

<https://doi.org/10.17073/2072-1633-2024-3-1303>

Эконофизическая модель распространения инноваций: модель Изинга

О.В. Жданеев^{1,2} , И.Р. Овсянников^{3,4}  

¹Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации, 119571, Москва, просп. Вернадского, д. 82, стр. 1, Российская Федерация

²Югорский государственный университет, 628012, Ханты-Мансийск, ул. Чехова, д. 16, Российская Федерация

³АО «Центр эксплуатационных услуг», 121099, Москва, Новинский б-р, д. 13/4, Российская Федерация

⁴Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), 141701, Долгопрудный, Институтский пер., д. 9, Российская Федерация

 ovsyannikov.ir@phystech.edu

Аннотация. При формировании технико-экономического обоснования инвестирования, анализа и оценки эффективности инноваций необходим инструмент описания и моделирования процесса распространения технологий в отрасли. В работе представлена модель распространения инноваций с применением физических подходов, описывающая точку насыщения рынка, т.е. точку, в которой экспоненциальный рост скорости распространения инновации сменяется логарифмическим. Объектом исследования является распространение инноваций, а предметом – разработка функционала точки насыщения рынка. Обосновано применение и описан подход к моделированию процесса насыщения рынка инновацией физической моделью Изинга. Значение инструментария модели Изинга представлено точкой Кюри в ферромагнетиках, которая характеризует фазовый переход 2-го рода. В работе представлена математическая модель соответствия физических параметров экономическим: величина межфирменного влияния, барьеры для внедрения и прорывность инновации. Приведено обсуждение ограничений и применимости данной модели, а также дальнейшие возможные направления исследований эконофизических моделей. Использование разработанного инструмента возможно во всех секторах экономики с целью повышения их уровня инновационной активности.

Ключевые слова: диффузия инноваций, эконофизика, математическое моделирование, физические модели в экономике, скорость распространения инноваций, управление инновациями, модель Изинга

Для цитирования: Жданеев О.В., Овсянников И.Р. Эконофизическая модель распространения инноваций: модель Изинга. *Экономика промышленности*. 2024;17(3):261–270. <https://doi.org/10.17073/2072-1633-2024-3-1303>

The economophysical model of the propagation of innovation: the Ising model

O.V. Zhdaneev^{1,2} , I.R. Ovsyannikov^{3,4}  

¹Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration, 82-1 Vernadsky Ave., Moscow 119571, Russian Federation

²Yugra State University, 16 Chekhova Str., Khanty-Mansiysk 628012, Russian Federation

³Joint Stock Company “Center of Operational Services”, 13/4 Novinsky Blvd, Moscow 121099, Russian Federation

⁴Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), 9 Institutsky Lane, Dolgoprudny, Moscow Region 141701, Russian Federation

 ovsyannikov.ir@phystech.edu

Abstract. The process of technical and economic justification of investment, analysis and evaluation of the effectiveness of innovation requires a tool for describing and modeling the process of distribution of technology in the industry. The work presents a model of

propagation of innovation involving physical approaches, describing the market saturation point, i.e. the point at which the exponential growth of the innovation propagation speed is replaced by the logarithmic growth. The object of the study is the propagation of innovation, and the subject is the development of the market saturation point functional. The authors justified the implementation and described the approach to modeling of the process of saturation of the market with innovation by the physical Ising model. The value of the Ising model's toolkit is presented by the Curie point in ferromagnets which characterizes the second order phase transition. The article presents the mathematical model of the compliance of physical parameters with economic ones: the amount of inter-company influence, barriers to implementation and breakthrough of innovation. The authors adduce the discussion of the limitations and applicability of this model as well as further potential directions of study of economophysical models. The tools developed by the authors can be used in all sectors of economics to improve their innovation activity level.

Keywords: diffusion of innovation, economophysics, mathematical modeling, physical models in economics, innovation propagation speed, innovation management, the Ising model

For citation: Zhdanov O.V., Ovsyannikov I.R. The economophysical model of the propagation of innovation: the Ising model. *Russian Journal of Industrial Economics*. 2024;17(3):261–270. <https://doi.org/10.17073/2072-1633-2024-3-1303>

Инновационная экономическая модель: модель Изинга

O.V. Жданев^{1,2} , I.R. Овсянников^{3,4}  

¹ Российский федеральный институт экономики и управления, 119571, Российская Федерация, Москва, Ленинский проспект, 13/15

² Углеродная академия, 628012, Российская Федерация, Ханты-Мансийский автономный округ, Ханты-Мансийск, Советская улица, 16

³ "Операционный центр" ООО, 121099, Российская Федерация, Москва, Ленинский проспект, 13/15

