

JEL: C22, C45, D85, O18, R12
УДК 332.1+004.8(571.1/.5)

<https://dx.doi.org/10.14530/se.2025.1.007-032>

Создание первых автономных систем интернета в Сибири как пространственная диффузия инноваций

В.И. Блануца

Блануца Виктор Иванович

доктор географических наук
ведущий научный сотрудник

Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, ул. Улан-Баторская, 1, Иркутск, 664033,
Российская Федерация

E-mail: blanutsa@list.ru

ORCID: 0000-0003-3958-216X

Аннотация. Распространение инноваций влияет на социально-экономическое развитие регионов, но особенности такого распространения не всегда понятны. Обычно изучается контагиозная или иерархическая пространственная диффузия. Однако распространение информационно-коммуникационных нововведений привело к необходимости познания сетевой диффузии. Ранее она не изучалась с помощью алгоритмов искусственного интеллекта и применительно к автономной системе интернета, под которой понимается территориально-распределенная – локальная или региональная – сеть с единым органом управления и собственной политикой маршрутизации. Поэтому целью нашего исследования стало выявление пространственно-временных особенностей создания первых автономных систем в Сибири с помощью специально разработанного алгоритма машинной генерации правил и метаправил. Исследование опиралось на априорные правила, полученные при анализе развертывания почтовых сетей в досоветской Сибири, данные о регистрации автономных систем Сибири в 1995–2017 гг. и значения семи социально-экономических показателей, влияющих на распространение инновации. Предложен алгоритм машинной генерации правил логического вывода, использующий схему генетического отбора, и построения метаправил посредством кластеризации правил. С помощью предложенного алгоритма проведено изучение распространения инновации по 44 населенным пунктам (центрам автономных систем) и 12 регионам Сибири. Получены восемь метаправил продвижения инновации между городами и три метаправила распространения инновации по регионам. Выявлены две инновационные волны, три периода формирования сети и три нетипичных случая создания автономных систем. Установлено, что для Сибири характерно первоочередное обеспечение доступа к интернету в центрах крупных регионов, преимущественно линейная территориальная структура и пульсирующее распространение инновации. Предложено пять направлений дальнейшего изучения диффузионного процесса. Практическая значимость может быть связана с разработкой мероприятий по минимизации негативных социально-экономических последствий от внедрения

информационно-коммуникационных технологий, включая пространственное цифровое неравенство.

Ключевые слова: социально-экономическое нововведение, информационно-коммуникационная сеть, диффузионный процесс, геопространственный искусственный интеллект, кластерный анализ, метаправило, Сибирский федеральный округ

Благодарности. Исследование выполнено за счет средств государственного задания (номер регистрации темы АААА-А21-121012190018-2).

Для цитирования: Блануца В.И. Создание первых автономных систем интернета в Сибири как пространственная диффузия инноваций // Пространственная экономика. 2025. Т. 21. № 1. С. 7–32. <https://dx.doi.org/10.14530/se.2025.1.007-032>

Creating the First Autonomous Systems of Internet in Siberia as a Spatial Diffusion of Innovations

V.I. Blanutsa

Viktor Ivanovich Blanutsa

Doctor of Sciences (Geography)

Leading Researcher

Sochava Institute of Geography SB RAS, 1 Ulan-Batarskaya St., Irkutsk, 664033, Russian Federation

E-mail: blanutsa@list.ru

ORCID: 0000-0003-3958-216X

Abstract. The spread of innovations affects the socio-economic development of regions, but the specifics of such a spread are not always clear. Contagious or hierarchical spatial diffusion is usually studied. However, the spread of information and communication innovations has led to the need to understand network diffusion. Previously, it has not been studied using artificial intelligence algorithms and applied to autonomous systems of Internet, which is understood as a geographically distributed (local or regional) network with a single management body and its own routing policy. Therefore, the purpose of our research was to identify the spatial and temporal features of the first autonomous systems' creation in Siberia using a specially developed algorithm for machine generation of rules and meta-rules. The study was based on a priori rules obtained by analyzing the deployment of postal networks in pre-Soviet Siberia, data on the registration of autonomous systems in Siberia in 1995–2017, and the values of seven socio-economic indicators that influence the spread of innovation. An algorithm for the machine generation of logical inference rules using a scheme of genetic selection and the construction of meta-rules using clustering rules is proposed. The proposed algorithm was used to study the spread of innovation in 44 localities (centers of autonomous systems) and 12 regions of Siberia. Eight meta-rules for promoting innovation between cities and 3 meta-rules for spreading innovation across regions were obtained. Two waves of innovation, three periods of network formation, and three atypical cases of autonomous systems creation have been identified. It has been

established that Siberia is characterized by the priority provision of Internet access in the centers of large regions, a predominantly linear territorial structure and a pulsating spread of innovation. Five directions for further study of the diffusion process are proposed. Practical significance may be associated with the development of measures to minimize the negative socio-economic consequences of information-communication technologies' introduction, including spatial digital inequality.

Keywords: socio-economic innovation, information-communication network, diffusion process, geospatial artificial intelligence, cluster analysis, meta-rule, Siberian Federal District

Acknowledgements. The research was carried out at the expense of the state assignment (topic registration number AAAA-A21-121012190018-2).

For citation: Blanutsa V.I. Creating the First Autonomous Systems of Internet in Siberia as a Spatial Diffusion of Innovations. *Prostranstvennaya Ekonomika = Spatial Economics*, 2025, vol. 21, no. 1, pp. 7–32. <https://dx.doi.org/10.14530/se.2025.1.007-032> (In Russian)

ВВЕДЕНИЕ

Одним из драйверов регионального экономического развития является пространственная диффузия инноваций (Ducruet, Itoh, 2022; Graevenitz et al., 2022; Hennig, Saggau, 2012; Hocine, Belarbi, 2024; McCombie, 1982; Meir, 1981; Wang, 2017). Начиная с Т. Хэгерстранда (Hagerstrand, 1967), многие исследователи анализировали распространение различных социально-экономических нововведений от некоторых локализованных источников (очагов, ядер) ко всем остальным территориям с целью прогнозирования диффузионного процесса и управления им (Bednarz, Broekel, 2020; Bokányi et al., 2022; Feller et al., 1982; Feola, Him, 2016; Liefoghe et al., 2024; Lin, Kwan, 2016; Loboda, 1974; Qin et al., 2024; Shi, Goulias, 2024; Zhang et al., 2024). Эти процессы изучались и при внедрении информационно-коммуникационных технологий (Блануца, 2021б; Земцов и др., 2022; Ding et al., 2010; Kim et al., 2017; Liefoghe, 2018; Tiner, 2010; Wang et al., 2021). Однако пространственная диффузия интернета на уровне автономных систем (Autonomous System, AS) ранее не анализировалась. Предпочтение отдавалось оценке взаимодействия AS для определения экономической связности регионов (Блануца, 2018), что никак не объясняло последовательность распространения новой услуги (доступ в интернет), а также очередность формирования экономических агентов, предоставляющих такую услугу. Актуальность подобных исследований обусловлена необходимостью ретроспективного анализа для обоснования прогноза создания в российских городах и регионах экономических агентов по обеспечению доступа к будущим прорывным технологиям при переходе к экономике данных¹.

¹ Экономика данных / Национальные проекты России. 2025. URL: <https://национальные-проекты.рф/new-projects/ekonomika-dannykh/> (дата обращения: январь 2025).

Под автономной системой понимается экономический объект в виде территориально-распределенной информационно-коммуникационной сети с единым органом управления (центром) и собственной политикой маршрутизации (о распознавании и функционировании данных систем см.: Beiró et al., 2015; Funel, 2019; Pastor-Satorras, Vespignani, 2004; Zhang et al., 2005). Такими системами владеют операторы связи, интернет-провайдеры, точки обмена трафиком, сети доставки контента, университеты и другие организации. Взаимодействие (обмен трафиком) между AS осуществляется на основе протокола пограничного шлюза (Border Gateway Protocol) и коммерческих соглашений между владельцами этих систем. Создавая новую AS, необходимо подключиться хотя бы к одной уже существующей системе, чтобы получить доступ к глобальной сети интернет. При этом создаваемые сети могут быть локальными (в пределах одного населенного пункта), региональными, межрегиональными, национальными и наднациональными. Поскольку орган управления каждой системы локализован в географическом пространстве (при международной регистрации и присвоении уникального номера указывается местоположение центра сети), то можно анализировать распространение идеи создания AS среди населенных пунктов изучаемой территории.

Известны три способа (типа, модели) проникновения нововведения на новые территории (Блануца, 2015): контактная (или сплошная; горизонтальное распространение инновации на соседние точки пространства), иерархическая (или каскадная; вертикальное – сверху вниз – перемещение инновации по субординации отдельных точек пространства) и сетевая (горизонтальное продвижение инновации между отдельными точками, не имеющими соподчинения и не являющимися соседями, но создающими постоянно функционирующую линейно-узловую структуру) диффузии. Кроме этого, возможно отсутствие какой-либо пространственно-временной закономерности распространения нововведения (Блануца, 2015; Cassetti, Semple, 1969), что соответствует случайному процессу. Если гипотеза о случайном распространении не подтверждается, то должна быть некоторая «пространственная логика» (Davids, Frenken, 2018). Также допускается (кроме трех перечисленных способов) ситуация, когда эта логика неизвестна и находится в «сфере неопределенности» (Блануца, 2015). Для подтверждения гипотез о контактной или иерархической пространственной диффузии используются различные количественные методы (Дубинина, 2023; Шмидт, Лободина, 2015; Hocine, Belarbi, 2024; Webber, Joseph, 1979), а по сетевой модели, которая сложнее других, такие методы отсутствуют.

Построение качественно-количественных алгоритмов выявления сетевой диффузии в эпоху бурного развития искусственного интеллекта мо-

жет опираться на интеллектуальный анализ данных о последовательности проникновения инновации на новые территории. При изучении городов и регионов подобные задачи решаются с помощью геопространственного искусственного интеллекта (De Sabbata et al., 2023; Handbook..., 2023; Korczewska, 2022; Liu et al., 2024). В настоящее время наиболее эффективные алгоритмы интеллектуального анализа данных создаются путем объединения глубокого машинного обучения с процедурами логического вывода на основе правил (деревьев решений, графов знаний и др.) в рамках нейросимвольного искусственного интеллекта (Bhuyan et al., 2024; Liu et al., 2024; Mai et al., 2022).

