ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ
INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 004.94, УДК 001.89
CC BY 4.0
DOI: 10.21822/2073-6185-2025-52-3-86-94 Оригинальнаястатья/ Original article

Ассиметричные S-кривые для прогнозирования динамики распространения новых технологий

А.В. Мандрик[1], А.С. Глуханов[2]
[1]Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
[1]195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29 литера Б, Россия,
[2]Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет,
[2]190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4, Россия

Резюме. Цель. Цель исследования заключается в разработке нового метода расчета динамики распространения новой технологии с применением асимметричных s-кривых, учитывающего взаимодействие обмен информацией об успешности внедрения новой технологии между активными и потенциальными пользователями новой технологии. **Метод.** Используются методы математического анализа, теории вероятностей, разрабатывается новый математический аппарат на основе рекуррентных методов расчета, результаты расчета подтверждаются имитационной моделью. Оценка работоспособности разработанных методов производится посредством сравнения прогнозируемых значений с реальными данными о динамике распространения новой технологии. **Результат.** В работе произведена оценка точности прогноза, а также произведен анализ необходимого соотношения между объемом анализируемых данных и точности прогноза роста доли активных пользователей. Предлагаемый метод позволяет также оценить интенсивность взаимодействия между потребителями новой технологии. **Вывод.** Полученные результаты могут быть использованы для повышения точности прогнозирования динамики внедрения новых технологий на рынке. Это достигается путем применения рекуррентных уравнений, предназначенных для расчета коэффициента, отражающего интенсивность взаимодействия между пользователями. Использование данных уравнений позволяет более детально оценить влияние межличностных связей на распространение инноваций.

Ключевые слова: s-кривые, s-образные кривые, прогнозирование распространения инноваций, рекуррентное соотношение

Для цитирования: А.В. Мандрик, А.С. Глуханов. Ассиметричные S-кривые для прогнозирования динамики распространения новых технологий. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2025; 52(3):86-94. DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-3-86-94

Asymmetric S-curves for predicting the dynamics of new technology diffusion

A.V. Mandrik[1], A.S. Glukhanov[2]
[1]Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
[1]29 Politekhnicheskaya St., Building B, St. Petersburg 195251, Russia,
[2] St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering,
[2] 4 2-ya Krasnoarmeyskaya St., St. Petersburg 190005, Russia

Abstract. Objective. The objective of the study is to develop a new method for calculating the dynamics of new technology diffusion using asymmetric s-curves that takes into account the interaction and exchange of information on the success of new technology implementation between active and potential users of the new technology. **Method.** The methods of mathematical analysis and probability theory are used, a new mathematical apparatus is developed based on recurrent calculation methods, the calculation results are confirmed by a simulation model. The performance of the developed methods is assessed by comparing the predicted values with

real data on the dynamics of new technology diffusion. **Result.** The paper assesses the accuracy of the forecast, and also analyzes the required relationship between the volume of analyzed data and the accuracy of the forecast for the growth in the share of active users. The proposed method also allows us to estimate the intensity of interaction between consumers of the new technology. **Conclusion.** The results obtained can be used to improve the accuracy of forecasting the dynamics of new technology implementation on the market. This is achieved through the use of recurrent equations designed to calculate the coefficient reflecting the intensity of interaction between users. The use of these equations allows for a more detailed assessment of the impact of interpersonal relationships on the diffusion of innovations.

Keywords: s-curves, s-shaped curves, forecasting the spread of innovations, recurrence relation

For citation: A.V. Mandrik, A.S. Glukhanov. Asymmetric S-curves for forecasting the dynamics of the spread of new technologies. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2025; 52(3):86-94. (In Russ) DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-3-86-94

Введение. В статье предлагается рекуррентное уравнение для расчета асимметричной s-кривой, описывающей зависимость количества пользователей новой технологии от времени. Предлагаемый подход позволяет учитывать взаимодействие между активными и потенциальными пользователями новой технологии.