⁴ Московский физико-технический институт (государственный университет), 141701, Российская Федерация, Московская область, г. Долгопрудный, Пущинский бульвар, 9

 ovsyannikov.ir@phystech.edu

Аннотация: При проведении исследования инвестиционной возможности, анализа и оценки инновационной эффективности, требуется инструмент для описания и моделирования инновационного процесса в промышленности. В статье описана инновационная экономическая модель, описывающая процесс насыщения рынка инновациями. Модель описывает процесс насыщения рынка инновациями, в котором экспоненциальный рост скорости распространения инноваций сменяется логарифмическим. Объект исследования – распространение инноваций, предмет – развитие функционала точки насыщения рынка. Авторы обосновали реализацию и описали подход к моделированию процесса насыщения рынка инновациями с помощью физической модели Изинга. Значение инструментария модели Изинга представлено точкой Кюри в ферромагнетиках, характеризующей второй порядок фазового перехода. В статье представлена математическая модель соответствия физических параметров экономическим: количество взаимного влияния компаний, барьеры внедрения и прорыв инноваций. Авторы приводят обсуждение ограничений и применимости этой модели, а также дальнейшие потенциальные направления исследования экономическо-физических моделей. Разработанные инструменты могут быть использованы во всех секторах экономики для повышения уровня инновационной активности.

Ключевые слова: инновации, экономическая физика, математическое моделирование, физические модели в экономике, скорость распространения инноваций, управление инновациями, модель Изинга

Введение

Изменение геополитического ландшафта, вызванное разделением мира на конкурирующие техноэкономические блоки, порождает во многих странах долгосрочный тренд на технологический суверенитет. Для его обеспечения необходимо технологическое развитие, которое определяется в том числе уровнем инновационной активности. В этой связи необходима система мер, методологически описывающая стратегию технологической и инновационной деятельности компаний.

Эти вызовы актуальны и для России. По итогам 2023 года Россия занимает 51-е место в «Рей-

тинге Глобального инновационного индекса» среди 132 экономик мира и 31 место из 39 стран Европы [1]. В 2023 году Россия занимает 58-е место по объему инвестиций в инновации, что ниже показателей 2022 и 2021 гг. По объему инновационной продукции Россия занимает 53-е место, что также ниже значений предыдущих лет.

В сложившихся условиях одной из главных задач внедрения инноваций является анализ и оценка эффективности ее реализации, а также технико-экономическое обоснование для принятия решения об инвестировании. Так как инновационная деятельность связана с созданием новых или модификацией имеющихся товаров

и услуг, то главной проблемой планирования является качество и объем информации о предполагаемых изменениях, этапах и реализации инновационного проекта. Поэтому задача повышения качества анализа внедряемой инновации и планирование ее жизненного пути является первоочередной.

Современные работы, хотя и внесли значительный вклад в понимание процесса диффузии инноваций, часто ограничены рамками эконометрических методов, которые не всегда учитывают сложные и динамические аспекты этого процесса. Применение экономофизического подхода позволяет преодолеть эти ограничения, предоставляя модели, способные к масштабированию и динамике изменения влияющих факторов. Это, в свою очередь, открывает новые возможности для более глубокого анализа и прогнозирования поведения рынка на разных стадиях распространения инноваций, что имеет значительное практическое значение для разработки инструментов управления и поддержки инновационных процессов.

Цель работы – создание теоретической методологии анализа насыщения рынка инновациями для разработки полноценного инструмента. В связи с этим были сформулированы две задачи: представить концептуальное обоснование применимости экономофизического подхода для описания процесса распространения инноваций, а также функционально описать необходимый инструментарий, включающий проведение аналогии между экономикой и физикой.

Обзор методов моделирования диффузии инноваций

Экономический рост является одной из ключевых задач экономической науки и политики, поскольку определяет не только уровень благосостояния общества, но и его способность к развитию и конкурентоспособности в глобальной экономике [2]. В основе экономического роста лежит непрерывное увеличение объемов производства и размеров доходов в течение определенного периода.

Технический прогресс, в свою очередь, играет фундаментальную роль в стимулировании экономического роста. Он предусматривает разработку, внедрение и использование новых технологий, методов производства и продуктов, что приводит к повышению производительности труда и более эффективному использованию ресурсов. Примечательно, что технический прогресс также способствует появлению новых рынков, продуктов и услуг, стимулируя инвестиции и создавая новые возможности для экономического развития и роста.

Р. Солоу (R. Solow) предложил модель экономического роста, которая учитывает роль технологического прогресса в долгосрочном развитии экономики [3]. Основываясь на концепции производственной функции, он принял за основу положение о том, что капитал, рабочая сила и технический прогресс являются основными факторами, определяющими объем производства. Его модель продемонстрировала, что капитал и рабочая сила могут обеспечить лишь ограниченный уровень экономического роста, в то время как технический прогресс играет решающую роль в его поддержании. Ключевой особенностью модели Солоу является ее способность объяснить «парадокс производительности», при котором технологические инновации не всегда приводят к повышению производительности труда. Р. Солоу утверждал, что это происходит из-за временного разрыва между внедрением новых технологий и их влиянием на производство.

Переход от работ Р. Солоу к работам Э. Харбергера (A. Harberger) представляет собой важный этап в развитии понимания роли технического прогресса в экономическом росте [4]. В своем исследовании Э. Харбергер провел анализ влияния технического прогресса на экономический рост, выделив концепцию «остаточного эффекта». Основная идея Э. Харбергера заключалась в том, что технический прогресс оказывает неоднородное воздействие на различные секторы экономики. Некоторые отрасли быстро адаптируются к новым технологиям и эффективно используют их для повышения производительности, в то время как другие отстают и не в полной мере осваивают новые технологии. Таким образом, существует определенный «остаток» технологического прогресса, который не учитывается в стандартных моделях экономического роста.