Обобщая приведенные выше уточнения и проецируя их на населенные пункты Сибирского федерального округа, была сформулирована цель настоящего исследования – выявить пространственно-временные особенности создания первых автономных систем интернета в Сибири с помощью нейро-символьного искусственного интеллекта в виде машинной генерации правил и метаправил. Для достижения этой цели потребовалось решить следующие задачи: (1) сформировать базу данных о создании сибирских AS; (2) построить базу правил распространения информационно-коммуникационных нововведений; (3) разработать алгоритм генерации правил и метаправил пространственной диффузии инноваций; (4) определить пространственно-временные особенности появления первых автономных систем в Сибири; (5) наметить направления дальнейших исследований.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

База данных об автономных системах Сибири создана на основе сведений, представленных на новосибирском сайте «Эксперт связи»¹, уточненных и дополненных по международной аналитической платформе RIPEstat². Сбор данных осуществлялся с момента регистрации на RIPE первой сибирской автономной системы (10 марта 1995 г. под номером AS3335 зарегистрирована сеть Новосибирского государственного университета) и до 1 января 2018 г.³ За это время создано 360 AS, а пик открытия новых систем пришелся на 2010 г. (рис. 1). Как и при распространении других инноваций, после прохождения пика наблюдалось затухание процесса. Что касается пространственной диффузии, то для ее понимания необходимо знать время

¹ Автономные системы (Россия) / Эксперт связи. 2024. URL: <https://expertsvyazi.ru/index.php?id=bgpcity> (дата обращения: ноябрь 2024).

² RIPEstat. URL: <https://stat.ripe.net/about/> (дата обращения: ноябрь 2024).

³ На 1 января 2018 г. в состав Сибирского федерального округа входили 12 регионов: республики Алтай, Бурятия, Тыва и Хакасия, Алтайский, Забайкальский и Красноярский края, Иркутская, Кемеровская, Новосибирская, Омская и Томская области.

и место появления инновации. Время фиксировалось по дате международной регистрации системы, а место определялось по населенному пункту, в котором находился центр управления системой. В анализируемый отрезок времени такие центры были созданы в 44 поселениях Сибири, а наибольшее количество новых городов-центров AS зафиксировано в 2009 г. (рис. 2).

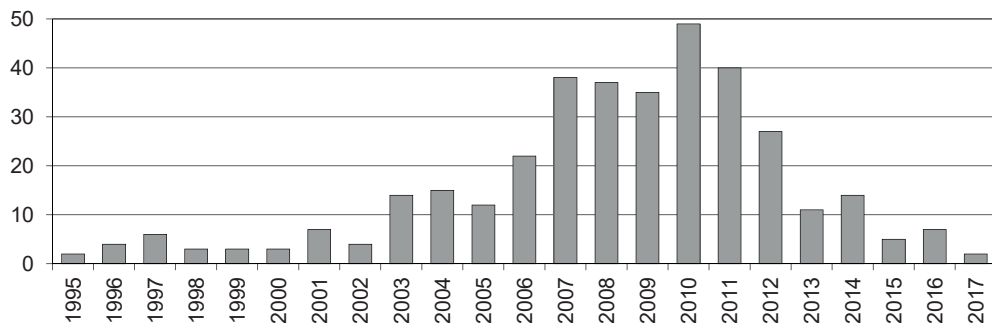


Рис. 1. Изменение ежегодного количества автономных систем, созданных в сибирских городах до 1 января 2018 г.

Fig. 1. Changes in the annual number of autonomous systems established in Siberian cities before January 1, 2018

Источник: составлено автором.

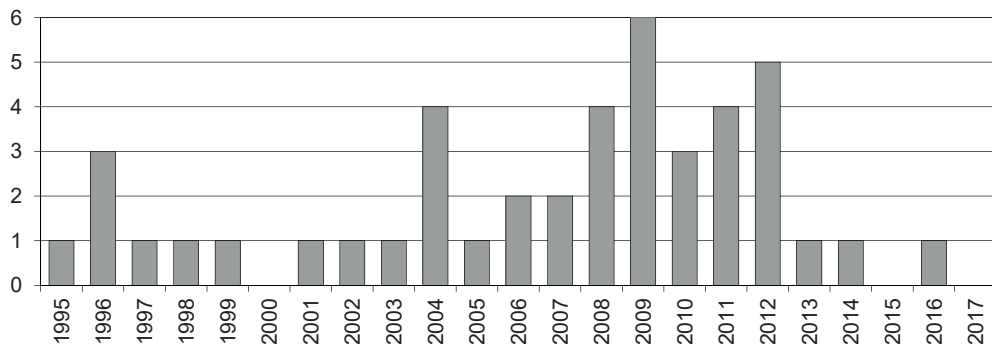


Рис. 2. Изменение ежегодного количества новых городов-центров автономных систем в Сибири в 1995–2017 гг.

Fig. 2. Changes in the annual number of new cities-centers of autonomous systems in Siberia in 1995–2017

Источник: составлено автором.

Все анализируемые населенные пункты упорядочены по времени создания в них первой автономной системы, и им присвоен порядковый номер: AS01 – первая система в Сибири (создана в Новосибирске), AS02 – хронологически следующая система (15.02.1996) в другом городе (Иркутске), ...

AS44 – последняя анализируемая система, начавшая работать 13 января 2016 г. в Саяногорске. В тех случаях, когда в один календарный день регистрировалось более одной системы из Сибири, AS упорядочивались по номеру международной регистрации. Например, 1 сентября 2004 г. зарегистрировали первые системы в городах Северск и Междуреченск, которые получили в нашей базе данных, соответственно, AS13 и AS14, так как имели регистрационные номера AS33892 и AS33894. Поскольку каждая новая автономная система должна подключаться к существующей сети интернет, то при изучении диффузионного процесса необходимо учитывать основные оптоволоконные линии связи между городами. Такая информация взята из аналитического отчета VISION¹. В итоге исходные данные можно представить в виде неориентированного древовидного графа, вершинами которого являются города, а ребрами – оптоволоконные линии (рис. 3). Визуальный анализ этого графа не позволяет понять «пространственную логику» перемещения инновации из AS01 во все остальные сибирские поселения.

Опираясь на ранее проведенные исследования по распространению инноваций по созданию первых почтовых сетей в Азиатской России (Блануца, 2016), при изучении проникновения автономных систем интернета на новые территории предложено оперировать семью показателями (с указанием градаций): уровень регионального центра (RC1 – город-центр крупного региона; RC2 – город-центр небольшого региона, к которым отнесены AS15, AS17 и AS20; RC3 – все остальные поселения-центры AS), численность населения региона² (RP1 – более 2 млн чел., RP2 – 1–2, RP3 – 0,5–1,0, RP4 – менее 0,5 млн чел.), численность населения города (UP1 – более 1 млн, UP2 – 0,50–1,00, UP3 – 0,25–0,50, UP4 – 0,10–0,25, UP5 – 0,05–0,10, UP6 – менее 0,05 млн чел.), порядок соседства региона относительно Новосибирской области (RN0 – Новосибирская область, RN1 – соседи Новосибирской области, RN2 – соседи RN1, RN3 – соседи RN2, RN4 – соседи RN3, RN5 – соседи RN4)³, порядок соседства городов относительно Новосибирска (UN1 – соседи Новосибирска по оптоволоконным линиям, UN2 – соседи UN1, ..., UN12 – соседи UN11), новизна сети (NewNET – до города проложена новая сеть, OldNET – город расположен на существующей сети),

¹ Магистральные сети связи в России / ComNews. VISION. 2020. URL: <https://www.comnews.ru/content/211042/2020-10-21/2020-w43/magistralnye-seti-svyazi-rossii> (дата обращения: ноябрь 2024).

² Здесь и далее (UP) учитывалась численность населения по данным Росстата на 1 января того года, когда инновация проникла в рассматриваемый регион или город.

³ Соседи определялись по оптоволоконным линиям (см. рис. 3). Соседями Новосибирской области являются Омская область, Алтайский край и Кемеровская область. В свою очередь, соседями соседей Новосибирской области являются Республика Алтай, Томская область и Красноярский край. Аналогично определялся порядок соседства городов (UN).

уплотнение сети региона (порядковые номера по хронологии проникновения инновации в города каждого региона; SEA1 – 1–3-й города-центры AS в регионе, SEA2 – 4–6-й, SEA3 – 7–9-й, SEA4 – 10–12-й города-центры AS). При этом RC, RP и UP обычно рассматриваются при иерархической диффузии, RN и UN – при контагиозной диффузии, а NET и SEA – при сетевой диффузии инноваций. Тем не менее для всестороннего анализа диффузионного процесса целесообразно оперировать всеми перечисленными показателями.

МЕТОДЫ

Для понимания закономерностей пространственной диффузии инноваций разработан алгоритм машинного обучения с подкреплением. Не рассматривая технические подробности, отметим, что алгоритм можно представить в виде последовательности действий с подключением к базе данных и базе правил (*рис. 4*). В первую базу включены статистические данные по сибирским городам и регионам, а также по автономным системам. Более интересна вторая база, аналоги которой редко встречаются в мировой науке (Laurini, 2017; Nowak-Brzezińska, Horyń, 2020; Prentzas, Natzilygeroudis, 2005). Использовались правила логического вывода «ЕСЛИ – ТО», применяемые в экспертных системах (Cortez et al., 2018) и машинном обучении (Kierner et al., 2023). Эти правила состоят из набора условий («ЕСЛИ ... И ... ИЛИ ...») и результата («ТО ...»), иногда добавляемые уточнением «ИНАЧЕ ...». В машинном обучении они встречаются в пяти архетипах (Kierner et al., 2023): правила встроены в архитектуру машинного обучения, машина предварительно обрабатывает исходные данные для вывода на основе правил, правила используются для обработки данных перед обучением, правила влияют на обучение, параллельное применение правил и машинного обучения. В нашем случае (см. *рис. 4*) можно говорить о шестом архетипе – машинной генерации правил и метаправил. К последним относятся правила, вытекающие из первичных правил (Laurini et al., 2016), обобщающие их и являющиеся более высоким уровнем логического вывода.