Предполагается, что в случае первоначального одновременного для всех объявления о возможности внедрения или приобретения технологии, время реакции пользователей задано случайной величиной с нормальным распределением вероятности. При этом пользователи с меньшим временем реакции могут сообщить о ценности технологии пользователям с большим временем реакции. В результате исходное распределение становится асимметричным. Для экспериментального исследования и подтверждения проведенного теоретического расчета выбрано несколько s-кривых, характеризующих распространение новых технологий. Вычисляя параметры исследуемых распределений, становится возможным произвести экстраполяцию данных о развитии новых рынков.

S-кривые могут быть полезны для составления технологических прогнозов [1]. Есть несколько примеров использования s-кривых в автомобильной промышленности [2], экологии [3], электротехнике [4], здравоохранении [5].

Практический интерес представляет использование s-кривых для управления проектами [6]. В статье [7] исследуется социальное взаимодействие в процессе распространения инноваций с помощью программного моделирования Netlogo. В статье [8] для лучшего прогнозирования s-кривых используется полиномиальная аппроксимация с применением нейронных сетей. Инструменты на основе s-кривых, усиленные алгоритмами нейронных сетей, используются для управления сложными проектами [9]. Качество прогноза существенно зависит от природы, неопределенностей, внутренней структуры и параметров исследуемого объекта [10]. Отдельное направление исследований посвящено теории принятия решений с использованием s-кривых [11]. Более широкий обзор методов и инструментов, построенных на s-кривых, можно найти в [12].

Прогноз распространения новых технологий обладает некоторыми специфическими свойствами. В отличие от природных систем (физических, биологических), новые технологии, инновации развиваются и распространяются в социально-экономических системах, где может существовать множество взаимодействий между пользователями. S-кривые, построенные на реальных данных, имеют искажения. В этой статье исследуется частный случай асимметричных s-кривых и предполагается возможная причина асимметрии.

Постановка задачи. Задача данного исследовательского проекта состоит в создании инновационной методики для моделирования динамики диффузии новой технологии. В основе метода лежит использование асимметричных S-образных кривых, что позволяет учесть влияние коммуникации между пользователями, уже внедрившими технологию, и теми, кто только рассматривает такую возможность. При этом акцент делается на анализе

обмена информацией об эффективности использования новой технологии как фактора, определяющего скорость ее распространения среди потенциальных пользователей. Исследование возможных причин асимметрии s-кривых позволит уточнить прогноз развития рынков, технологий, динамики распространения инноваций. Уточненные уравнения s-кривых позволят более объективно производить оценку технологий, принимать более своевременные решения о выводе продукции на рынок.

Методы исследования. В работе применяются инструменты математического анализа и теории вероятностей. Разработан инновационный математический инструментарий, базирующийся на рекуррентных вычислительных алгоритмах. Верификация полученных результатов осуществляется с помощью имитационного моделирования. Эффективность предложенных методов оценивается путем сопоставления прогнозных значений с фактическими данными о динамике внедрения новой технологии.

Разработка алгоритма построения ассиметричной s-кривой. Для разработки нового метода математического моделирования процесса распространения инноваций используются следующие гипотезы:

– все пользователи потенциально заинтересованы во внедрении новых технологий;

– все пользователи получают информацию о новой технологии одновременно;

– время принятия решения о покупке или внедрении новой технологии задано нормальным распределением;

– после внедрения новой технологии пользователь может с некоторой вероятностью проинформировать других пользователей.

При этом, если предположить, что взаимодействие между пользователями сведено к минимуму, то количество активных пользователей в любой момент времени соответствует нормальному распределению времени принятия решения. Если взаимодействие существует, то потребители с меньшим временем принятия решения будут привлекать более покупателей с большим временем принятия решения, и результирующая s-образная кривая будет асимметричной.

Для формализации такого поведения зададим количество активных пользователей функцией $N_A(t, t^*)$, где t – реальное время и t^* – время прогноза на будущее в момент времени t. Данная функция таким образом совмещает в себе реально произошедшие события до момента t, а также прогноз на момент времени t^*. Момент времени t^* можно также рассматривать как модельное или прогнозное время.

В некоторых задачах появление второго, модельного времени может быть вызвано необходимостью пересчета модели в связи с обновлением данных о моделируемой системе. В рассматриваемом случае время t^* необходимо для создания рекуррентного уравнения, позволяющего производить перерасчет будущих значений на основе текущего вычисленного и зафиксированного значения.