Эта концепция поставила перед исследователями новые задачи при анализе распространения технологических инноваций и их влияния на экономический рост. Она предполагает не только изучение факторов, определяющих успешное внедрение новых технологий в различных секторах экономики, но и оценку последствий этого воздействия на экономическое развитие.

В настоящее время существуют два противоположных взгляда на природу технического прогресса: экзогенный и эндогенный [5]. В работах, посвященных анализу экзогенного технического прогресса, рост эффективности экономической системы рассматривается как независимый от уровня инвестиций, динамики численности рабочей силы и уровня их взаимодействия. При

этом эндогенный технологический прогресс не только изучает деятельность отдельных фирм или домохозяйств, но и учитывает влияние отдельных элементов системы (таких как состояние фундаментальных и прикладных исследований, скорость их внедрения и т.д.). Таким образом, значительный вклад в определение и изучение технологического роста вносят работы, исследующие процесс распространения инноваций между фирмами, в том числе с помощью инструментов диффузии.

Т. Хагерстранд (T. Hagerstrand) предложил учитывать пространственное распределение инноваций, используя методы Монте-Карло для моделирования распространения волн [6]. Это стало основой для дальнейших исследований в области географической диффузии и распространения инноваций в целом [7]. Первое систематическое описание диффузии инноваций было представлено в работе Э. Роджерса (E. Rogers) в 1962 г. [8]. Он разработал модель, описывающую процесс, посредством которого инновации передаются по определенным каналам между элементами социальной системы. Его модель включала категории принятия инноваций, каждая из которых характеризовалась своей скоростью и методом принятия, что позволило структурировать и прогнозировать процесс их распространения. Ф. Басс (F. Bass) предложил математическое обоснование модели Ф. Роджерса в 1969 г. [9]. Эта модель описывает процесс внедрения инноваций с помощью двух основных факторов: внешних воздействий, таких как реклама, и внутренних, связанных с межличностными коммуникациями. Модель Ф. Басса стала основой для дальнейших математических моделей распространения инноваций. В 1971 г. Дж. Фишер (J. Fisher) и Р. Прай (R. Pry) предложили первую модель распространения между поколениями [10]. Их исследование включало анализ спроса на продукты разных поколений и показало, что каждая новая технология вытесняет предыдущую. Это заложило основу для понимания того, как новые поколения технологий влияют на рынок. В 1987 г. Дж. Нортон (J. Norton) и Ф. Басс разработали первую модель полной диффузии между поколениями (Multi-Generation Diffusion Models, MGDМ) [11]. Они продемонстрировали, что рыночный потенциал возрастает с появлением новых поколений продуктов, и предложили методы прогнозирования спроса с учетом изменений в технологиях.

В работах, посвященных анализу истории разработки моделей распространения инноваций, часто не уделяется достаточного внимания активно развивающимся в последние годы эко-

нофизическим подходам [12]. Обоснование использования физических подходов к описанию экономических процессов включает в себя наличие неравновесных и переходных процессов, флуктуаций и случайных процессов. Для описания таких сложных систем важно иметь математический аппарат, позволяющий, помимо прочего, масштабировать систему по количеству параметров, не теряя при этом качества ее описания [13]. Использование этого подхода в данной работе невозможно без понимания фундаментальных результатов ранних работ, поэтому оно требует дополнительного описания.

Попытки объяснить вероятность распространения инноваций в рамках «эпидемиологической» модели были выражены в эконометрическом подходе, в частности, З. Гриличем (Z. Griliches) [14] и Э. Мэнсфилдом (E. Mansfield) [15]. Использование логистических функций и линейной регрессии в этом контексте исследований ограничено получением уравнений различных сигмовидных кривых, некоторые из которых приводят к искаженным кривым диффузии [16; 17].

Значительная часть других работ, посвященных байесовским моделям обучения, контрастирует с результатами эволюционных моделей с точки зрения требований, предъявляемых к рациональному поведению компаний. С одной стороны, байесовские модели показывают, что модели упорядоченной диффузии могут возникать из рационального поведения фирм. С другой стороны, эволюционные модели не предъявляют такого требования. Еще одним ограничением байесовского подхода является допущение, относящееся к определению инноваций. Изначально, с точки зрения байесовского подхода, инновация понималась как единица оборудования. Однако согласно исследованию эволюции распространения инноваций, и подчеркнуто в работе Л. Соэте (L. Soete) [18], произошел переход от узкого определения инновации как отдельной единицы оборудования к более широкому описанию новой технологии в виде набора взаимосвязанных аппаратных средств, пакетов программного обеспечения и навыков человека.

Несмотря на недостатки пробит- и логит-методов, которые рассматривали внедрение инноваций как явление, отдельное от процесса распространения, из-за исключения из анализа переменных, изменяющихся во времени, эти методы эволюционировали в так называемые методы анализа длительности [19–22]. Использование моделей панельных данных решает проблему учета изменений параметров с течением времени и позволяет получить несколько важных

сведений. Хотя Т. Ланкастер (Т. Lancaster) [23] продемонстрировал ненаблюдаемую временную неоднородность, работа Стоунмана иллюстрирует распространение информации как с помощью инструментов «эпидемии» (внутренних), так и из внешних источников.