Машинное обучение заключалось в использовании шаблонов, полученных в предыдущих исследованиях и включенных в базу правил, построении новых правил для изучаемой территории, сравнении этих правил с реальной ситуацией и корректировкой в случае необходимости (подкреплялись правильные решения), определении метаправил. В качестве предыдущих исследований по информационно-коммуникационным сетям Сибири использовались результаты изучения развертывания первых почтовых сетей (Блануца, 2016), которые переводились в правила «ЕСЛИ – ТО». Прогноз (правило)

проникновения инновации по созданию AS на новую территорию осуществляется с помощью генетического метода машинного обучения (Jabla et al., 2022), а построение метаправил производилось посредством кластеризации правил (Nowak-Brzezińska, Horyń, 2020).

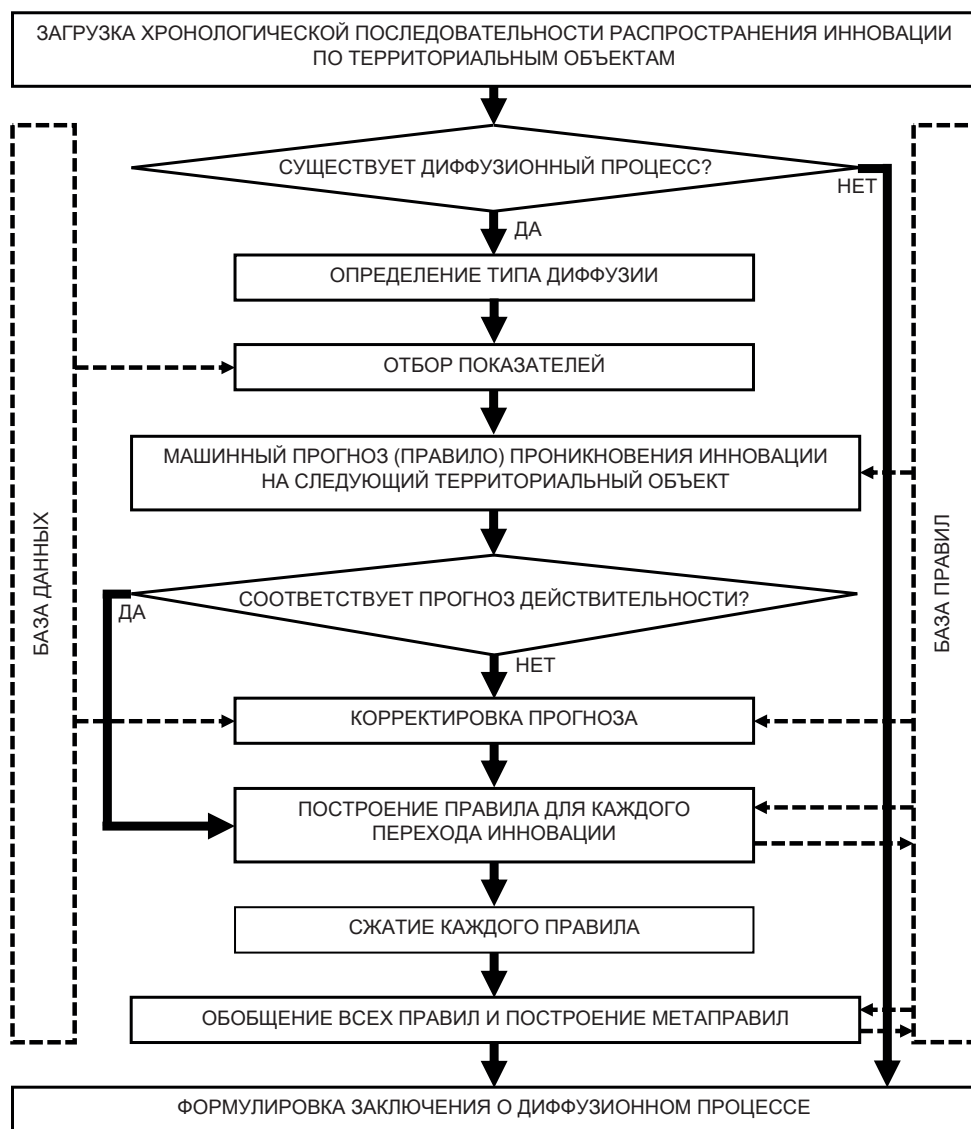


Рис. 4. Машинная генерация правил «ЕСЛИ – ТО» и их обобщений в виде метаправил для анализа пространственной диффузии инноваций

Fig. 4. Machine generation of if-then rules and their generalizations in the form of meta-rules for the analysis of innovations' spatial diffusion

Источник: составлено автором.

Для генерации метаправил применялся иерархический кластерный анализ (Блануца, 2016), представляющий последовательное объединение правил на основе расстояний D_{ij} между i -м и j -м правилами, характеризующими проникновение инновации в i -й и j -й города (среднеарифметическое от разницы градаций по каждому показателю, отнесенному к наибольшей разнице и переведенному в интервал от 0 до 1), присоединение объектов к кластерам по наименьшему среди максимальных расстояний и определение оптимального числа кластеров по ярусу группировочного дерева (дендрограммы) с наибольшей теоретико-графовой сложностью (Блануца, 2016; 2021a). Следует также отметить, что при кластеризации целесообразно идентифицировать «выброс» (Nowak-Brzezińska, Horyń, 2020) – правило, одно из условий которого не характерно для кластера.

РЕЗУЛЬТАТЫ

После загрузки хронологической последовательности распространения анализируемой инновации из AS01 в AS02–AS44 (см. *рис. 3*) проводилась проверка этой последовательности на наличие случайного процесса. Для этого использовался онлайн-генератор случайных чисел¹ и определялся коэффициент ранговой корреляции Спирмена². Подобные операции уже применялись для оценки случайности распространения информационно-коммуникационных инноваций (Блануца, 2015). В нашем случае полученное значение коэффициента корреляции (0,068) указывало на отсутствие случайного процесса (статистическая значимость достигается при 0,390). Тогда пространственная диффузия должна следовать одному из трех типов – контактиозному, иерархическому или сетевому. Априори можно исходить из того, что автономные системы, формирующие постоянно функционирующую линейно-узловую структуру, будут распространяться по «пространственной логике» сетевой диффузии, частично напоминающей два других типа. Проверить это можно с помощью коэффициента ранговой корреляции.

При контактиозном распространении инновация из Новосибирска должна сразу переместиться в соседние города (по основным оптоволоконным линиям; см. *рис. 3*) – Обь, Бердск и Юрга, а затем в соседей этих трех поселений и т. д. Полученная последовательность (AS01 → AS16, AS24, AS34 → AS05, AS07, AS30 → AS08, AS12, AS21, AS43 → ...) сравнивалась с анализируемым рядом (AS01 → AS02 → AS03 → ...). Ранговая корреляция была боль-

¹ Генератор случайных чисел / Рандомус. 2024. URL: <https://randomus.ru/quick?from=1&to=44&count&norepeat=1> (дата обращения: декабрь 2024).

² Математические методы обработки данных / Psychol-OK. 2024. URL: <https://psychol-ok.ru/statistics/spearman/> (дата обращения: декабрь 2024).

ше, чем при сравнении со случайным процессом, но не стала статистически значимой ($0,192 < 0,390$). Что касается иерархической диффузии (центр федерального округа → центр региона → муниципальный центр → остальные населенные пункты), то она более соответствовала рассматриваемой последовательности ($0,757 > 0,390$), но не обеспечивала полное объяснение ($1,000 > 0,390$). В такой ситуации был запущен процесс имитации сетевой диффузии с помощью семи показателей (условий проникновения инновации в город) и алгоритма машинной генерации правил «ЕСЛИ – ТО» (см. рис. 4).

Эффективность алгоритма (правильное предсказание проникновения инновации в следующий город) во многом зависит от количества априорных и сгенерированных правил, на которые опирается генетический метод машинного обучения. К сожалению, исходный массив априорных правил был небольшим и относился к досоветскому периоду распространения информационно-коммуникационных инноваций. Однако для запуска алгоритма было достаточно трех правил из исходного массива ($\Pi_{\text{АПРИОРИ}}$):

$\Pi_{\text{АПРИОРИ}}^1$ (правило первой инновационной волны): ЕСЛИ инновация распространяется из некоторого населенного пункта как регионального центра (AS01), ТО эта инновация сначала будет проникать в центры регионов со значительной (для внедрения нововведения) численностью населения (RC1);

$\Pi_{\text{АПРИОРИ}}^2$ (правило чередования действий по расширению и уплотнению сети): ЕСЛИ для проникновения инновации в новый населенный пункт потребуется расширение существующей сети (создание новой линии связи; NewNET), ТО проникновение в следующие населенные пункты будет представлять собой последовательную смену расширения (NewNET) на уплотнение (OldNET); соотношение между количеством расширений и числом уплотнений (NewNET, NewNET → OldNET или NewNET, NewNET, NewNET → OldNET, или NewNET, NewNET, OldNET → OldNET, или OldNET, OldNET → NewNET, ...) зависит от шага или стадии развития диффузионного процесса и фиксируется с помощью вероятности перехода от расширения к уплотнению и наоборот (Блануца, 2016);

$\Pi_{\text{АПРИОРИ}}^3$ (правило перехода инновации к населенным пунктам в удаленных или приближенных регионах относительно источника нововведения): ЕСЛИ первоначальное перемещение инновации (из RN0) призвано подключить к сети удаленный регион (например RN3), ТО последующие подключения населенных пунктов будут происходить путем смены одного или нескольких приближений (к примеру, RN2 или RN1) на одно или несколько удалений (например, RN4 или RN5) от источника инновации.