Для упрощения расчетов лучше использовать дискретную, рекуррентную форму. Для начала определим, что после появления технологии на рынке в момент времени t_0, реализуется нормальное распределение вероятности приобретения пользователями новой технологии в дальнейшие моменты времени:

$$N(i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{t_0+i\Delta t}^{t_0+i\Delta t+\Delta t} \exp\left(-\left(\frac{t-t_m}{\sqrt{2}\sigma}\right)^2\right) dt, \quad (1)$$

где t_m, σ – среднее значение и среднеквадратичное отклонение времени принятия решения на приобретение новой технологии; Δt – длительность временного интервала; i – номер временного интервала.

При этом значение интеграла (1) до момента времени t_0 должно соответствовать доле рынка или числу пользователей, которые используют новую технологию на момент времени t_0. В частности, если известна доля рынка, занимаемая новой технологией на момент времени t_0, то эта величина может быть использована в качестве начального значения интеграла (1). Это позволит модели точно воспроизводить наблюдаемую траекторию

распространения технологии, учитывая фактическое проникновение на рынок на начальном этапе.

Увеличение численности активных пользователей определяется как результат сложения прогнозируемого значения за предшествующий временной отрезок и объема привлеченной аудитории с более поздним периодом отклика.

Данный подход позволяет учитывать как ожидаемый прирост, так и фактическое пополнение базы пользователей. Итоговый показатель роста активной аудитории формируется из двух ключевых компонентов.

Первый компонент – это прогноз, основанный на данных предыдущих периодов, который отражает ожидаемую динамику развития.

Второй компонент – это количество новых пользователей, привлеченных в рассматриваемый период и проявивших активность. Суммирование этих двух компонентов позволяет получить более точную оценку реального прироста активных пользователей, учитывая как запланированные, так и фактические результаты. Это способствует более эффективному планированию и управлению стратегиями развития пользовательской базы:

$$N_A(i,i) = N_A(i-1,i)\left[1 + \sum_{j=i+1}^{\infty} \alpha N_A(i-1,j) {N_T}^{-1}\right], \quad (2)$$

где α – коэффициент, определяющий интенсивность взаимодействия между пользователями; N_T – общее количество пользователей.

После наступления каждого шага i необходимо пересчитать количество пользователей, которые еще не внедрили технологию:

$$N_A(i,k) = N_A(i-1,k)\left[1 - \alpha N_A(i-1,i) {N_T}^{-1}\right]. \quad (3)$$

Определение параметров s-кривых, наблюдаемых при диффузии инноваций

Реальные формы s-кривых могут увеличиваться, уменьшаться или изменяться локально. На наблюдаемую технологию могут влиять сложные политические и экономические события. В этот период времени невозможно сделать какой-либо прогноз. Применение выражений (2) и (3) возможно для технологий, на которые не оказывают существенного влияния неблагоприятные факторы, например, стоит исключить исторические периоды, в которые наблюдалось значительное снижение доходов населения.

Выражения (2) и (3) позволяют провести аппроксимацию и экстраполяцию технологических тенденций с помощью асимметричных s-кривых. Таким образом, на основе данных из статей [13] и [14] были выбраны подходящие технологии (рис. 1):

– микроволновая печь;
– цветной телевизор;
– видеоплеер;
– радиоприемник;
– автоматическая коробка передач.

Для каждого технологического тренда (рис. 1) были произведены следующие операции:

– вычислено среднее значение t_m и среднеквадратичное значение σ для получения исходного распределения (1) на основе реальных данных технологического тренда;

– произведен последовательный подбор коэффициента α в выражениях (2) и (3) для построения ассиметричной s-кривой, максимально близкой к данным о распространении новой технологии;

– произведена последовательная корректировка значений t_m, σ, α до обнаружения минимума функции ошибок между реальными и модельными данными.

Несмотря на то, что рассматриваемые технологии относятся к разным рынкам, в большинстве случаев достаточно хорошее приближение получается при коэффициенте интенсивности взаимодействия α = 40 [5-7]. Рассматриваемые новые технологии отличаются по цене, и этот факт позволяет говорить о том, что замедление распространения технологии не связано с благосостоянием пользователей, однако видимо связано с общим состоянием экономики.

