данных содержит информацию более чем по 70% участков распределенного фонда, что соответствует требованию репрезентативности используемой в анализе выборки.

В целях апробации и демонстрации практического применения описанного метода выбран сценарий инновационной деятельности технологического кластера, образованного тремя агентами: двумя крупными недропользователями и одним научным институтом. Все агенты при этом непосредственно участвуют в разработке технологии, а инвесторами являются недропользователи, обеспечивающие годовой бюджет НИОКР в размере 5 млрд. руб. Необходимо отметить, что тестовый расчет не претендует на высокую точность: детализация и конкретизация исходных показателей повысят достоверность результата.

Принимаем в качестве допущения, что тренд развития искомой технологии будет подобен тому, который наблюдался для сопоставимой технологии гидроразрыва пласта (ГРП), ретроспектива становления которой хорошо известна. Для построения кривой обучения по стоимости и производительности ГРП нами использованы данные отчетов Управления энергетической информации США (U.S. EIA) [18; 19]. На множестве агрегированных данных по месторождению Баккен нами установлены две зависимости. Первая – между объемом накопленных вложений в бурение эксплуатационных скважин (характеристика усилий) и длиной части ствола скважины, приходящейся на одну стадию ГРП (характеристика производительности). Вторая – между накопленными вложениями в развитие технологии и затратами на разовое проведение операции ГРП (характеристика удешевления).

---

<sup>9</sup> См. сноску 4.

Для обеспечения необходимой полноты статистики исходная выборка была расширена алгоритмами семплирования. В результате установлены динамика роста эффективности (рис. 4а) и динамика снижения стоимости (рис. 4б) ГРП в зависимости от накопленных затрат, характеризуемые кривыми обучения.