Три приведенных правила связаны с показателями RC, RN и NET. Остальные показатели первоначально (на первой инновационной волне) зависели от RC и RN (ЕСЛИ RC1, ТО RP1 ИЛИ RP2; ЕСЛИ RC1, ТО UP1

ИЛИ UP₂; ЕСЛИ RC₁, ТО SEA₁; ЕСЛИ $RN_i > RN_j$, ТО $UN_i > UN_j$). Далее с помощью машинного обучения происходило уточнение правил, что способствовало расширению базы правил и более точному прогнозированию (уменьшению числа неопределенностей «ИЛИ» в условиях «ЕСЛИ ...»). В результате этого на первом шаге машина сделала прогноз условий перехода инновации в AS02: ЕСЛИ RC₁ И RP₁ И (UP₁ ИЛИ UP₂) И (RN₃ ИЛИ RN₄ ИЛИ RN₅) И (не определено UN) И NewNET И SEA₁, ТО AS02. Несмотря на нечеткость («ИЛИ») двух условий и отсутствие значения UN, первое машинное правило однозначно идентифицировало второй сибирский город с автономной системой – Иркутск. Сравнение этого правила с действительностью позволило откорректировать условия и записать первое правило (П1):

П1: ЕСЛИ RC₁ И RP₁ И UP₂ И RN₃ И UN₉ И NewNET И SEA₁, ТО AS02.

Дальнейшее обучение с подкреплением прогнозов, соответствующих действительности, привело к формулировке еще 42 правил. В качестве примера приведем пять правил:

П2: ЕСЛИ RC₁ И RP₂ И UP₃ И RN₂ И UN₄ И NewNET И SEA₁, ТО AS03.

П20: ЕСЛИ RC₃ И RP₁ И UP₄ И RN₁ И UN₃ И OldNET И SEA₁, ТО AS21.

П30: ЕСЛИ RC₃ И RP₁ И UP₅ И RN₂ И UN₆ И OldNET И SEA₃, ТО AS31.

П40: ЕСЛИ RC₃ И RP₁ И UP₅ И RN₁ И UN₆ И OldNET И SEA₄, ТО AS41.

П43: ЕСЛИ RC₃ И RP₃ И UP₆ И RN₃ И UN₈ И NewNET И SEA₂, ТО AS44.

Эти правила представлены в полной записи, но в целях экономии машинного времени целесообразно исключать те условия, которые являются излишними для идентификации следующего города. В результате такой операции получились сокращенные правила ($\Pi_{\text{СОКР}}$), необходимые и достаточные для понимания пространственной диффузии рассматриваемой инновации (пример первых пяти правил):

$\Pi_{\text{СОКР}}1$: ЕСЛИ RC₁ И RN₃, ТО AS02.

$\Pi_{\text{СОКР}}2$: ЕСЛИ RC₁ И RN₂ И NewNET, ТО AS03.

$\Pi_{\text{СОКР}}3$: ЕСЛИ RC₁ И RN₂ И OldNET, ТО AS04.

$\Pi_{\text{СОКР}}4$: ЕСЛИ RC₁ И UP₁ И RN₁ И NewNET, ТО AS05.

$\Pi_{\text{СОКР}}5$: ЕСЛИ RC₁ И RN₄ И NewNET, ТО AS06.

Построение метаправил осуществлялось на основе всех сгенерированных и скорректированных полных правил (П1–П43). Результаты расчета расстояний D_{ij} между каждой парой правил сводились в симметричную матрицу размером 43 на 43. Последующая кластеризация осуществлялась посредством присоединения i -го правила к группе правил K (или к одиночному j -му правилу) в том случае, когда максимальное расстояние между i -м правилом и каждым правилом, входящим в K (или j -м правилом вне кластеров), было минимально для матрицы. В нашем случае объединение

отдельных правил в группы правил (кластеры) вначале было следующим: AS37 и AS41 при $D_{37,41} = 0,0012$, AS22 и AS23 при $D_{22,23} = 0,0260$, AS28 и AS31 при $D_{28,31} = 0,0260$, AS05 и AS07 при $D_{05,07} = 0,0286$, AS12 и AS43 при $D_{12,43} = 0,0286$, AS16 и AS24 при $D_{16,24} = 0,0286$, AS27 и AS29 при $D_{27,29} = 0,0390$. По мере увеличения максимального расстояния между правилами происходило сокращение числа кластеров и рост их размера. Последовательность объединения правил в кластеры представлена в виде дендрограммы (рис. 5). Получилось 33 варианта кластеризации (без учета образования одного кластера при $D_{ij} = 0,7775$).

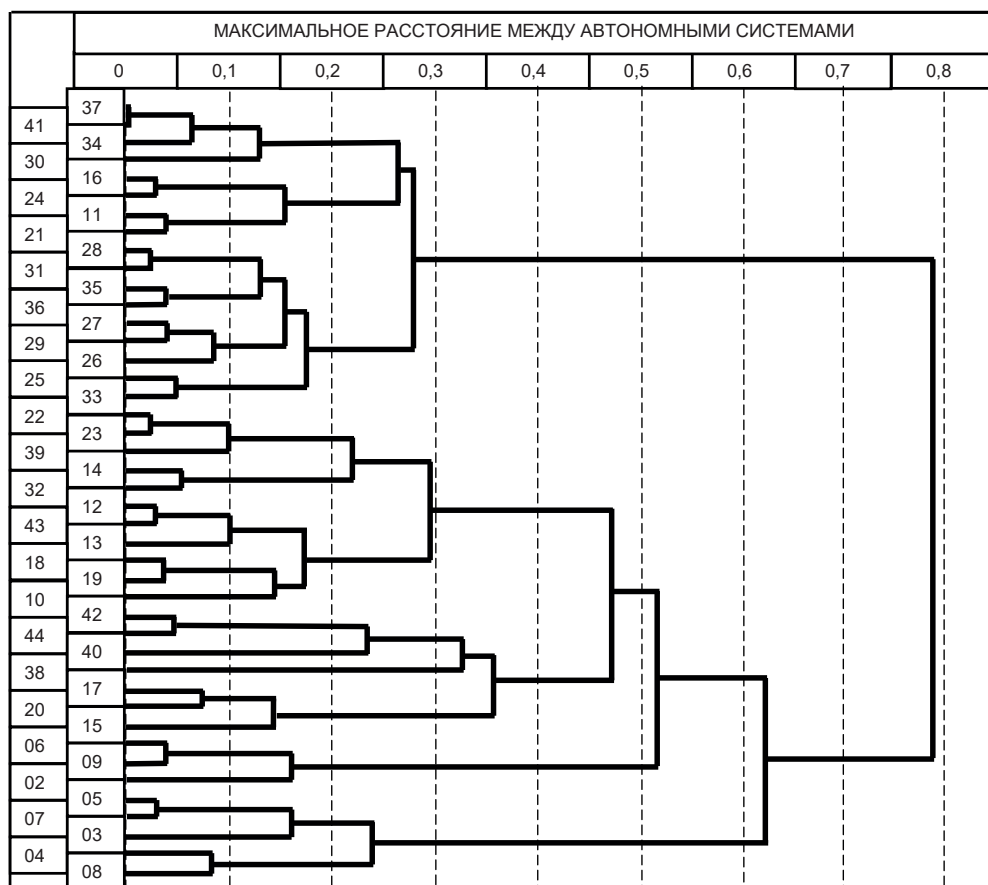


Рис. 5. Дендрограмма кластеризации правил, характеризующих условия проникновения инновации по созданию автономных систем в 43 населенных пункта Сибири (номера 02–44 приведены на рис. 3) в 1996–2016 гг.

Fig. 5. A dendrogram of clustering rules characterizing the conditions for the penetration of innovations in the creation of autonomous systems in 43 settlements of Siberia (numbers 02–44 are shown in Fig. 3) in 1996–2016

Источник: составлено автором.

Для выбора оптимального варианта кластеризации дендрограмма (см. рис. 5) преобразована в группировочное дерево посредством введения шага $\Delta D_{ij} = 0,0500$. В результате этого исходный массив правил зафиксирован в 43 вершинах, после чего следовал первый ярус дерева с 30 вершинами (кластерами) при $D_{ij} \leq 0,0500$ (вершина кластера соединялась ребрами с вершинами правил, входящими в данный кластер), 2-й ярус с 25 вершинами при $D_{ij} \leq 0,1000$, 3-й ярус с 18 вершинами при $D_{ij} \leq 0,1500$ и далее с уменьшением числа кластеров (13→10→7→6→5→5→4→3→3→2→2→2→1). Если исключить ярусы с повторяющимся количеством кластеров и последний ярус (один кластер), то получилось 11 оригинальных вариантов кластеризации. Для выбора среди них оптимального распределения правил по кластерам проводилась оценка относительной теоретико-графовой сложности каждого яруса (Блануца, 2021а). В итоге сложность изменялась от 1-го до 15-го яруса следующим образом: 0,0579; 0,0619; 0,0656; 0,0755; 0,0786; 0,0878; 0,0867; 0,0868; 0,0850; 0,0800; 0,0833; 0,0823; 0,0858; 0,0846; 0,0836. Оптимальный вариант соответствовал наиболее сложному – шестому – ярусу (7 кластеров при $D_{ij} \leq 0,3000$). Количество правил в кластерах от первого до седьмого (продвигаясь вниз по дендрограмме; см. рис. 5) составило 17, 11, 3, 1, 3, 3 и 5.

Обобщение правил, входящих в каждый кластер (КЛ), и их последующее сокращение до приемлемого минимума позволило сформулировать метаправила (МП):

МП1: ЕСЛИ RC1, ТО КЛ6 И КЛ7, ИНАЧЕ КЛ1 И КЛ2 И КЛ3 И КЛ4 И КЛ5;

МП2: ЕСЛИ RC1 И (RN1 ИЛИ RN2), ТО КЛ7;

МП3: ЕСЛИ RC1 И (RN3 ИЛИ RN4 ИЛИ RN5), ТО КЛ6;

МП4: ЕСЛИ RC2, ТО КЛ5;

МП5: ЕСЛИ RC3 И RP3 И OldNET, ТО КЛ4;

МП6: ЕСЛИ RC3 И RP3 И NewNET, ТО КЛ3;

МП7: ЕСЛИ RC3 И RP1 И NewNET, ТО КЛ2;

МП8: ЕСЛИ RC3 И RP1 И OldNET, ТО КЛ1.