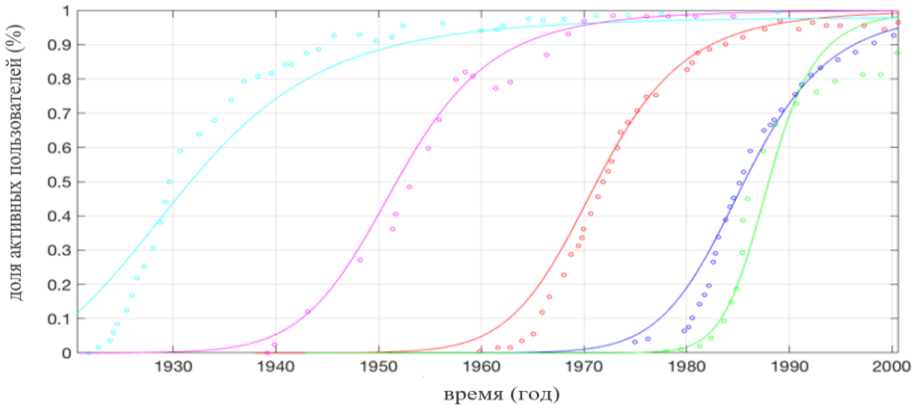

Рис. 1 – Реальные данные и приблизительные характеристики новых технологических тенденций: микроволновая печь (синий), цветной телевизор (красный), видеомагнитофон (зеленый), радио (голубой), автоматическая коробка передач (фиолетовый)

Fig. 1 – Real data and approximate characteristics of new technological trends: microwave oven (blue), color television (red), VCR (green), radio (blue), automatic transmission (purple)

Аппроксимации (рис.1) были построены в предположении, что все технологии имеют одинаковое нормальное распределение реакций своих пользователей. Параметры этого распределения были рассчитаны непосредственно на основе реальных данных. После этого были применены рекуррентные соотношения (2) и (3) и рассчитаны аппроксимирующие кривые.

Стоит отметить наличие существенных отклонений в начале роста графиков, данное отклонение может быть интерпретировано как взрывной рост потребления продукта или технологии, которые были признаны на рынке удачными. Важно учитывать, что начальные этапы развития новых продуктов или технологий часто характеризуются повышенной волатильностью и подвержены влиянию различных факторов, таких как маркетинговые кампании, освещение в средствах массовой информации и общая экономическая ситуация.

Обсуждение результатов. Проверка полученных уравнений с помощью имитационной модели. Представленные выражения (2) и (3) могут быть проверены с помощью имитационной модели, учитывающей взаимодействие между пользователями. Предлагаемая имитационная модель состоит из агентов, заданных диаграммой состояний (рис.2).

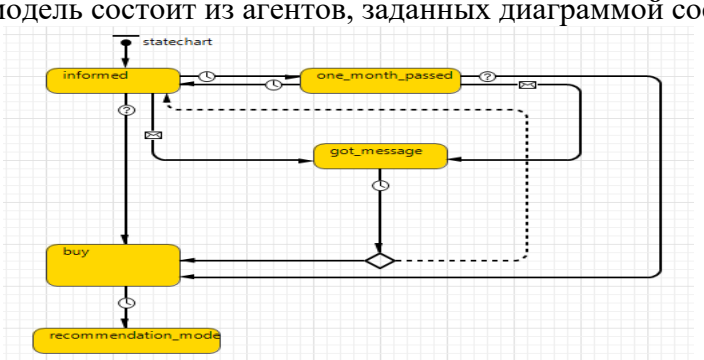

Рис. 2 – Диаграмма состояний агента, моделирующего поведение пользователя новой технологии

Fig. 2 – State diagram of an agent simulating the behavior of a user of a new technology

В начале моделирования каждый агент одновременно с другими агентами получает информацию о возможности внедрения новой технологии.

Таким образом, начальным состоянием каждого агента является состояние «informed» («информированный»). Для корректного выполнения имитационной модели необходимо отсчитывать временные интервалы производя периодический переход в дополнительное состояние «one_month_passed» («прошел_месяц»).