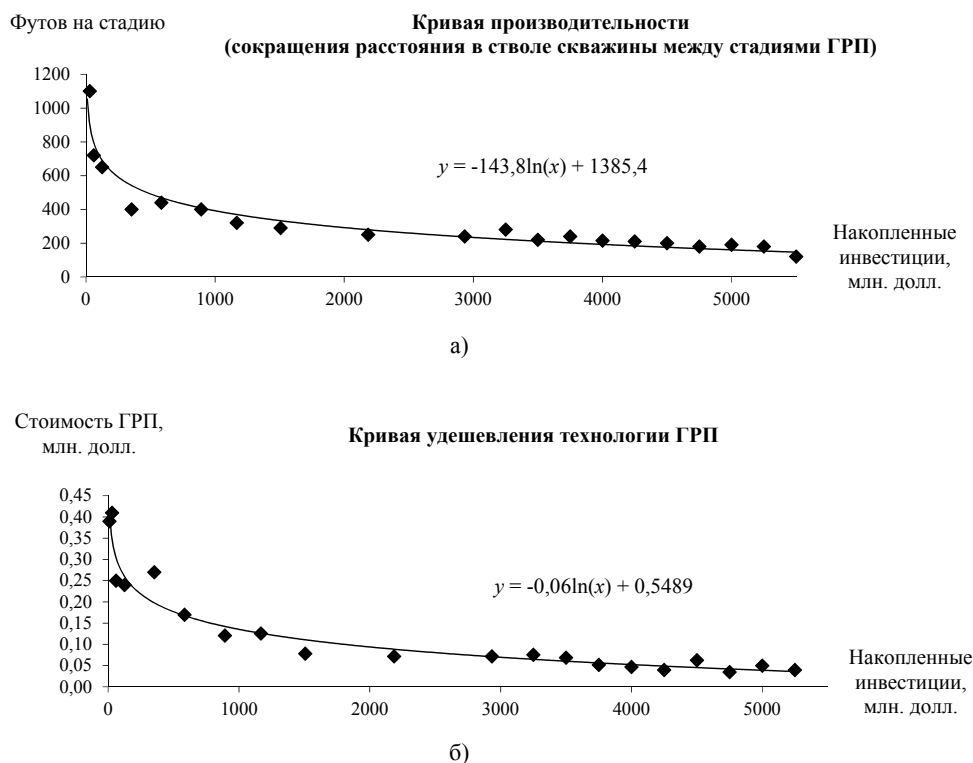


Рис. 4. Динамики роста эффективности (а) и снижения стоимости (б) ГРП

#### 1. Сложностроенные структуры Предпатомского регионального прогиба.

В качестве ключевой была принята технология поисковых работ, повышающая кондиционность геолого-геофизических материалов и, соответственно, увеличивающая шансы успешного поиска. Отметим, что в среднем по стране успешность поискового бурения составляет примерно 0,33 [20], для объектов Предпатомского прогиба она оценивается на уровне 0,2.

Считаем, что риски отрицательного результата геологоразведочных работ, то есть завершения проекта без открытия месторождения, сохраняются до бурения первой поисковой скважины, что, как правило, соответствует инвестициям в размере около 0,6 млрд руб. Эта сумма представляет собой рисковый капитал поискового проекта.

Целью порогового анализа является поиск сочетания характеристик эффективности полевых работ и минимально допустимого объема извлекаемых запасов типового объекта, гарантирующих неотрицательность показателя EMV. Специфика Предпатомского прогиба была учтена посредством вариации успешности поискового бурения, поскольку именно на ее повышение нацелена инновационная технология поисковых работ. Были рассмотрены три «целевых» состояния развития технологии, соответствующие достижению значений коэффициента успешности бурения, равных 0,25; 0,33 и 0,5. Для окупаемости проекта необходимо, чтобы в случае



подтверждения залежи показатель  $NPV^{10}$  от освоения недр был не менее 1,8; 1,2 и 0,6 млрд. руб., соответственно. Пороговый анализ указал на выполнение обозначенных условий в случае открытия месторождения с 15-ю, 14-ю и 12-ю млн. т извлекаемых запасов нефти для трех обозначенных сценариев.

На следующем шаге показанная на рис. 4 кривая производительности была адаптирована к искомой технологии – инвестиции нормированы относительно стоимости ее применения, а также определена точка, характеризующая текущее состояние ее развития. Так как уровень годовых вложений зафиксирован условиями задачи, ось абсцисс адаптированной кривой заменена на временную шкалу. Ось ординат ассоциируется с риском бурения сухой скважины, который должен снижаться с усовершенствованием технологии (рис. 5.1).

Условимся считать инновационную деятельность предприятий кластера успешной, если вероятность повышения эффективности поисковой технологии до минимально необходимого уровня составит не менее 0,7. Графически это показано на рис. 5.2 кривой LC70, характеризующей прогноз эффекта обучения с заданной вероятностью. Построение LC70 выполнено аналогично рис. 3, а именно: для каждой точки кривой LC рассмотрено множество проекций на вертикальную ось, по полученной выборке построено вероятностное распределение  $P_0 - P_{100}$ , определена точка, соответствующая P70.

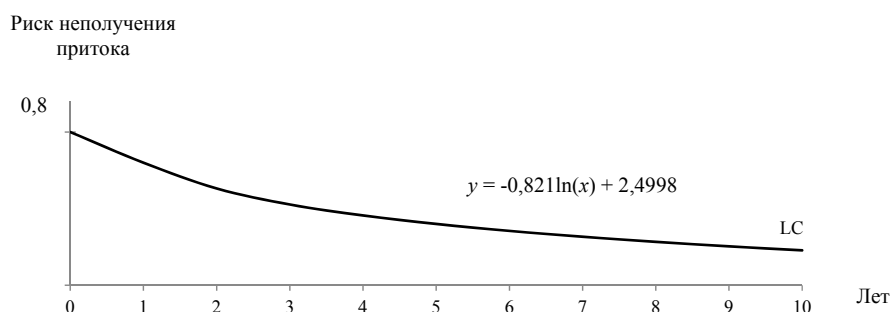


Рис. 5.1. Построение 1. Кривая снижения рисков бурения сухих скважин на Предпатомском прогибе (в общем виде)