Эндогенность является проблемой при любом эконометрическом подходе, поэтому в работе предложен переход к методам физического моделирования распространения инноваций.

Продолжая построение моделей, описывающих скорость распространения инноваций в виде процесса экспоненциального роста, переходящего в логарифмический, в данном исследовании этот подход реализован с помощью аналогий с физическими моделями [24]. Такой способ обусловлен ограниченностью эмпирических методов, которые предполагают нехватку данных и игнорируют влияющие факторы [25].

В соответствии с работами П. Стоунмана (P. Stoneman) и П. Дэвида (P. David), описывающими пороговые значения с использованием эконометрического подхода, в частности пробит-моделей, основное внимание в которых уделялось фазовому переходу, т.е. точке насыщения рынка и переходу от экспоненциального роста к логарифмическому [26; 27], М. Каршенас (M. Karshenas) и П. Стоунман продемонстрировали применение допущений, касающихся динамических изменений параметров инноваций в процессе распространения [22]. Следуя этому подходу, соответствующие параметры были включены в модель, отвечающую за инновационное изменение каждой фирмы.

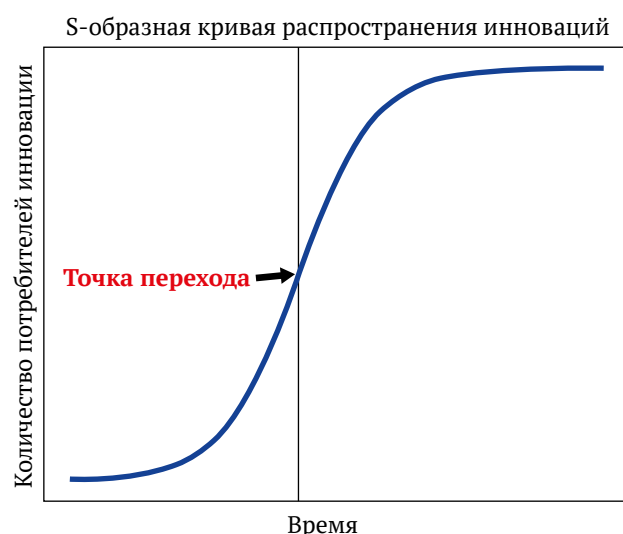


Рис. 1. График логистической функции

Fig. 1. Graph of the logistic function

В соответствии с многообещающими направлениями исследований, изложенными в работе П. Дэвида, касающимися механизмов распространения инноваций, включая обратную связь между пользователями и производителями, разработаны модели, учитывающие величины межфирменного влияния [26].

Принимая во внимание описанные подходы, инструменты и эволюцию теории распространения инноваций в целом, исследование процесса распространения инноваций авторами предполагает выделение трех ключевых этапов: экспоненциального роста, точек насыщения и логарифмического роста. Разделение логистической кривой на три этапа оправдано не только попыткой обеспечить более качественное обоснование для каждого отдельного этапа, но и потенциальными экономическими и социальными различиями в практическом анализе и управлении процессом распространения инноваций; возможные необходимые меры поддержки могут отличаться для стадии экспоненциального роста и для стадии, на которой происходит распространение инноваций по кривой логарифмического роста (рис. 1). В рамках проведенного исследования основное внимание было уделено моделированию точки насыщения рынка, т.е. точки перехода экспоненциального роста в логарифмический.

Модель Изинга для нахождения точки насыщения рынка

Модель Изинга позволяет определить точку фазового перехода, т.е. точку, в которой образуется критическая масса фирм, внедривших инновации, после чего другим фирмам станет уже невыгодно ее не внедрять. Работы, посвященные моделированию процесса распространения инноваций с помощью модели Изинга, содержат ряд полезных прикладных наблюдений, например, позволяют определить взаимосвязь между количеством связей между фирмами и скоростью внедрения инноваций [28]. Кроме того, полезные практические рекомендации по маркетинговым стратегиям могут быть даны при получении зависимости от равномерности распределения фирм-последователей, и это является продолжением пространственного подхода к изучению распространения инноваций.

Модель Изинга – это статическая физическая модель, которая описывает систему из множества взаимодействующих магнитных моментов, называемых спинами (рис. 2). Каждый спин может находиться в одном из двух состояний: состояние со спином «вверх», либо со спином «вниз». В модели распространения инноваций между фир-

мами на основе модели Изинга каждая фирма соответствует спину (табл. 1). Состояниям спина аналогичны состояния принятия инновации каждой фирмой: «приняла» или «не приняла».

Взаимодействие между спинами определяется характеристиками компании и инновации. Распространение между фирмами происходит в соответствии с правилами модели Изинга. Фирмы, взаимодействуя между собой, принимают решение о переходе в состояние «приняла». Если фирма определяет, что у ее соседа есть инновация, она может принять решение о переходе в инновационное состояние. Однако это происходит не всегда и зависит от текущего состояния фирмы и ее окружения. Чем меньше энергия конфигурации системы (что соответствует однородному состоянию системы), тем выше вероятность принятия инновации. С другой стороны, чем выше температура системы, тем выше вероятность принятия инновации в неоднородных состояниях.