Каждый агент в соответствии с характерным ему временем длительности принятия решения осуществляет переход в состояние «buy» («купить») и далее в состояние

«recommendation_mode» («режим_рекомендации»), в котором агент может порекомендовать новую технологию другому случайно выбранному агенту.

Число рекомендаций, генерируемых в состоянии «recommendation_mode», поступающих от одного агента, выбирается равным значению коэффициента α в формулах (2) и (3). Для получения рекомендаций у каждого агента предусмотрен переход в состояние «got_message», в котором возможен переход в состояние «buy» или возврат в состояние «informed».

Число агентов модели принято равным 5000. Исходное распределение времени принятия решения о внедрении новой технологии является нормальным, среднее значение равно 120 месяцев, среднеквадратичное отклонение равно 24 месяца.

В данной модели переход из состояния «informed» («информированный») в состояние «one_month_passed» реализуется с заданной интенсивностью. Более подходящее условие перехода по истечении фиксированного времени приводит к ошибкам выполнения модели и связано с особенностями пакета имитационного моделирования Anylogic [15-17].

Получены результаты моделирования динамики распространения новой технологии (рис. 3).

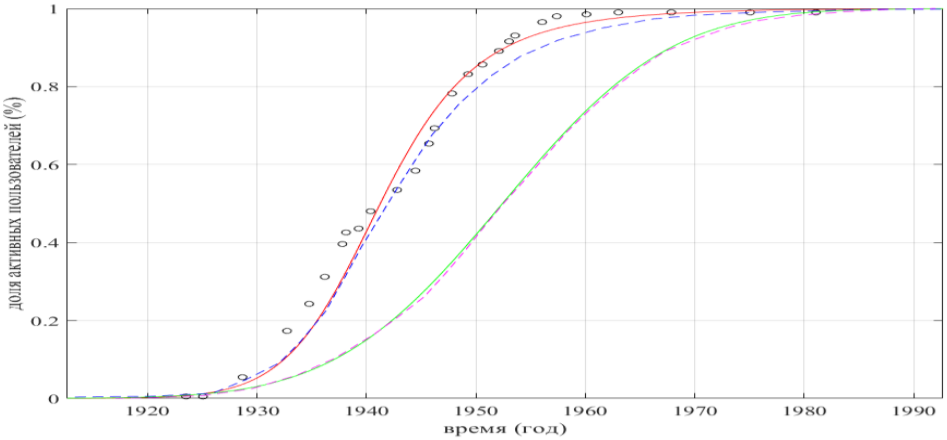

Рис. 3 – Результаты моделирования распространения новой технологии на примере данных о приобретении холодильного оборудования: модель динамики без рекомендаций (фиолетовая линия), модель динамики с учетом рекомендаций (синяя линия), расчет динамики без рекомендаций (зеленая линия), расчет динамики с учетом рекомендаций (красная линия), реальные данные о распространении новой технологии (черный).

Fig. 3 – Results of modeling the spread of new technology using data on the purchase of refrigeration equipment as an example: a model of dynamics without recommendations (purple line), a model of dynamics taking into account recommendations (blue line), calculation of dynamics without recommendations (green line), calculation of dynamics taking into account recommendations (red line), real data on the spread of new technology (black).

Оценка точности имитационной модели выполнялась по формуле:

$$Accuracy_{\text{c}} = 1 - \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{(y_i - y_m_i)^2}{y_i}, \quad (4)$$

где y_i – значение реальных данных в *i-й* момент времени; n – число рассматриваемых моментов времени; y_m_i – значение расчетных данных в i-й момент времени. Точность имитационной модели составила 0.998.

Оценка точности расчета в соответствии с выражениями (2) и (3) выполнялась по формуле:

$$Accuracy_m = 1 - \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{(y_i - y_c_i)^2}{y_i}, \quad (5)$$

где y_i – значение реальных данных в *i-й* момент времени; n – число рассматриваемых моментов времени; y_c_i – значение расчетных данных.