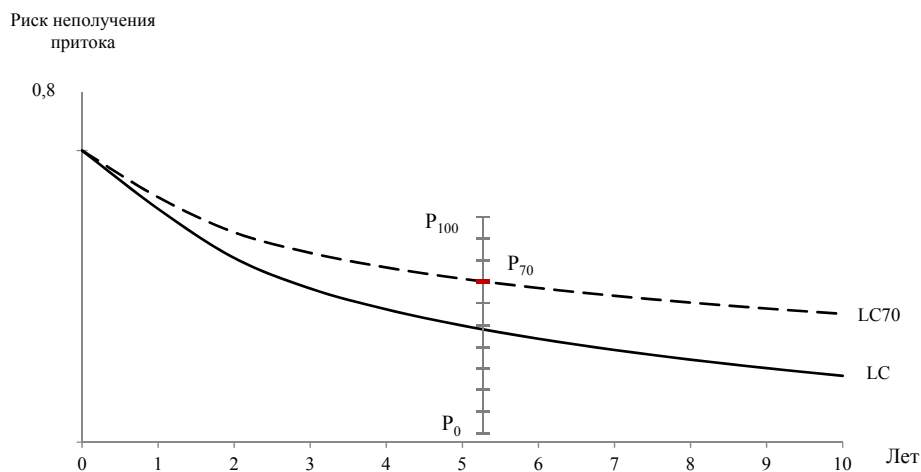


Рис. 5.2. Построение 2. Кривая снижения рисков бурения сухих скважин на Предпатомском прогибе (с вероятностью 70%)

<sup>10</sup> Net Present Value.

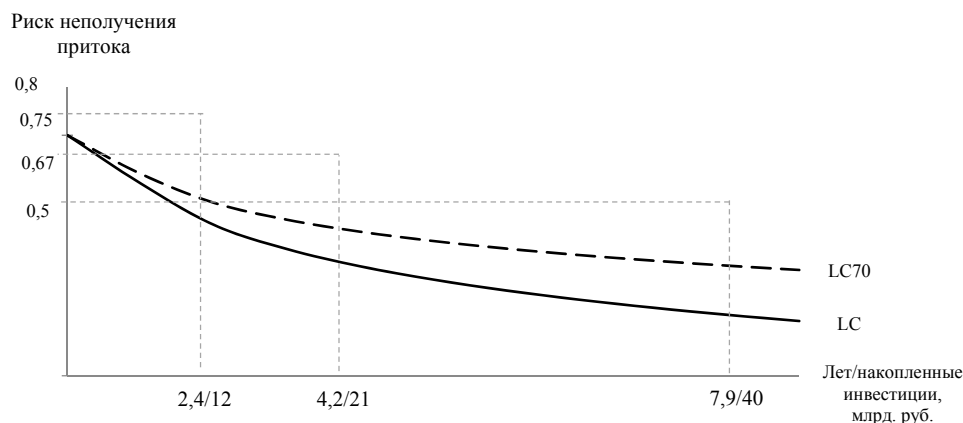


Рис. 5.3. Построение 3. Определение моментов достижения искомого значения коэффициента успешности поискового бурения

На практике повышение успешности поискового бурения достигается совокупным улучшением ряда специализированных приемов – сейсморазведочных работ, сейсмических методов, процедур обработки и интерпретации полевых данных, их комплексированием и увязкой с геологической моделью и т.д. В рассматриваемом упрощенном примере все эти направления возможных улучшений для простоты сведены к одному показателю – коэффициенту успешности бурения. В таком вырожденном случае нет необходимости строить многоуровневую байесовскую сеть, поскольку момент достижения искомого значения показателя определяется по кривой LC70 очевидным образом (см. рис. 5.3).

Инновационная деятельность технологического кластера в составе двух крупных нефтепользователей и одного научного института, согласно расчету, может уже через 4,2 года снизить риск неполучения притока в поисковых скважинах на территории Предпатомского прогиба до 67% (рис. 5.3, табл. 1), что соответствует среднему по стране.