Если не учитывать МП1, то остальные метаправила позволили идентифицировать проникновение рассматриваемой инновации в сибирские города по ограниченному количеству условий (20), но с двумя ошибками (по одному «выбросу» в КЛ2 и КЛ3). Для сравнения отметим, что оперирование исходными полными правилами дает описание диффузионного процесса в Сибири с помощью 301 условия. Что касается МП1, то оно в сопоставлении с хронологией создания AS определяет границы первой инновационной волны, охватившей центры восьми сибирских регионов в 1996–2002 гг. Последовавшая затем вторая волна (2003–2016 гг.) позволила создать автономные системы еще в 35 населенных пунктах. В отношении процессов рас-

ширения (NewNET) и уплотнения (OldNET) сети можно выделить периоды территориальной экспансии (1996–2008 гг.; AS02–AS23; 16 расширений при 5 уплотнениях), закрепления территории (2009 г. – апрель 2012 г.; AS24–AS38; 14 уплотнений при 1 расширении) и проникновения на периферию (продвижение за пределы зоны экспансии и закрепления; май 2012 г. – 2016 г.; AS39–AS44; 5 расширений при 1 уплотнении).

Два «выброса» образовались потому, что AS13 имеет RP2 при RP1 во всех остальных правилах, входящих в КЛ2, а AS40 характеризуется RP2 при преобладании RP3 в КЛ3. Если сопоставить годы создания AS13 (2004 г.) и AS40 (2012 г.) с медианным временем формирования автономных систем в условиях RC3, RP1 (2009 г.) и RC3, RP3 (2013 г.), то получится относительно ускоренное построение систем в городах Северск (закрытое административно-территориальное образование с Сибирским химическим комбинатом) и Краснокаменск (моногород с Приаргунским производственным горно-химическим объединением по добыче урана). В качестве аномалий кластеризации («выбросов») также могут выступать кластеры, состоящие из одного правила. В нашем случае таковым является четвертый кластер с AS38 в моногороде Черногорск, специализирующемся на добыче угля. Таким образом, все «выбросы» в кластеризации правил, характеризующих проникновение в населенные пункты Сибири инновации создания автономных систем интернета, связаны с моногородами.

Процесс распространения анализируемой инновации, неравномерный во времени (см. *рис. 2*), разнонаправленный в пространстве (см. порядковые номера на *рис. 3*), не уходящий из городов и объединяющий их в единую постоянно функционирующую структуру (см. *рис. 3*), соответствовал сетевой модели пространственной диффузии (Блануца, 2015, 2016). Сгенерированные метаправила уточнили специфику сетевой диффузии в пределах Сибири: первоочередное обеспечение доступа к интернету в центрах крупных регионов (МП2, МП3), преимущественно линейная территориальная структура (Новосибирск и 5 из 8 городов в КЛ6 и КЛ7 расположены на линии Транссибирской железной дороги; см. *рис. 3*) и пульсирующее распространение инновации (то удаление, то приближение к Новосибирску в сочетании с чередованием расширения и уплотнения сети; МП5–МП8 с дополнением по показателю UN).

Генерация 43 правил и их свертывание в 8 метаправил выполнено в автоматическом режиме, что необходимо для повышения эффективности прогнозирования сложных диффузионных процессов (Ponen et al., 2006) и будущего перехода к интеллектуальному анализу «больших данных» (Taherdoost, 2024; Tsai, Chen, 2022). Однако в настоящее время геопространственный искусственный интеллект еще не научился выполнять содержательную интер-

претацию результатов машинной генерации правил по пространственной диффузии инноваций. Поэтому последняя операция предложенного алгоритма – формулировка заключения – проведена по старинке (с помощью человеческого интеллекта). В сокращенном виде получилось следующее заключение: инновация по созданию автономных систем интернета распространилась в Сибири от города Новосибирск, где она появилась в марте 1995 г., к центрам крупных регионов и далее к периферийным населенным пунктам в ходе 12-летнего расширения зоны доступа к интернету и последующего 9-летнего насыщения этой зоны новыми системами для формирования единой линейно-узловой структуры с главной оптоволоконной магистралью вдоль Транссибирской железной дороги.

В приведенных выше результатах территориальным объектом являлся населенный пункт, но аналогичные расчеты можно выполнить и относительно регионов. Тогда будут учитываться только первые автономные системы в каждом регионе. Не изменяя прежнюю нумерацию, с помощью предложенного алгоритма (см. *рис. 4*) было проанализировано проникновение инновации из Новосибирской области (AS01) в Иркутскую (AS02) и Томскую (AS03) области, Красноярский край (AS04), Омскую область (AS05), Республику Бурятия (AS06), Алтайский край (AS07), Кемеровскую область (AS08), Забайкальский край (AS09), республики Алтай (AS15), Хакасия (AS17) и Тыва (AS20). Для этого использовались показатели, относящиеся к регионам (RC, RP, RN и NET). Дополнительно из базы данных извлечены сведения по еще одному показателю – возможности транзита данных через региональную сеть (TRN), определяемому по основным оптоволоконным линиям связи между регионами (см. *рис. 3*; учитывались два значения: TraTRN – имеется возможность и EndTRN – отсутствует возможность, что характерно для периферийных регионов Сибири). Первое значение (TraTRN) наблюдалось в AS01, AS02, AS04, AS06, AS07 и AS17.

Машинная генерация правил последовательного проникновения анализируемой инновации из AS01 в остальные сибирские регионы привела к следующим результатам (сокращенные правила):

$P_{\text{РЕГ}}1 = \text{ЕСЛИ } RC1 \text{ И } RN3, \text{ ТО } AS02;$

$P_{\text{РЕГ}}2 = \text{ЕСЛИ } RC1 \text{ И } RP2 \text{ И } RN2, \text{ ТО } AS03;$

$P_{\text{РЕГ}}3 = \text{ЕСЛИ } RC1 \text{ И } RN2, \text{ ТО } AS04;$

$P_{\text{РЕГ}}4 = \text{ЕСЛИ } RC1 \text{ И } \text{NewNET}, \text{ ТО } AS05;$

$P_{\text{РЕГ}}5 = \text{ЕСЛИ } RC1 \text{ И } RN4, \text{ ТО } AS06;$

$P_{\text{РЕГ}}6 = \text{ЕСЛИ } RC1 \text{ И } RP1 \text{ И } \text{NewNET}, \text{ ТО } AS07;$

$P_{\text{РЕГ}}7 = \text{ЕСЛИ } RC1 \text{ И } RP1, \text{ ТО } AS08;$

$P_{\text{РЕГ}}8 = \text{ЕСЛИ } RC1, \text{ ТО } AS09;$

$P_{\text{РЕГ}}9 = \text{ЕСЛИ } RP4 \text{ И } RN2, \text{ ТО } AS15;$

$P_{\text{РЕГ}}10 = \text{ЕСЛИ } RP3 \text{ И } RN3, \text{ ТО } AS17;$

$P_{\text{РЕГ}}11 = \text{ЕСЛИ } RP4 \text{ И } RN3, \text{ ТО } AS20.$

Кластеризация 11 полных правил (в каждом правиле по 5 условий) позволила объединить в один кластер AS15 и AS20 при $D_{15,20} = 0,0500$; AS02 и AS07 при $D_{02,07} = 0,1000$; AS03 и AS09 при $D_{03,09} = 0,1500$; AS05 и AS08 при $D_{05,08} = 0,2000$; AS06 и (AS02, AS07) при $D_{06,(02,07)} \leq 0,2167$; AS17 и (AS15, AS20) при $D_{17,(15,20)} \leq 0,3167$; AS04 и (AS02, AS06, AS07) при $D_{04,(02,06,07)} \leq 0,3667$; (AS03, AS09) и (AS05, AS08) при $D_{(03,09),(05,08)} \leq 0,4667$; (AS03, AS05, AS08, AS09) и (AS15, AS17, AS20) при $D_{(03,05,08,09),(15,17,20)} \leq 0,8333$; (AS03, AS05, AS08, AS09, AS15, AS17, AS20) и (AS02, AS04, AS06, AS07) при $D_{(03,05,08,09,15,17,20),(02,04,06,07)} \leq 0,8500$. Построение по этим значениям дендрограммы и последующий ее перевод в группировочное дерево при шаге $\Delta D_{ij} = 0,1000$ привело к образованию 8 ярусов (вариантов объединения правил в кластеры). Наиболее сложным (0,2844) оказался пятый ярус, на котором образовалось три кластера (КЛ_{РЕГ}):

КЛ_{РЕГ}1 с AS02, AS04, AS06 и AS07;

КЛ_{РЕГ}2 с AS03, AS05, AS08 и AS09;

КЛ_{РЕГ}3 с AS15, AS17 и AS20.

По этим кластерам сгенерированы метаправила (МП_{РЕГ}):

МП_{РЕГ}1 = ЕСЛИ RC1 И TraTRN, ТО КЛ_{РЕГ}1;

МП_{РЕГ}2 = ЕСЛИ RC1 И EndTRN, ТО КЛ_{РЕГ}2;

МП_{РЕГ}3 = ЕСЛИ RC2, ТО КЛ_{РЕГ}3.

Содержательный анализ метаправил в сочетании с исходными данными позволил констатировать, что сетевая диффузия, проявившаяся в сибирских городах, нашла подтверждение и на уровне регионов. Для этого уровня также характерна первоочередность крупных регионов (МП_{РЕГ}1 и МП_{РЕГ}2 относительно МП_{РЕГ}3), линейность (Новосибирская область и 5 из 8 регионов в МП_{РЕГ}1 и МП_{РЕГ}2 расположены на линии Транссибирской железной дороги) и пульсирующее распространение инновации (то удаление, то приближение к Новосибирской области). В целом закономерность проникновения в сибирские регионы нововведения по созданию автономных систем интернета можно представить в виде двух инновационных волн от Новосибирской области – первичного распространения (15.02.1996–17.04.2002), охватившего регионы с численностью населения более 1 млн чел. (Республика Бурятия, Алтайский, Забайкальский и Красноярский края, Иркутская, Кемеровская, Омская и Томская области) и вторичного продвижения (23.11.2005–25.02.2008), распространившегося на регионы с меньшей численностью населения (республики Алтай, Тыва и Хакасия). При этом в ходе первой волны образовались две группы по четыре региона с наличием или отсутствием возможности транзита данных в соседние сибирские регионы.