Точность расчета в соответствии с выражениями (2) и (3) составила 0.997. Оценка точности имитационной модели относительно расчета по выражениям (2) и (3) выполнялась по формуле:

$$Accuracy_{m_c} = 1 - \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} \frac{(y_m_i - y_c_i)^2}{y_c_i}, \quad (6)$$

где y_m_i – значение данных имитационной модели в *i-й* момент времени; n – число рассматриваемых моментов времени; y_c_i – значение расчетных данных в *i-й* момент времени.

Точность имитационной модели относительно расчета в соответствии с выражениями (2) и (3) составила 0.999.

Возможности прогнозирования развивающихся технологий. Для оценки возможностей прогнозирования развивающихся технологий необходимо разделить реальные данные на известные и прогнозируемые. При плавном изменении объема известных данных построена зависимость точности прогноза от объема известных данных (рис. 4).

Данный эксперимент становится возможным только при условии справедливости предположения о том, что число пользователей и интенсивность взаимодействия между ними известны и не меняются со временем.

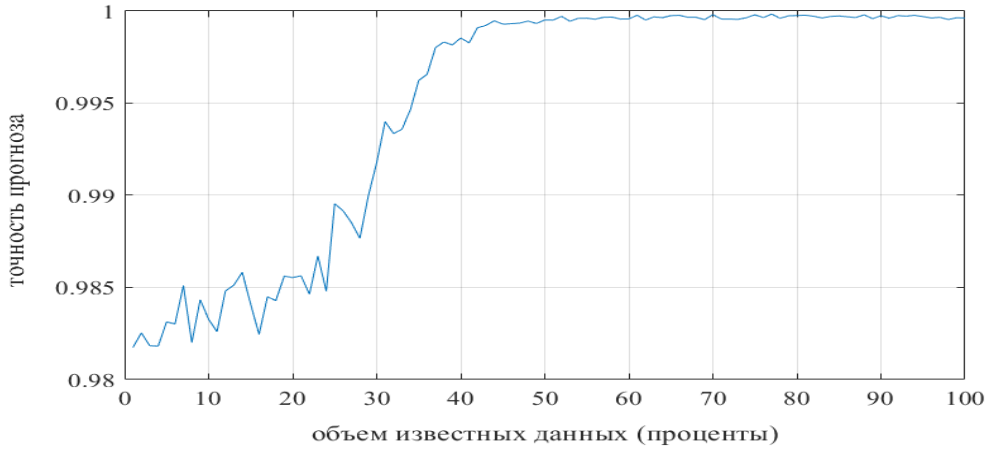

Рис. 4 – Зависимость точности прогноза от объема известных данных
Fig. 4 – Dependence of forecast accuracy on the volume of known data

График зависимости точности прогноза от объема доступных данных имеет характерно выраженный рост в диапазоне 20-40%, что говорит о том, что большая часть пользователей уже приобрела новую технологию, поэтому прогноз становится тривиальным, тем не менее даже на ранних этапах появления технологии становится возможным прогнозировать ее распространение с точность не менее 0,982.

Необходимо отметить, что наличие некорректности исходных данных влияет на точность прогноза, поэтому на начальном этапе исследования важно произвести отбор исходных данных с целью обеспечения монотонности тренда [1-3, 15-17].

Вывод. Предложенный подход может быть использован для аппроксимации данных о распространении новых технологий при условии стационарности рынка с точки зрения постоянства числа пользователей и интенсивности взаимодействия между ними.

Для наилучшего моделирования необходимо проводить прогноз на основе достаточно корректных, не искаженных данных, обладающих необходимой монотонностью, позволяющей избежать снижения точности моделирования.

После получения точного прогноза становится возможным оценить особенности рынка, в частности вычислить коэффициент интенсивности взаимодействия между пользователями. Предложенные рекуррентные уравнения могут быть использованы для оценки взаимодействия между потребителями новых технологий.

Предлагаемый способ анализа позволяет категоризировать новые технологические решения, основываясь на скорости их рыночного внедрения и уровне взаимодействия, возникающего между потребителями.

В дальнейшем становится возможным создание справочных таблиц, эталонных значений коэффициента интенсивности взаимодействия пользователей.