Таблица 1

Прогноз развития технологии поисковых работ для Предпатомского регионального прогиба

Срок развития технологии, лет	Инвестиции в развитие технологии, млрд. руб.	Целевое состояние		
		Риск неполучения притока	Успешность поискового бурения	Объем извлекаемых запасов нефти, млн. т
2,4	12	0,75	0,25	15
4,2	21	0,67	0,33	14
7,9	39,5	0,5	0,5	12

Применение авторского подхода к другим видам ТРИЗ рассмотрим вкратце, поскольку идеология расчетов аналогична той, которая представлена в первом примере.

2. Углеводородные залежи доюрского комплекса юго-востока Западной Сибири.

Для освоения второго объекта апробации требуется усовершенствование технологии комплексной интерпретации скважинных данных в увязке с результатами сейсморазведочных работ, в том числе выполненных корреляционным методом преломленных волн (КМПВ), и других геофизических и геохимических исследований. Ожидаемый результат – повышение коэффициента подтверждаемости запасов залежей доюрского комплекса,

оцененных до бурения. В настоящее время он составляет около 0,25, что является недостаточным для получения положительного показателя EMV в данном поисковом проекте.

В связи с низкой эффективностью геофизических методов разведки для данных объектов рисковый капитал составляет 0,9 млрд. руб. (включая затраты на бурение двух разведочных скважин и предшествующие геологоразведочные работы).

Аналогично первому примеру, для различных значений коэффициента подтверждения запасов были посчитаны минимальные требования к NPV проекта и запасам найденного месторождения, а затем оценен момент достижения требуемого состояния технологии с вероятностью более 0,7 (табл. 2).

Таблица 2

Прогноз развития технологии комплексной интерпретации скважинных данных по доюрскому комплексу юго-востока Западной Сибири

Срок развития технологии, лет	Инвестиции в развитие технологии, млрд. руб.	Целевое состояние		
		Коэффициент подтверждаемости запасов	NPV, млрд. руб.	Объем извлекаемых запасов нефти, млн. т
2,1	10,5	0,3	2,1	7
5,6	28	0,4	1,4	6
6,9	34,5	0,5	0,9	4

### 3. Битумы Республики Татарстан.

Как было отмечено ранее, ключевой технологией при скважинной добыче битумов в Татарстане является SAGD. В связи с низкими нефтенасыщенными толщами битумных залежей в ближайшем будущем вряд ли можно ожидать кратного повышения дебитов добывающих скважин, поэтому в данном примере применения модельного инструментария предлагается сделать акцент на перспективы снижения затрат в результате использования существующей технологии.

В настоящее время эксплуатационные затраты на скважинную добычу битумов в России примерно в 4 раза выше, чем на извлечение традиционной нефти. При этом капитальные затраты в 3 раза выше, чем на типичных месторождениях, в связи с необходимостью бурения парных скважин и дороговизны их конструкций [21]. В рамках апробации модели были оценены возможности удешевления технологии SAGD с вероятностью не менее 0,7 (табл. 3).

Таблица 3

Прогноз удешевления технологии SAGD для извлечения битумов в Республике Татарстан

Срок развития технологии, лет	Инвестиции в развитие технологии, млрд. руб.	Удешевление SAGD, %
2,2	11	20
4,7	23,5	35
7,8	39	50

**Выводы.** В текущих реалиях приоритеты и задачи инновационно-технологического и научного развития становятся первостепенными и формируют новую экономическую парадигму. В настоящее время инновация – ключевой фактор экономического роста. Уровень развития инновационных процессов формирует направления и темпы отраслевого, регионального и национального развития, способствует улучшению экономических показателей в целом. Иначе говоря, процесс разработки ин-

новационно-технологических решений уже на самых начальных этапах является импульсом к развитию экономики на разных уровнях. Задача исходит из потребности экономики в постоянном увеличении эффективности, что актуально для каждого сектора без исключения. Тогда отраслевая экономика определяется как лидер в направлении инновационного развития, наращивает инновационный потенциал. Регионы отраслевой специализации становятся центрами инновационного прогресса, притяжения инвестиций и капитала. Это стимулирует их ускоренное социально-экономическое развитие, которое по цепочке межрегиональных и межотраслевых связей распространяется и оживляет национальную экономику в целом.