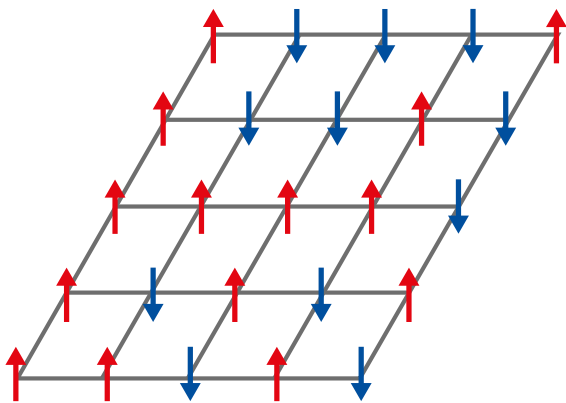


Рис. 2. Модель Изинга

Источник: Обучающее видео по электромагнетизму.
Режим доступа: <https://www.youtube.com/watch?v=A6Q5eb7uvaM> (дата обращения: 15.07.2024).

Fig. 2. Ising model

Source: Educational video on electromagnetism.
Available at: [www: https://www.youtube.com/watch?v=A6Q5eb7uvaM](https://www.youtube.com/watch?v=A6Q5eb7uvaM) (accessed on 15.07.2024).

В экономической интерпретации температура отображает экономические барьеры для принятия инноваций, такие как высокие затраты на внедрение, большие риски и т.д. Более высокая температура означает более благоприятную среду для внедрения новых технологий, в то время как более низкая температура означает большие экономические барьеры. Определяется параметр как сумма баллов из табл. 2.

Гамильтониан ферромагнетика в магнитном поле h

$$\hat{H} = 2\mu_B \sum_i s_i h - \frac{V}{2} \sum_{i,k} s_i s_k, \quad (1)$$

где μ_B – магнетон Бора (в модели определяется на основе анализа исторических данных); s_i – значение спина; V – энергия обменного взаимодействия между электронами.

Гамильтониан – это математическое описание полной энергии ферромагнитной системы, учитывающее взаимодействия между магнитными моментами и внешними магнитными полями. Данный функционал можно рассматривать как аналог математического описания динамических систем в экономике, где взаимодействия между агентами определяют динамику системы.

Рассмотрим самосогласованное поле, действующее на один выделенный спин s_0 со стороны других спинов

$$U = 2\mu_B s_0 h - Vz s_0 \bar{s}, \quad (2)$$

где z – количество ближайших соседей к спину s_0 ; $\bar{s}$ – среднее значение спинов.

Из формулы (2) и из магнитного момента единицы объема через усреднение по распределению Гиббса получаем значение намагниченности выше точки Кюри (состояние системы после фазового перехода принятия инноваций)

$$M = \frac{n\mu_B^2}{T} \left(h + \frac{Vz}{4n\mu_B^2} \right). \quad (3)$$

Таблица 1 / Table 1

Соответствие параметров модели Изинга и их экономической интерпретации
Correspondence between the parameters of the Ising model and their economic interpretation

Физический параметр	Экономический интерпретация
Внешнее магнитное поле (h) (задано поточно)	Прорывность инновации
Спин (s_i)	Бинарная характеристика статуса внедрения инновации в компанию
Обменное взаимодействие между электронами (V)	Параметр межфирменного влияния
Температура (T^*)	Экономические барьеры для принятия инновации. Высокие затраты на внедрение, большие риски и т.д.

* Температура T в модели Изинга определяет вероятность того, что спин изменит свое состояние.

Таблица 2 / Table 2

Соответствие параметров модели Изинга и их экономической интерпретации

Correspondence between the parameters of the Ising model and their economic interpretation

Параметр	Балл
Стоимость внедрения < 1 000 000 руб.	5
Стоимость внедрения < 10 000 000 руб.	4
Стоимость внедрения < 50 000 000 руб.	3
Стоимость внедрения < 100 000 000 руб.	2
Стоимость внедрения < 500 000 000 руб.	1
Инновация является изменением одного процесса/продукта внутри одной фирмы	4
Инновация является изменением одного процесса/продукта внутри нескольких фирм	3
Инновация является изменением нескольких производственных процессов/продуктов внутри фирмы	2
Инновация создает новый процесс/продукт	1
Для внедрения требуются изменения в законодательной базе	5
Для внедрения требуется взаимодействие нескольких фирм	4
Для внедрения необходимо серьезное изменение регламентов внутри одной фирмы	3
Для внедрения необходимо незначительное изменение регламентов внутри одной фирмы	2
Для внедрения нет необходимости в изменениях регламентов/нормативно-правовой базы	1

Как видно из формулы (3), состояние зависит с точностью до константы от температуры, энергии взаимодействия между спинами и величины внешнего магнитного поля.