ОГРАНИЧЕНИЯ

Поскольку выявление особенностей пространственной диффузии автономных систем интернета сделано впервые, то такая работа имела ряд ограничений, устранение которых можно рассматривать как направления дальнейших исследований: (1) анализ небольшого количества территориальных объектов и показателей (условий проникновения инновации) не позволил определить устойчивые пространственно-временные закономерности (инварианты вне Сибири), что обуславливает необходимость перехода к изучению обширных территорий по десяткам (сотням) показателей в разные периоды времени; (2) использование немногочисленных априорных правил тормозило машинное обучение, а для повышения эффективности геопространственного искусственного интеллекта потребуется проанализировать множество других информационно-коммуникационных инноваций для значительного расширения базы правил; (3) машинный прогноз последовательно проводился только на один шаг вперед и определялся знанием (правилами) предыдущих шагов, тогда как предсказание диффузионного процесса на более длительный период времени (множество шагов в рамках одной инновационной волны) требует разработки более сложных причинно-следственных моделей пространственной диффузии; (4) генерация правил выполнялась с помощью генетического метода, который показал свою эффективность, но вместе с тем не предоставил возможность разностороннего анализа за счет привлечения иных способов машинного построения правил, что необходимо сделать в будущем, включая формирование метаправил не только с помощью кластерного анализа; (5) логический вывод выполнялся исключительно с помощью правил «ЕСЛИ – ТО», а определение инвариантов требует привлечения других способов кодирования знаний, среди которых в последнее время часто применяется граф знаний (Mai et al., 2022).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Социально-экономическая инновация по созданию автономных систем (локальных и региональных сетей), обеспечивающих доступ к глобальной информационно-коммуникационной сети интернет, сначала была внедрена в городе Новосибирске в 1995 г., а затем в 1996–2016 гг. распространилась по территории Сибирского федерального округа. Хронологическая последовательность проникновения нововведения в сибирские города не соответствовала классической модели сплошной (контагиозной) пространственной диффузии, в ряде случаев совпадала с моделью иерархической диффузии, но в целом представляла собой непонятную траекторию перемещения по территории федерального округа. Разработав алгоритм анализа распро-

странения инноваций, сочетающий машинное обучение с логическим выводом на основе правил «ЕСЛИ – ТО», были сгенерированы 43 правила, объясняющие последовательное перемещение инновации между городами, и построены 8 метаправил, указывающих на наличие сетевой модели пространственной диффузии. Повторное применение алгоритма для анализа распространения инновации среди 12 сибирских регионов подтвердило существование сетевой диффузии. Кроме этого, проведенное исследование позволило обнаружить две инновационные волны (1996–2002 гг., 2003–2016 гг. для городов и 2005–2008 гг. для регионов), отличающиеся условиями распространения нововведения, три периода формирования линейно-узловой структуры (территориальная экспансия, закрепление территории и проникновение на периферию) и три нетипичных случая создания автономных систем (в моногородах Краснокаменск, Северск и Черногорск).

Практическая значимость проведенного исследования предопределена необходимостью управления процессами будущего распространения таких информационно-коммуникационных инноваций, как мобильная связь шестого поколения, голографическая связь, тактильный интернет и квантовая связь. Несмотря на разнообразие этих инноваций, существуют общие проблемы встраивания новаций в человеческое общество, в том числе в пространственную организацию общества. Определение метаправил пространственной диффузии инноваций и создание больших баз правил – один из путей прогнозирования диффузии и связанной с этим разработки мероприятий по минимизации негативных социально-экономических последствий, включая пространственное цифровое неравенство. Оно проявляется в предоставлении цифровых услуг в одних населенных пунктах, охваченных инновацией, и невозможностью получить эти услуги в других поселениях, еще не подключенных к сети.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Блануца В.И.* Дендрограммы в региональном социально-экономическом анализе: интерпретация и верификация // Научная визуализация. 2021а. Т. 13. № 5. С. 1–15. <https://doi.org/10.26583/sv.13.5.01>
- Блануца В.И.* Пространственная диффузия нововведений: сфера неопределенности и сетевая модель // Региональные исследования. 2015. № 3. С. 4–12.
- Блануца В.И.* Пространственная диффузия цифровых инноваций: тренды, проблемы и перспективы эмпирических исследований // Пространственная экономика. 2021б. Т. 14. № 4. С. 118–142. <https://doi.org/10.14530/se.2021.4.118-142>
- Блануца В.И.* Развертывание информационно-коммуникационной сети как географический процесс (на примере становления сетевой структуры сибирской почты). М.: Инфра-М, 2016. 246 с.
- Блануца В.И.* Экономическая связность российских регионов в пространстве интернет // Креативная экономика. 2018. Т. 12. № 5. С. 701–716. <https://doi.org/10.18334/ce.12.5.39144>

- Дубинина М.Г. Пространственно-временные модели распространения информационно-коммуникационных технологий // Компьютерные исследования и моделирование. 2023. Т. 15. № 6. С. 1695–1712. <https://doi.org/10.20537/2076-7633-2023-15-6-1695-1712>
- Земцов С.П., Демидова К.В., Кучаев Д.Ю. Распространение интернета и межрегиональное цифровое неравенство в России: тенденции, факторы и влияние пандемии // Балтийский регион. 2022. Т. 14. № 4. С. 57–78. <https://doi.org/10.5922/2079-8555-2022-4-4>
- Шмидт Ю.Д., Лободина О.Н. О некоторых подходах к моделированию пространственной диффузии инноваций // Пространственная экономика. 2015. № 2. С. 103–115. <https://doi.org/10.14530/se.2015.2.103-115>
- Bednarz M., Broekel T. Pulled or Pushed? The Spatial Diffusion of Wind Energy between Local Demand and Supply // Industrial and Corporate Change. 2020. Vol. 29. Issue 4. Pp. 893–916. <https://doi.org/10.1093/icc/dtaa012>
- Beiró M.G., Grynberg S.P., Alvarez-Hamelin J.I. Router-Level Community Structure of the Internet Autonomous Systems // EPJ Data Science. 2015. Vol. 4. 12. <https://doi.org/10.1140/epjds/s13688-015-0048-y>
- Bhuyan B., Ramdane-Cherif A., Tomar R., Singh T.P. Neuro-Symbolic Artificial Intelligence: A Survey // Neural Computing and Applications. 2024. Vol. 36. Pp. 12809–12844. <https://doi.org/10.1007/s00521-024-09960-z>
- Bokányi E., Novák M., Jakobi A., Lengyel B. Urban Hierarchy and Spatial Diffusion over the Innovation Life Cycle // Royal Society Open Science. 2022. Vol. 9. Issue 5. 211038. <https://doi.org/10.1098/rsos.211038>
- Cassetti E., Semple K. Concerning the Testing of Spatial Diffusion Hypotheses // Geographical Analysis. 1969. Vol. 1. Issue 3. Pp. 254–259. <https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.1969.tb00622.x>
- Cortez P., Moro S., Rita P., King D., Hall J. Insights from a Text Mining Survey on Expert Systems Research from 2000 to 2016 // Expert Systems. 2018. Vol. 35. Issue 3. 12280. <https://doi.org/10.1111/exsy.12280>
- Dauids M., Frenken K. Proximity, Knowledge Base and the Innovation Process: Towards an Integrated Framework // Regional Studies. 2018. Vol. 52. Issue 1. Pp. 23–34. <https://doi.org/10.1080/00343404.2017.1287349>
- De Sabbata S., Ballatore A., Miller H.J., Sieber R., Tyukin I., Yeboah G. GeoAI in Urban Analytics // International Journal of Geographical Information Science. 2023. Vol. 37. Issue 12. Pp. 2455–2463. <https://doi.org/10.1080/13658816.2023.2279978>
- Ding L., Haynes K.E., Li H. Modeling the Spatial Diffusion of Mobile Telecommunications in China // Professional Geographer. 2010. Vol. 62. Issue 2. Pp. 248–263. <https://doi.org/10.1080/00330120903546528>
- Ducruet C., Itoh H. The Spatial Determinants of Innovation Diffusion: Evidence from Global Shipping Networks // Journal of Transport Geography. 2022. Vol. 101. 103358. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2022.103358>
- Feller I., Elmes G., Meyer J. Spatial Aspects of the Diffusion of Technological Innovations among American Municipal Governments // Socio-Economic Planning Sciences. 1982. Vol. 16. Issue 5. Pp. 225–238. [https://doi.org/10.1016/0038-0121\(82\)90030-1](https://doi.org/10.1016/0038-0121(82)90030-1)
- Feola G., Him M.R. The Diffusion of the Transition Network in Four European Countries // Environment and Planning A: Economy and Space. 2016. Vol. 48. Issue 11. Pp. 2112–2115. <https://doi.org/10.1177/0308518X16630989>
- Funel A. The Graph Structure of the Internet at the Autonomous Systems Level During Ten Years // Journal of Computer and Communications. 2019. Vol. 7. No. 8. Pp. 17–32. <https://doi.org/10.4236/jcc.2019.78003>