Согласно Глобальному индексу инновационного развития 2021 г., Россия за последний год поднялась на две ступени с 47-го на 45-е место среди 132 стран [22]. Драйверами инновационного роста стали рынок, наука, человеческий капитал – масштабность внутреннего рынка, насыщенность экономики высококвалифицированными кадрами, их вовлеченность в процессы инновационно-технологического развития и результаты их интеллектуальной деятельности. Но выделяются и слабые стороны, связанные с незрелостью конъюнктуры инновационного развития: низкая инвестиционная активность, несформированная законодательная база данного направления и слабая институциональная инфраструктура.

Индекс показывает динамику изменения всех элементов инновационного развития и подчеркивает важность продуктивного взаимодействия между ключевыми субъектами инноваций – компаниями, государственными институтами, научно-исследовательскими организациями и обществом – в контексте инновационной трансформации экономической системы. Воссоздание именно этого процесса и оценка его эффективности стали первоочередной задачей авторов в рамках исследования.

На примере точек инновационного роста нефтегазовой отрасли (как ключевой для российской экономики) в рамках исследования изучен процесс объединения субъектов инноваций для совместного решения приоритетных задач.

Для этого авторами разработан комплексный инструментарий, позволяющий прогнозировать динамику развития инновационно-технологических процессов и, как следствие, последующих изменений экономики на отраслевом, региональном и национальном уровнях.

Уникальность предложенного алгоритма заключается в применении связанного комплекса математических подходов, ранее не находивших применения для решения задач подобной специфики. Используются методы порогового анализа для определения целевых ориентиров инновационного развития, принципы агентного моделирования для формализации взаимодействия участников научно-технологической деятельности, результативность которой оценивается посредством вероятностной модели байесовской сети, а также применена теория кривых обучения для моделирования траектории развития технологии.

Ключевым преимуществом подхода является возможность комплексного моделирования процесса разработки технологических решений и построения сценариев, связанных с достижением искомого состояния развития технологий. Например, согласно упрощенному тестовому расчету, для технологии парогравитационного дренирования (SAGD) при разработке битумов Республики Татарстан сценарий развития заключается в ее удешевлении на 20-50% при сроке развития технологии от 2,2 до 7,8 лет. Соответствующий региональный экономический эффект применения технологии состоит в увеличении доходов регионального бюджета в части налога на прибыль с добычи битумов – на 5-10% (в зависимости от степени удешевления и срока отработки технологических решений), а также в части регулярных платежей за пользование недрами – на 500-700 млн. руб., по сдержанным оценкам. Помимо этого, потенциально возрастут объемы разовых платежей за пользование недрами, доходы от дивидендов по акциям нефтяных компаний, принадлежащим Республике, НДС и иных сопутствующих поступлений.

Статья ориентирована на моделирование процесса развития технологических решений в нефтегазовом секторе, но предложенный аппарат универсален и может применяться для любой отрасли. Вместе с тем, его использование сопряжено с полнотой исходной базы знаний, определяющей возможность и достоверность построения траектории технологического развития. Поэтому дальнейшее совершенствование предложенного инструментария возможно в тесном взаимодействии с экспертами различных отраслей, при наполнении и расширении существующей информационной базы исследования.