Рассмотрим теперь состояние системы до фазового перехода. Значение спонтанной намагниченности (ниже точки Кюри) получается из магнитного момента

$$M = n\mu_B \tanh\left(\frac{T_c}{n\mu_B T} M\right), \quad (4)$$

где T_c – критическая температура Кюри.

Раскладываем правую часть уравнения (4) в ряд Тейлора

$$M = \pm n\mu_B \sqrt{3\left(1 - \frac{T}{T_c}\right)}. \quad (5)$$

Таким образом, получена спонтанная намагниченность как функция температуры.

Выведем неявное уравнение, определяющее точку Кюри через напряженность магнитного поля

$$\sqrt{1 - \frac{T}{T_c}} = \tanh\left(\frac{-\frac{\mu_B h}{T_c} + \sqrt{1 - \frac{T}{T_c}}}{\frac{T}{T_c}}\right). \quad (6)$$

Рассчитаем связь намагниченности с магнитным полем

$$\frac{\mu_B h}{T_c} = \frac{T}{T_c} \arctan h\left(\frac{M}{n\mu_B}\right) - \frac{M}{n\mu_B}. \quad (7)$$

Вероятность принятия инновации в каждом спине

$$P(s_i = 1) = \frac{1}{1 + e^{-2\beta s_i \left(\sum_{j=1}^N V_{ij} s_j + h_i\right)}},$$

где s_i – значение спина. «Приняла»/«не приняла»; V – энергия обменного взаимодействия между электронами; h_i – прорывность инновации, заданная поточечно; β – инверсия температуры системы; чем выше значение β , тем меньше вероятность принять инновацию в i -м узле.

Для нахождения фазового перехода необходимо использовать метод Монте-Карло. Модель запускается много раз и исследуется доля фирм, принявших инновацию. Затем необходимо усреднить результаты, построить график зависимости доли принявших инновацию фирм от пороговой вероятности. Точка, в которой наблюдается резкое изменение доли принявших фирм, соответствует пороговой вероятности фазового перехода.

Обсуждение результатов

Модель Изинга описывает систему до фазового перехода и после. Модель также учитывает межфирменное влияние и характеристику самой инновации. Отличительная особенность – возможность с помощью методов компьютерного моделирования получить в явном виде точку фазового перехода.

Представленная модель предполагает, что взаимодействие между спинами происходит только с их ближайшими соседями и является постоянным в пространстве, однако данное ограничение легко решается при переходе в векторное пространство и использовании тензорного инструментария.

Данное исследование может быть значительно расширено с помощью «безусловных методов»,

описанных в работах Дж. Стиглица (J. Stiglitz) и П. Дэвида о «безусловных методах» [29; 30]. Динамические изменения в выгодах от внедрения каждой отдельной инновации в зависимости от последовательности внедрения и типов фирм могут существенно дополнить представленную экономическую модель.

Другим потенциальным направлением исследований в контексте этой работы является дополнение ее результатов результатами фундаментальных исследований Е. Мэнсфилда [31] и А. Ромео (A. Romeo) [32], а также эмпирическими исследованиями Л. Лайинна (L. Lyinn), Ф. Арканджели (F. Arcangeli) и Э. Мэнсфилда [33–35]. Развитие идеи рассмотрения логистической кривой в контексте трех этапов с использованием инструментов экономической физики может быть дополнено идеей о различиях в технологиях не только от фирмы к фирме, но и от одной группы фирм к другой. В этом случае необходимо учитывать уровень инновационного взаимодействия между регионами, странами, отраслями, а также различные соглашения между фирмами и странами [36]. Другим возможным направлением для дополнения данного исследования могло бы стать внедрение технических ноу-хау и сложных организационных инноваций [37].

При использовании данного инструмента в России в отраслях с низким уровнем инновационной активности ключевых производственных секторов экономики прогнозируется повышение уровня высокотехнологического производства на несколько процентных пунктов, повышение экспорта высокотехнологичных товаров, уровня инновационной активности на 20 %, рост доли организаций, осуществляющих технологичные инновации на 30 %. На примере топливно-энергетической отрасли России это означает выполнение задач текущей версии Энергетической

стратегии Российской Федерации [38], в частности, прогнозируется возможность поддержания добычи нефти с газовым конденсатом на уровне 525 млн т (за счет ввода в эксплуатацию новых месторождений с использованием передовых отечественных технологий), повышение степени технологичности предприятий (индекс Нельсона) (за счет внедрения новых разработок и управления портфелем патентов), а также снижение уровня импортозависимости [39].

Заключение

Определение фазового перехода с точки зрения распространения инноваций означает определение и точный расчет точки насыщения рынка, т.е. точки, в которой экспоненциальный рост сменяется логарифмическим ростом. В работе была исследована и получена экономическая модель, описывающая насыщение рынка инновацией с учетом величин межфирменного влияния, барьеров для внедрения и прорывности инновации. В данном исследовании значение инструментария модели Изинга представлено точкой Кюри в ферромагнитных сетях, которая характеризует фазовый переход.

В целях обеспечения инновационного развития России рекомендуется использовать описанные в работе инструменты и подход к исследованию и анализу насыщения инновациями всех производственных секторов экономики.