- Graevenitz G., Graham S.J.H., Myers A.F.* Distance (Still) Hampers Diffusion of Innovations // *Regional Studies*. 2022. Vol. 56. Issue 2. Pp. 227–241. <https://doi.org/10.1080/00343404.2021.1918334>
- Hagerstrand T.* Innovation Diffusion as a Spatial Process. Chicago: University of Chicago Press, 1967. 334 p.
- Handbook of Geospatial Artificial Intelligence / Edited by S. Gao, Y. Hu, W. Li. Boca Raton: CRC Press, 2023. 468 p.
- Henning C., Saggau V.* Networks, Spatial Diffusion of Technological Knowledge and Regional Economic Growth: An Agent-Based Modelling Approach // *International Journal of Innovation and Regional Development*. 2012. Vol. 4. Issue 3–4. Pp. 204–231. <https://doi.org/10.1504/IJIRD.2012.047558>
- Hocine A., Belarbi Y.* The Diffusion of Innovation: A Spatial Econometric Approach // *Les Cahiers du Cread*. 2024. Vol. 40. Issue 1. Pp. 219–247. <https://doi.org/10.4314/cread.v40i1.8>
- Ilonen J., Kamarainen J.-K., Puumalainen K., Sundqvist S., Käeviäinen H.* Towards Automatic Forecasts for Diffusion of Innovation // *Technological Forecasting and Social Change*. 2006. Vol. 73. Issue 2. Pp. 182–198. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2004.11.005>
- Jabla R., Khemaja M., Buendia F., Faiz S.* Automatic Rule Generation for Decision-Making in Context-Aware Systems Using Machine Learning // *Computational Intelligence and Neuroscience*. 2022. Vol. 2022. 5202537. <https://doi.org/10.1155/2022/5202537>
- Kierner S., Kucharski J., Kierner Z.* Taxonomy of Hybrid Architectures Involving Rule-Based Reasoning and Machine Learning in Clinical Decision Systems: A Scoping Review // *Journal of Biomedical Informatics*. 2023. Vol. 144. 104428. <https://doi.org/10.1016/j.jbi.2023.104428>
- Kim H.-K., Yi M.-S., Shin D.-B.* Regional Diffusion of Smart City Services in South Korea Investigated by Spatial Autocorrelation: Focused on Safety and Urban Management // *Spatial Information Research*. 2017. Vol. 25. Pp. 837–848. <https://doi.org/10.1007/s41324-017-0150-2>
- Kopczewska K.* Spatial Machine Learning: New Opportunities for Regional Science // *The Annals of Regional Science*. 2022. Vol. 68. Pp. 713–755. <https://doi.org/10.1007/s00168-021-01101-x>
- Laurini R.* Geographic Knowledge Infrastructure: Applications for Territorial Intelligence and Smart Cities. London: Elsevier & ISTE Press, 2017. 295 p.
- Laurini R., Servigne S., Favetta F.* An Introduction to Geographic Rule Semantic // 22nd International Conference on Distributed Multimedia Systems. Salerno, 2016. Pp. 91–97. <https://doi.org/10.18293/DMS2016-015>
- Liefooghe C.* Les Tiers-Lieux à L'ère du Numérique: Diffusion Spatiale D'une Utopic Socio-Économique // *Géographie, Économie, Société*. 2018. Vol. 20. Issue 1. Pp. 33–61.
- Liefooghe C., Baudelle G., Le Gall S., Marinos C.* How Coworking Spaces Have Spread Beyond Larger Metro Areas: A Spatial Diffusion Analysis in France // *The Coworking (R)Evolution: Working and Living in New Territories* / Edited by D.-G. Tremblay, G. Krauss. Cheltenham, Northampton: Edward Elgar, 2024. Pp. 42–58.
- Lin M., Kwan Y.K.* FDI Technology Spillovers, Geography, and Spatial Diffusion // *International Review of Economics and Finance*. 2016. Vol. 43. Pp. 257–274. <https://doi.org/10.1016/j.iref.2016.02.014>
- Liu P., Zhang Y., Biljecki F.* Explainable Spatially Explicit Geospatial Artificial Intelligence in Urban Analytics // *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*. 2024. Vol. 51. Issue 5. Pp. 1104–1123. <https://doi.org/10.1177/23998083231204689>
- Loboda J.* The Diffusion of Television in Poland // *Economic Geography*. 1974. Vol. 50. No. 1. Pp. 70–82.

- Mai G., Hu Y., Gao S., Cai L., Martins B., Scholz J., Gao J., Janowicz K. Symbolic and Subsymbolic GeoAI: Geospatial Knowledge Graphs and Spatially Explicit Machine Learning // *Transactions in GIS*. 2022. Vol. 26. Issue 8. Pp. 3118–3124. <https://doi.org/10.1111/tgis.13012>
- McCombie J.S.L. How Important Is the Spatial Diffusion of Innovations in Explaining Regional Growth Rate Disparities? // *Urban Studies*. 1982. Vol. 19. Issue 4. Pp. 377–382.
- Meir A. Innovation Diffusion and Regional Economic Development: The Spatial Diffusion of Automobiles in Ohio // *Regional Studies*. 1981. Vol. 15. Issue 2. Pp. 111–122. <https://doi.org/10.1080/09595238100185131>
- Nowak-Brzezińska A., Horyń C. Exploration of Outliers in If-Then Rule-Based Knowledge Bases // *Entropy*. 2020. Vol. 22. Issue 10. 1096. <https://doi.org/10.3390/e22101096>
- Pastor-Satorras R., Vespignani A. *Evolution and Structure of the Internet: A Statistical Physics Approach*. Cambridge: Cambridge University Press, 2004. 267 p.
- Prentzas J., Hatzilygeroudis I. Rule-Based Update Methods for a Hybrid Rule Base // *Data & Knowledge Engineering*. 2005. Vol. 55. Issue 2. Pp. 103–128. <https://doi.org/10.1016/j.datak.2005.02.001>
- Qin S., Kong H., Zhao J.Z. Spatial Diffusion of Public-Private Partnership (PPP) in China: A County-Level Analysis // *Cities*. 2024. Vol. 147. 104817. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2024.104817>
- Shi H., Goulias K.G. Understanding the Zero-Emission Vehicle Market Spatial Diffusion and Its Determinants from 2019 to 2022 Using Spatial Econometric Models // *Energy*. 2024. Vol. 313. 133607. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.133607>
- Taherdoost H. A Systematic Review of Big Data Innovations in Smart Grids // *Results in Engineering*. 2024. Vol. 22. 102132. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102132>
- Tiner T. Spatial Diffusion of Mobile Telephony in Hungary // *Hungarian Geographical Bulletin*. 2010. Vol. 59. Issue 1. Pp. 35–50.
- Tsai S.-C., Chen C.-H. Exploring the Innovation Diffusion of Big Data Robo-Advisor // *Applied System Innovation*. 2022. Vol. 5. Issue 1. 15. <https://doi.org/10.3390/asi5010015>
- Wang F., Wang M., Yuan S. Spatial Diffusion of E-Commerce in China's Counties: Based on the Perspective of Regional Inequality // *Land*. 2021. Vol. 10. Issue 11. 1141. <https://doi.org/10.3390/land10111141>
- Wang Z. *Principles of Regional Sciences*. Singapore: Springer, 2017. 248 p.
- Webber M.J., Joseph A.E. *Spatial Diffusion Processes 2: Numerical Analysis // Environment and Planning A: Economy and Space*. 1979. Vol. 11. Issue 3. Pp. 335–347.
- Zhang B., Liu R., Hares S. Collecting the Internet AS-Level Topology // *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*. 2005. Vol. 35. Issue 1. Pp. 53–61. <https://doi.org/10.1145/1052812.1052825>
- Zhang H., Zielonka N., Trutnevyte E. Patterns in Spatial Diffusion of Residential Heat Pumps in Switzerland // *Renewable Energy*. 2024. Vol. 223. 120032. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120032>

REFERENCES

- Bednarz M., Broekel T. Pulled or Pushed? The Spatial Diffusion of Wind Energy between Local Demand and Supply. *Industrial and Corporate Change*, 2020, vol. 29, issue 4, pp. 893–916. <https://doi.org/10.1093/icc/dtaa012>
- Beiró M.G., Grynberg S.P., Alvarez-Hamelin J.I. Router-Level Community Structure of the Internet Autonomous Systems. *EPJ Data Science*, 2015, vol. 4. 12. <https://doi.org/10.1140/epjds/s13688-015-0048-y>
- Bhuyan B., Ramdane-Cherif A., Tomar R., Singh T.P. Neuro-Symbolic Artificial Intelli-

- gence: A Survey. *Neural Computing and Applications*, 2024, vol. 36, pp. 12809–12844. <https://doi.org/10.1007/s00521-024-09960-z>
- Blanutsa V.I. Economic Connectivity of Russian Regions in the Internet Space. *Kreativnaya Ekonomika = Creative Economy*, 2018, vol. 12, no. 5, pp. 701–716. <https://doi.org/10.18334/ce.12.5.39144> (In Russian).
- Blanutsa V.I. Dendrograms in Regional Socio-Economic Analysis: Interpretation and Verification. *Nauchnaya Vizualizatsiya = Scientific Visualization*, 2021a, vol. 13, no. 5, pp. 1–15. <https://doi.org/10.26583/sv.13.5.01> (In Russian).
- Blanutsa V.I. Spatial Diffusion of Digital Innovations: Trends, Problems and Prospects of Empirical Research. *Prostranstvennaya Ekonomika = Spatial Economics*, 2021b, vol. 14, no. 4, pp. 118–142. <https://doi.org/10.14530/se.2021.4.118-142> (In Russian).
- Blanutsa V.I. Spatial Diffusion of Innovations: A Sphere of Uncertainty and Network Model. *Regionalnye Issledovaniya = Regional Research*, 2015, no. 3, pp. 4–12. (In Russian).
- Blanutsa V.I. *The Deployment of an Information and Communication Network as a Geographical Process (On the Example of the Siberian Postal Network Structure's Formation)*. Moscow, 2016, 246 p. (In Russian).
- Bokányi E., Novák M., Jakobi A., Lengyel B. Urban Hierarchy and Spatial Diffusion over the Innovation Life Cycle. *Royal Society Open Science*, 2022, vol. 9, issue 5. 211038. <https://doi.org/10.1098/rsos.211038>
- Cassetti E., Semple K. Concerning the Testing of Spatial Diffusion Hypotheses. *Geographical Analysis*, 1969, vol. 1, issue 3, pp. 254–259. <https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.1969.tb00622.x>
- Cortez P., Moro S., Rita P., King D., Hall J. Insights from a Text Mining Survey on Expert Systems Research from 2000 to 2016. *Expert Systems*, 2018, vol. 35, issue 3. 12280. <https://doi.org/10.1111/exsy.12280>
- Dauids M., Frenken K. Proximity, Knowledge Base and the Innovation Process: Towards an Integrated Framework. *Regional Studies*, 2018, vol. 52, issue 1, pp. 23–34. <https://doi.org/10.1080/00343404.2017.1287349>
- De Sabbata S., Ballatore A., Miller H.J., Sieber R., Tyukin I., Yeboah G. GeoAI in Urban Analytics // *International Journal of Geographical Information Science*, 2023, vol. 37, issue 12, pp. 2455–2463. <https://doi.org/10.1080/13658816.2023.2279978>
- Ding L., Haynes K.E., Li H. Modeling the Spatial Diffusion of Mobile Telecommunications in China. *Professional Geographer*, 2010, vol. 62, issue 2, pp. 248–263. <https://doi.org/10.1080/00330120903546528>
- Dubinina M.G. Spatio-Temporal Models of ICT Diffusion. *Kompyuternye Issledovaniya i Modelirovanie = Computer Research and Modeling*, 2023, vol. 15, no. 6, pp. 1695–1712. <https://doi.org/10.20537/2076-7633-2023-15-6-1695-1712> (In Russian).
- Ducruct C., Itoh H. The Spatial Determinants of Innovation Diffusion: Evidence from Global Shipping Networks. *Journal of Transport Geography*, 2022, vol. 101. 103358. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2022.103358>
- Feller I., Elmes G., Meyer J. Spatial Aspects of the Diffusion of Technological Innovations among American Municipal Governments. *Socio-Economic Planning Sciences*, 1982, vol. 16, issue 5, pp. 225–238. [https://doi.org/10.1016/0038-0121\(82\)90030-1](https://doi.org/10.1016/0038-0121(82)90030-1)
- Feola G., Him M.R. The Diffusion of the Transition Network in Four European Countries. *Environment and Planning A: Economy and Space*, 2016, vol. 48, issue 11, pp. 2112–2115. <https://doi.org/10.1177/0308518X16630989>
- Funel A. The Graph Structure of the Internet at the Autonomous Systems Level During Ten Years. *Journal of Computer and Communications*, 2019, vol. 7, no. 8, pp. 17–32. <https://doi.org/10.4236/jcc.2019.78003>
- Graevenitz G., Graham S.J.H., Myers A.F. Distance (Still) Hampers Diffusion of Innova-