### Литература / References

1. Cooke P., Leydesdorff, L. *Regional Development in the Knowledge-Based Economy: The Construction of Advantage* // *The Journal of Technology Transfer*. 2006. No. 31 (1). Pp. 5-15.
2. Macal Charles M. and Michael J. North. *Tutorial on Agent-Based Modelling and Simulation* // *Journal of Simulation*. 2005. No. 4. Pp. 151-162.
3. Bonabeau Eric. *Agent-based Modeling: Methods and Techniques for Simulating Human Systems* // *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2002. No. 99. Pp. 7280-7287.
4. Turrell Arthur E. *Agent-Based Models: Understanding the Economy from the Bottom Up*. ERN: *Simulation Methods (Topic)*. 2016. URL: [www.bankofengland.co.uk](http://www.bankofengland.co.uk)
5. Dushenin D., Milyaev D. *Automation of the Analysis of the Efficiency of Geological Exploration for Oil and Gas* // *Conference Proceedings, Geomodel. European Association of Geoscientists & Engineers*. 2018. Sep. 2018. Pp. 1-5. URL: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201802353>
6. Milyaev D.V., Kidanova O.A., Dushenin D.I. *Determination of Threshold Values for the Solution of the Multiparametric Problem of Assessing the Efficiency of Geological Exploration* // *Conference Proceedings, Mathematics in the Modern World*. Aug 2017. Pp. 567-567.
7. Abdulkareem S.A., Mustafa Y.T., Augustijn E.W., Filatova T. *Bayesian Networks for Spatial Learning: a Workflow on Using Limited Survey Data for Intelligent Learning in Spatial Agent-Based Models* // *Geoinformatica*. 2019. Vol. 23. No. 2. Pp. 243-268.
8. Druzdel M.J., Gaag L.C. *Building Probabilistic Networks: Where Do the Numbers Come from?* // *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*. 2000. Vol. 12. No. 4. Pp. 481-486.
9. Ferat S. *Baesian Network Approach to the Self-organization and Learning in Intelligent Agents* // *Dissertation submitted to the Faculty of Virginia Polytechnic and State University in fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy in Electrical and Computer Engineering*. 2000. 251 p.
10. Murphy K.A. *Brief Introduction to Graphical Models and Bayesian Networks*. 2001. 19 p. URL: <http://www.cs.Berkeley.edu>
11. Yelle L.E. *The Learning Curve: Historical Review and Comprehensive Survey* // *Decision Sciences*. 1979. Vol. 10. Pp. 302-328.
12. Kryukov V.A., Gorlov A.A. *Forecasting the Development Process of Wind Energy in the North Sea Basin Based on Learning Curves* // *Studies on Russian Economic Development*. 2019. Vol. 30. No. 2. Pp. 177-184. URL: <https://link.springer.com/article/10.1134/S1075700719020084> DOI: 10.1134/S1075700719020084.
13. Van der Zwaan B.C.C., & Wene C.O. *Developments in Interpreting Learning Curves and Applications to Energy Technology Policy. In Learning Curves. Theory, Models, and Applications*. 2011. URL: <https://dx.doi.org/10.1201/b10957-26>
14. Wene C.O. *Technology Learning Systems as Non-trivial Machines* // *Kybernetes*. 2007. Vol. 36. No. 3/4. Pp. 348-363. URL: <https://doi.org/10.1108/03684920710747002>
15. Wene C.O. *Energy Technology Learning-Key to Transform into a Low-Carbon Society*. ISB. 2011. Pp. 978-953. URL: <https://www.intechopen.com/books/climate-change-re...-a-low-carbon-society>
16. Globerson S., Gold D. *Statistical attributes of the power learning curve model* // *International journal of production research*. 1997. Vol. 35. Issue 3. Pp. 699-711.
17. Савельева А.Д., Миляев Д.В., Душенин Д.И. *Формирование информационной основы в целях поиска новых углеводородных объектов. Минеральные ресурсы России // Экономика и управление*. 2020. № 6. С. 65-69. [Savelieva A.D., Milyaev D.V., Dushenin D.I. *An Information Base Formation for New Hydrocarbon Objects // Mineral Resources of Russia. Economics and Management*. 2020. No. 6. Pp. 65-69. (In Russ.)].
18. U.S. Energy Information Administration. (2021). *Drilling Productivity Report*. URL: <https://www.eia.gov/petroleum/drilling/pdf/dpr-full.pdf>
19. U.S. Energy Information Administration. (2016). *Annual Report «Trends in U.S. Oil and Natural Gas Upstream Costs»*. URL: <https://www.eia.gov/analysis/studies/drilling/pdf/upstream.pdf>
20. Галкин С.В. *Методология учета геологических рисков на этапе поисков и разведки нефтяных месторождений // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология, нефтегазовое и горное дело*. 2012. № 4. С. 22-32. [Galkin S.V. *Accounting Methods of Geological Risks on the Stage of Oil Fields Exploration* // *Bulletin of PNRPU. Geology. Oil and Gas Engineering and Mining*. 2012. No. 4. Pp. 22-32. (In Russ.)].
21. Череповицын А.Е., Ишкова Е.В. *Процессное управление как инструмент повышения эффективности разработки и освоения месторождений сверхвязкой нефти // Проблемы экономики и управления нефтегазовым комплексом*. 2015. № 11. С. 42-46. [Cherepovitsyn A.E., Ishkova E.V. *Process Management as an Instrument to Increase the Efficiency of Development and Exploitation of Extra-Viscous Oil Fields* // *Problems of Economics and Management of Oil and Gas Complex*. 2015. No. 11. Pp. 42-46. (In Russ.)].
22. Власова В.В., Гохберг Л.М. *Глобальный инновационный индекс – 2021 // Наука, технология, инновации. Сентябрь 2021*. URL: <https://issek.hse.ru/mirror/pubs/share/507879120.pdf> [Vlasova V.V., Gokberg L.M. *Global Innovation Index – 2021* // *Science, Technology, Innovation*. Sep. 2021. (In Russ.)].