Разработанная модель применима для описания процесса распространения инноваций в любой отрасли страны, при инвестиционном и бизнес-планировании в фирмах, принятии решений об инвестировании в инновационные проекты. Модель применима также на государственном уровне при планировании федеральных программ поддержки инноваций, экономического прогнозирования развития регионов и страны.

Список литературы / References

1. World Intellectual Property Organization. Global Innovation Index. Available at: https://www.wipo.int/global_innovation_index/en/2023/ (дата обращения 27.08.2024)
2. Costello D.M. A cross-country, cross-industry comparison of productivity growth. *The Journal of Political Economy*. 1993;101(2):207–222. <https://doi.org/10.1086/261873>
3. Solow R.M. Technical change and the aggregate production function. *The Review of Economics and Statistics*. 1957;39(3):312–320. <https://doi.org/10.2307/1926047>
4. Harberger A.C. A vision of the growth process. *The American Economic Review*. 1998;88(1):1–32. Available at: <http://www.econ.ucla.edu/harberger/vision.pdf>
5. Chirwa T., Odhiambo N. Exogenous and endogenous growth models: a critical review. *Comparative Economic Research. Central and Eastern Europe*. 2018;21(4):63–84. <https://doi.org/10.2478/cer-2018-0027>
6. Hagerstrand T. *Innovation diffusion as a spatial process*. Chicago: University of Chicago Press; 1967. 334 p.

7. Земцов С.П., Бабуринов В.Л. Моделирование диффузии инноваций и типология регионов России на примере сотовой связи. *Известия Российской Академии наук. Серия географическая*. 2017;(4):17–30. <https://doi.org/10.7868/S0373244417100024>
Zemtsov S., Baburin V. Modeling of diffusion of innovation and typology of Russian regions: A case study of cellular communication. *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya*. 2017;(4):17–30. (In Russ.). <https://doi.org/10.7868/S0373244417100024>
8. Rogers E.M. *Diffusion of innovations*. NY: The Free Press; 1983. 447 p.
9. Bass F.M. A new product growth for model consumer durables. *Management Science*. 1969;15(5):215–227. <https://doi.org/10.1287/mnsc.15.5.215>
10. Fisher J.C., Pry R.H. A simple substitution model of technological change. *Technological Forecasting and Social Change*. 1971–1972;3:75–88. [https://doi.org/10.1016/S0040-1625\(71\)80005-7](https://doi.org/10.1016/S0040-1625(71)80005-7)
11. Norton J.A., Bass F.M. A diffusion theory model of adoption and substitution for successive generations of high-technology products. *Management Science*. 1987;33(9):1069–1086. <https://doi.org/10.1287/MNSC.33.9.1069>
12. Kumar N. *Review of innovation diffusion models*; 2015. No 1/2015-01. 54 p. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2413.0728>
13. Садовничий В.А., Акаев А.А., Ильин И.В., Коротяев А.В., Малков С.Ю. Моделирование и прогнозирование глобальной динамики в XXI веке. *Вестник Московского университета. Серия 27: Глобалистика и геополитика*. 2022;(1):5–35. <https://doi.org/10.56429/2414-4894-2022-39-1-5-35>
Sadovnichiy V.A., Akaev A.A., Ilyin I.V., Korotayev A.V., Malkov S.Yu. Modeling and forecasting of global dynamics in the XXI century. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 27: Globalistika i geopolitika*. 2022;(1):5–35. (In Russ.). <https://doi.org/10.56429/2414-4894-2022-39-1-5-35>
14. Griliches Z. Research costs and social returns: hybrid corn and related innovations. *Journal of Political Economy*. 1958;66(5):419. <https://doi.org/10.1086/258077>
15. Mansfield E. Technical change and the rate of imitation. *Econometrica*. 1961;29(4):741–766. <https://doi.org/10.2307/1911817>
16. Dixon R. Hybrid corn revisited. *Econometrica*. 1980;48(6):1451–1461. <https://doi.org/10.2307/1912817>
17. Dinar A., Marom D. Rate and patterns of computer adoption and use in agricultural extensions. *Technological Forecasting and Social Change*. 1991;39(3):309–318. [https://doi.org/10.1016/0040-1625\(91\)90043-f](https://doi.org/10.1016/0040-1625(91)90043-f)
18. Soete L. International diffusion of technology, industrial development and technological leapfrogging. *World Development*. 1985;13(3):409–422. [https://doi.org/10.1016/0305-750X\(85\)90138-X](https://doi.org/10.1016/0305-750X(85)90138-X)
19. Kelley M.R. External learning opportunities and the diffusion of process innovations to small firms. The case of programmable automation. *Technological Forecasting and Social Change*. 1991;39(1-2):103–125.
20. Franck B., Gaussens O. L'automatisation des petites et moyennes entreprises: une étude économétrique. *Économie & Prévision*. 1992;(102-103):37–54. Available at: https://www.persee.fr/doc/ecop_0249-4744_1992_num_102_1_5274
21. O'Farrell P.N., Oakey R.P. Regional variations in the adoption of CNC machine tools by small engineering firms: a multivariate analysis. *Environment and Planning A*. 1992;24(6):887–902.
22. Karshenas M., Stoneman P. Rank, stock, order and epidemic effects in the diffusion of new process technologies: An empirical model. *RAND Journal of Economics*. 1993;24(4):503–528.
23. Lancaster T. Econometric methods for the duration of unemployment. *Econometrica*. 1979;47(4):939–956. <https://doi.org/10.2307/1914140>
24. Shimogawa S., Shinno M., Saito H. Structure of S-shaped growth in innovation diffusion. *Physical Review E*. 2012;85(5):056121. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.85.056121>
25. Battisti G., Hollenstein H., Stoneman P., Woerter M. Inter and intra firm diffusion of ICT in the United Kingdom (UK) and Switzerland (CH): An internationally comparative study based on firm-level data. *Economics of Innovation and New Technology*. 2007;16:669–687.
26. David P. Zvi Griliches and the economics of technology diffusion: Adoption of innovations, investment lags, and productivity growth – “Connecting the Dots”. Discussion paper 09-016; 2010. 76 p. Available at: https://www.researchgate.net/publication/254450764_Zvi_Griliches_and_the_Economics_of_Technology_Diffusion_Adoption_of_Innovations_Investment_Lags_and_Productivity_Growth
27. Stoneman P., Toivanen O. *Technological diffusion, uncertainty and irreversibility: The international diffusion of industrial robots*; 2000. 32 p. Available at: www.researchgate.net/publication/228827358_Technological_Diffusion_Uncertainty_and_Irreversibility_The_International_Diffusion_of_Industrial_Robots
28. Laciana C.E., Rovere S.L. Ising-like agent-based technology diffusion model: Adoption patterns vs. seeding strategies. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 2011;390(6):1139–1149. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2010.11.006>
29. Stiglitz J.E. Learning to learn, localized learning and technological progress. In: Dasgupta P., Stoneman P. (eds.). *Economic policy and technological change*. Cambridge University Press; 1987. P. 125–153. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511559938.007>