Рассмотренные рекуррентные соотношения в дальнейшем могут быть исследованы на чувствительность к изменениям параметров и структуры.

Более сложная динамика распространения новых технологий может быть представлена при наличии конкурентного рынка с несколькими альтернативами. Однако, стоит заметить, что более сложная модель будет требовать более тщательного отбора моделируемых, рассчитываемых, прогнозируемых ситуаций.

Библиографический список:

1. Rogers, E.M. Diffusion of innovation (4th ed.) New York: The free press, 1995
2. Donald N. Merino, Development of a technological S-curve for tire cord textiles, Technological Forecasting and Social Change, Volume 37, Issue 3, 1990, Pages 275-291.
3. Melissa A. Schilling, Melissa Esmundo, Technology S-curves in renewable energy alternatives: Analysis and implications for industry and government, Energy Policy, Volume 37, Issue 5, 2009, Pages 1767-1781.
4. Mariano Nieto, Francisco Lopéz, Fernando Cruz, Performance analysis of technology using the S curve model: the case of digital signal processing (DSP) technologies, Technovation, Volume 18, Issues 6–7, 1998, Pages 439-457.
5. Shields L.B., Gertz T.A., Wilson K.C., et al. Application of the S-curve discontinuity theory to medicine to explain healthcare's past and predict its future. Am J Med Sci 2018.
6. José Ramon San Cristobal, Francisco Correa, Maria Antonia Gonzalez, Emma Diaz Ruiz de Navamuel, Ernesto Madariaga, Andrés Ortega, Sergio Lopez, Manuel Trueba, A Residual Grey Prediction Model for Predicting S-curves in Projects, Procedia Computer Science, Volume 64, 2015, Pages 586-593.
7. Lev Kuandykov; Maxim Sokolov (2010). Impact of social neighborhood on diffusion of innovation S-curve. Decision Support Systems 48(4):531-535. DOI:10.1016/j.dss.2009.11.003
8. Chao, L.C., Chien, C.F., 2009. Estimating project S-curves using polynomial function and neural networks. J. Constr. Eng. Manage. 135 (3), 169–177.
9. Li-Chung Chao, Ching-Fa Chien, A Model for Updating Project S-curve by Using Neural Networks and Matching Progress, Automation in Construction, Volume 19, Issue 1, 2010, Pages 84-91.
10. Debecker, A. and T. Modis, Determination of the uncertainties in S-curve logistic fits. Technological Forecasting and Social Change, 1994. 46(2): p. 153-173.
11. Fred Phillips, On S-curves and tipping points, Technological Forecasting and Social Change, Volume 74, Issue 6, 2007, Pages 715-730.
12. Bahmani-Oskooee, Mohsen and Scott Hegerty (2010), The J- and S- Curves: a survey of the recent literature, Journal of Economic Studies 37: 580-596.
13. Carvalho A.M., Goncalves S., Ruffoni J., Iglesias J.R. (2020) Macroscopic and microscopic perspectives for adoption of technologies in the USA. PLoS ONE. 15(12): e0242676. https://doi.org/ 10.1371/journal.pone.0242676
14. D. Comin, B. Hobijn, Cross-country technology adoption: making the theories face the facts, Journal of Monetary Economics, Volume 51, Issue 1, 2004, Pages 39-83.
15. Глуханов А.С., Поспелов К.Н. Имитационная модель процессов обслуживания и ремонта инженерной инфраструктуры // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2023. – Вып. 7. – С.569-575.
16. Глуханов А.С., Мандрик А.В. Экспресс-анализ имитационной модели процесса обработки заявок на обслуживание и ремонт инженерной инфраструктуры //Известия ТулГУ. Технические науки. – 2023. – Вып. 8. – С.437-441.
17. Боев В.Д. Компьютерное моделирование в среде AnyLogic: учебник для вузов. М.: ЮРАЙТ, 2025. 299 с.