Статья поступила 06.12.2021; Статья принята к публикации 30.12.2021

**Для цитирования:** *В.А. Крюков, Д.В. Миляев, Д.И. Душенин, А.Д. Савельева, М.Ю. Скузоватов.* Генерация новых знаний в ресурсном секторе экономики // Проблемы прогнозирования. 2022. № 3(192). С. 28-41.

DOI: 10.47711/0868-6351-192-28-41.

## Summary

### KNOWLEDGE GENERATION IN RAW MATERIAL INDUSTRIES

**V.A. KRYUKOV**, academician of RAS, professor, Center of resource economy, Institute of Economics and Industrial Engineering Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia  
ORCID: 0000-0002-7315-6044

**D.V. MILYAEV**, Cand. Sci. (Econ.), Institute of Economics and Industrial Engineering Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia  
ORCID: 0000-0002-4620-2164

**D.I. DUSHENIN**, Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Institute of Economics and Industrial Engineering Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia  
ORCID: 0000-0001-8132-2471

**A.D. SAVEL'eva**, Institute of Economics and Industrial Engineering Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia  
ORCID: 0000-0002-4648-2573

**M.Yu. SKUZOVATOV**, Cand. Sci. (Geol.), Institute of Economics and Industrial Engineering Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia  
ORCID: 0000-0002-9035-2741

**Abstract:** The article presents a mathematical toolkit for forecasting the development of innovative technologies that can be used for cost-effective development of hard-to-recover hydrocarbon reserves. The proposed approach is a symbiosis of agent-based models, Bayesian networks, learning curves, statistical analysis, and numerical simulation modeling methods. These techniques have not been used as a set in research related to the oil and gas industry ever before. The practical significance of the modeling toolkit is based on the prioritization of measures aimed at innovative growth in the oil and gas sector. To test the approach, calculations are performed for three objects: complex structures of the Predpatomsky trough in eastern Siberia and the Republic of Sakha (Yakutia), deposits of the Pre-Jurassic complex in the south-east of western Siberia, and natural bitumen in the Republic of Tatarstan. The calculations confirm the working hypothesis about the practicability of forming technological clusters for efficient extraction of hard-to-recover hydrocarbons.

**Keywords:** innovation economics, hard-to-recover reserves, mathematical modeling, agent-based modeling, Bayesian network.

Received 06.12.2021. Accepted 30.12.2021.

**For citation:** *V.A. Kryukov, D.V. Milyaev, D.I. Dushenin, A.D. Savel'eva, and M.Yu. Skuzovатов.* Knowledge Generation in Raw Material Industries // Studies on Russian Economic Development. 2022. Vol. 33, No. 3. Pp. 257-266.  
DOI: 10.1134/S1075700722030078.