- tions. *Regional Studies*, 2022, vol. 56, issue 2, pp. 227–241. <https://doi.org/10.1080/00343404.2021.1918334>
- Hagerstrand T. *Innovation Diffusion as a Spatial Process*. Chicago: University of Chicago Press, 1967, 334 p.
- Handbook of Geospatial Artificial Intelligence*. Edited by S. Gao, Y. Hu, W. Li. Boca Raton: CRC Press, 2023, 468 p.
- Henning C., Saggau V. Networks, Spatial Diffusion of Technological Knowledge and Regional Economic Growth: An Agent-Based Modelling Approach. *International Journal of Innovation and Regional Development*, 2012, vol. 4, issue 3–4, pp. 204–231. <https://doi.org/10.1504/IJIRD.2012.047558>
- Hocine A., Belarbi Y. The Diffusion of Innovation: A Spatial Econometric Approach. *Les Cahiers du Cread*, 2024, vol. 40, issue 1, pp. 219–247. <https://doi.org/10.4314/cread.v40i1.8>
- Ilonen J., Kamarainen J.-K., Puumalainen K., Sundqvist S., Käeviäinen H. Towards Automatic Forecasts for Diffusion of Innovation. *Technological Forecasting and Social Change*, 2006, vol. 73, issue 2, pp. 182–198. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2004.11.005>
- Jabla R., Khemaja M., Buendia F., Faiz S. Automatic Rule Generation for Decision-Making in Context-Aware Systems Using Machine Learning. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2022, vol. 2022. 5202537. <https://doi.org/10.1155/2022/5202537>
- Kiernier S., Kucharski J., Kiernier Z. Taxonomy of Hybrid Architectures Involving Rule-Based Reasoning and Machine Learning in Clinical Decision Systems: A Scoping Review. *Journal of Biomedical Informatics*, 2023, vol. 144. 104428. <https://doi.org/10.1016/j.jbi.2023.104428>
- Kim H.-K., Yi M.-S., Shin D.-B. Regional Diffusion of Smart City Services in South Korea Investigated by Spatial Autocorrelation: Focused on Safety and Urban Management. *Spatial Information Research*, 2017, vol. 25, pp. 837–848. <https://doi.org/10.1007/s41324-017-0150-2>
- Kopczewska K. Spatial Machine Learning: New Opportunities for Regional Science. *The Annals of Regional Science*, 2022, vol. 68, pp. 713–755. <https://doi.org/10.1007/s00168-021-01101-x>
- Laurini R. *Geographic Knowledge Infrastructure: Applications for Territorial Intelligence and Smart Cities*. London: Elsevier & ISTE Press, 2017, 295 p.
- Laurini R., Servigne S., Favetta F. An Introduction to Geographic Rule Semantic. *22nd International Conference on Distributed Multimedia Systems*. Salerno, 2016, pp. 91–97. <https://doi.org/10.18293/DMS2016-015>
- Liefoghe C. Third Places in The Digital Age: Spatial Diffusion of a Socio-economic Utopia. *Geography, Economy, Society*, 2018, vol. 20, issue 1, pp. 33–61. (In French).
- Liefoghe C., Baudelle G., Le Gall S., Marinos C. How Coworking Spaces Have Spread Beyond Larger Metro Areas: A Spatial Diffusion Analysis in France. *The Coworking (R)Evolution: Working and Living in New Territories*. Edited by D.-G. Tremblay, G. Krauss. Cheltenham, Northampton: Edward Elgar, 2024, pp. 42–58.
- Lin M., Kwan Y.K. FDI Technology Spillovers, Geography, and Spatial Diffusion. *International Review of Economics and Finance*, 2016, vol. 43, pp. 257–274. <https://doi.org/10.1016/j.iref.2016.02.014>
- Liu P., Zhang Y., Biljecki F. Explainable Spatially Explicit Geospatial Artificial Intelligence in Urban Analytics. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 2024, vol. 51, issue 5, pp. 1104–1123. <https://doi.org/10.1177/23998083231204689>
- Loboda J. The Diffusion of Television in Poland. *Economic Geography*, 1974, vol. 50, no. 1, pp. 70–82.
- Mai G., Hu Y., Gao S., Cai L., Martins B., Scholz J., Gao J., Janowicz K. Symbolic and Subsymbolic GeoAI: Geospatial Knowledge Graphs and Spatially Explicit Machine

- Learning. *Transactions in GIS*, 2022, vol. 26, issue 8, pp. 3118–3124. <https://doi.org/10.1111/tgis.13012>
- McCombie J.S.L. How Important Is the Spatial Diffusion of Innovations in Explaining Regional Growth Rate Disparities? *Urban Studies*, 1982, vol. 19, issue 4, pp. 377–382.
- Meir A. Innovation Diffusion and Regional Economic Development: The Spatial Diffusion of Automobiles in Ohio. *Regional Studies*, 1981, vol. 15, issue 2, pp. 111–122. <https://doi.org/10.1080/09595238100185131>
- Nowak-Brzezińska A., Horyń C. Exploration of Outliers in If-Then Rule-Based Knowledge Bases. *Entropy*, 2020, vol. 22, issue 10. 1096. <https://doi.org/10.3390/e22101096>
- Pastor-Satorras R., Vespignani A. *Evolution and Structure of the Internet: A Statistical Physics Approach*. Cambridge: Cambridge University Press, 2004, 267 p.
- Prentzas J., Hatzilygeroudis I. Rule-Based Update Methods for a Hybrid Rule Base. *Data & Knowledge Engineering*, 2005, vol. 55, issue 2, pp. 103–128. <https://doi.org/10.1016/j.datak.2005.02.001>
- Qin S., Kong H., Zhao J.Z. Spatial Diffusion of Public-Private Partnership (PPP) in China: A County-Level Analysis. *Cities*, 2024, vol. 147. 104817. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2024.104817>
- Schmidt Yu.D., Lobodina O.N. Some Approaches to Modeling the Spatial Diffusion of Innovations. *Prostranstvennaya Ekonomika = Spatial Economics*, 2015, no. 2, pp. 103–115. <https://doi.org/10.14530/se.2015.2.103-115> (In Russian).
- Shi H., Goulias K.G. Understanding the Zero-Emission Vehicle Market Spatial Diffusion and Its Determinants from 2019 to 2022 Using Spatial Econometric Models. *Energy*, 2024, vol. 313. 133607. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.133607>
- Taherdoost H. A Systematic Review of Big Data Innovations in Smart Grids. *Results in Engineering*, 2024, vol. 22. 102132. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102132>
- Tiner T. Spatial Diffusion of Mobile Telephony in Hungary. *Hungarian Geographical Bulletin*, 2010, vol. 59, issue 1, pp. 35–50.
- Tsai S.-C., Chen C.-H. Exploring the Innovation Diffusion of Big Data Robo-Advisor. *Applied System Innovation*, 2022, vol. 5, issue 1. 15. <https://doi.org/10.3390/asi5010015>
- Wang F., Wang M., Yuan S. Spatial Diffusion of E-Commerce in China's Counties: Based on the Perspective of Regional Inequality. *Land*, 2021, vol. 10, issue 11. 1141. <https://doi.org/10.3390/land10111141>
- Wang Z. *Principles of Regional Sciences*. Singapore: Springer, 2017, 248 p.
- Webber M.J., Joseph A.E. Spatial Diffusion Processes 2: Numerical Analysis. *Environment and Planning A: Economy and Space*, 1979, vol. 11, issue 3, pp. 335–347.
- Zemtsov S.P., Demidova K.V., Kichaev D.Yu. Internet Diffusion and Interregional Digital Divide in Russia: Trends, Factors, and the Influence of the Pandemic. *Baltiiskii Region = Baltic Region*, 2022, vol. 14, no. 4, pp. 57–78. <https://doi.org/10.5922/2079-8555-2022-4-4> (In Russian).
- Zhang B., Liu R., Hares S. Collecting the Internet AS-Level Topology. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 2005, vol. 35, issue 1, pp. 53–61. <https://doi.org/10.1145/1052812.1052825>
- Zhang H., Zielonka N., Trutnevyte E. Patterns in Spatial Diffusion of Residential Heat Pumps in Switzerland. *Renewable Energy*, 2024, vol. 223. 120032. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120032>

Поступила в редакцию / Submitted: 21.01.2025

Одобрена после рецензирования / Approved after reviewing: 10.02.2025

Принята к публикации / Accepted for publication: 12.02.2025

Доступно онлайн / Available online: 31.03.2025