References:

1. Rogers, E.M. Diffusion of innovation (4th ed.) New York: The free press, 1995.
2. Donald N. Merino, Development of a technological S-curve for tire cord textiles. *Technological Forecasting and Social Change.* 1990; 37(3):275-291.
3. Melissa A. Schilling, Melissa Esmundo, Technology S-curves in renewable energy alternatives: Analysis and implications for industry and government. *Energy Policy*. 2009; 37(5):1767-1781.
4. Mariano Nieto, Francisco Lopéz, Fernando Cruz, Performance analysis of technology using the S curve model: the case of digital signal processing (DSP) technologies, *Technovation*. 1998;18(6–7):439-457.
5. Shields L.B., Gertz T.A., Wilson K.C., et al. Application of the S-curve discontinuity theory to medicine to explain healthcare's past and predict its future. Am J Med Sci 2018.

6. José Ramon San Cristobal, Francisco Correa, Maria Antonia Gonzalez, Emma Diaz Ruiz de Navamuel, Ernesto Madariaga, Andrés Ortega, Sergio Lopez, Manuel Trueba, A Residual Grey Prediction Model for Predicting S-curves in Projects, *Procedia Computer Science*. 2015; 64:586-593.
7. Lev Kuandykov; Maxim Sokolov. Impact of social neighborhood on diffusion of innovation S-curve. *Decision Support Systems.* 48(4):531-535. DOI:10.1016/j.dss.2009.11.003
8. Chao, L.C., Chien, C.F., Estimating project S-curves using polynomial function and neural networks. *J. Constr. Eng. Manage.* 2009; 135(3):169–177.
9. Li-Chung Chao, Ching-Fa Chien, A Model for Updating Project S-curve by Using Neural Networks and Matching Progress. *Automation in Construction*. 2010; 19(1):84-91.
10. Debecker, A. and T. Modis, Determination of the uncertainties in S-curve logistic fits. *Technological Forecasting and Social Change*, 1994; 46(2): p. 153-173.
11. Fred Phillips, On S-curves and tipping points. *Technological Forecasting and Social Change*. 2007; 74(6): 715-730.
12. Bahmani-Oskooee, Mohsen and Scott Hegerty, The J- and S- Curves: a survey of the recent literature, *Journal of Economic Studies*. 2010; 37: 580-596.
13. Carvalho A.M., Goncalves S., Ruffoni J., Iglesias J.R. Macroscopic and microscopic perspectives for adoption of technologies in the USA. *PLoS ONE.* 2020;15(12):e0242676.doi.org/ 10.1371/journal.pone.0242676
14. D. Comin, B. Hobijn, Cross-country technology adoption: making the theories face the facts. *Journal of Monetary Economics*. 2004; 51(1):39-83.
15. Glukhanov A.S., Pospelov K.N. Simulation model of the processes of maintenance and repair of engineering infrastructure. *Bulletin of Tula State University. Technical Sciences*. 2023;7:569-575. (In Russ)
16. Glukhanov A.S., Mandrik A.V. Express analysis of the simulation model of the process of processing applications for maintenance and repair of engineering infrastructure. *Bulletin of Tula State University. Technical Sciences*. 2023;8:437-441. (In Russ)
17. Boev V.D. Computer modeling in the AnyLogic environment: a textbook for universities. Moscow: YURAYT, 2025:299 p. (In Russ)

Сведения об авторах:

Антон Викторович Мандрик, старший преподаватель Высшей школы проектной деятельности и инноваций в промышленности, Институт машиностроения, материалов и транспорта; mandryk.av@spbstu.ru; ORCID ID:0000-0003-2621-3680.

Александр Сергеевич Глуханов, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Техносферная безопасность»; promo19_78@mail.ru; ORCID ID: 0000-0002-0897-8690**.**

Information about authors:

Anton V. Mandrik, Senior Lecturer, Higher School of Project Activity and Industrial Innovation, Institute of Mechanical Engineering, Materials, and Transport; mandryk.av@spbstu.ru; ORCID ID: 0000-0003-2621-3680.

Alexander S. Glukhanov, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Assoc. Prof., Department of Technosphere Safety; promo19_78@mail.ru; ORCID ID: 0000-0002-0897-8690.Конфликт интересов/Conflict of interest.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов/The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию/Received 09. 07.2025.
Одобрена после рецензирования/Reviced 07.08.2025.
Принята в печать /Accepted for publication 01.09.2025.