30. David P. *Technical choice, innovation and economic growth*. London: Cambridge University Press; 1975. 334 p.
31. Mansfield E. *Industrial research and technological innovation*. NY: Norton; 1968. 235 p.
32. Romeo A.A. The rate of imitation of a capital-embodied process innovation. *Economica*. 1977;44(173):63–69. <https://doi.org/10.2307/2553550>
33. Linn L. New data on the diffusion of the basic oxygen furnaces in the U.S. and Japan. *Journal of Industrial Economics*. 1981;30(2):123–135.
34. Arcangeli F., Dosi G., Moggi M. Patterns of diffusion of electronic technologies: An international comparison with special reference to the Italian case. *Research Policy*. 1991;20(6):515–529.
35. Mansfield E. The diffusion of industrial robots in Japan and the United States. *Research Policy*. 1989;18(4):183–192.
36. Ovsyannikov I.R., Zhdaneev O.V. Forecast of innovative activity in key areas of energy transition technologies based on analysis of patent activity. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2024;87:1261–1276. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.08.375>
37. Rosegger G. Diffusion through interfirm cooperation. A case study. *Technological Forecasting and Social Change*. 1991;39(1-2):81–103.
38. Жданеев О.В., Овсянников И.Р. Влияние внешних факторов на инновационную активность компаний ТЭК. *Проблемы прогнозирования*. 2024;(2(203)):73–82. <https://doi.org/10.47711/0868-6351-203-73-82>
39. Zhdaneev O.V., Frolov K.N. Technological and institutional priorities of the oil and gas complex of the Russian Federation in the term of the world energy transition. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2024;58:1418–1428. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.01.285>

Информация об авторах

Олег Валерьевич Жданеев – д-р техн. наук, доцент, Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации, 119571, Москва, просп. Вернадского, д. 82, стр. 1, Российская Федерация; профессор Высшей нефтяной школы, Югорский государственный университет, 628012, Ханты-Мансийск, ул. Чехова, д. 16, Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5287-4397>; e-mail: Zhdaneev@rosenergo.gov.ru

Иван Романович Овсянников – старший эксперт, АО «Центр эксплуатационных услуг», 121099, Москва, Новинский б-р, д. 13/4, Российская Федерация; Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), 141701, Долгопрудный, Институтский пер., д. 9, Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-9048-7402>; e-mail: ovsyannikov.ir@phystech.edu

Information about the authors

Oleg V. Zhdaneev – Dr.Sci. (Eng.), Associate Professor, Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration, 82-1 Vernadsky Ave., Moscow 119571, Russian Federation; Professor, Higher Oil School, Yurga State University, 16 Chekhova Str., Khanty-Mansiysk 628012, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5287-4397>; e-mail: Zhdaneev@rosenergo.gov.ru

Ivan R. Ovsyannikov – Senior Expert, Joint Stock Company “Center of Operational Services”, 13/4 Novinsky Blvd, Moscow 121099, Russian Federation; Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), 9 Institutsky Lane, Dolgoprudny, Moscow Region 141701, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-9048-7402>; e-mail: ovsyannikov.ir@phystech.edu

Поступила в редакцию 27.05.2024; поступила после доработки 27.08.2024; принята к публикации 28.08.2024

Received 27.05.2024; Revised 27.08.2024; Accepted 28.08.2024