

ТРАНСПОРТ

Научная статья
УДК 519.6: 656.13: 537.8

<https://doi.org/10.25198/2077-7175-2023-6-66>

УЧЕТ СЛОЖНОСТИ В ЗАДАЧАХ ТРАНСПОРТНОГО СПРОСА

И. Е. Агуреев¹, А. В. Ахромешин², В. А. Пышный³

Тульский государственный университет, Тула, Россия

¹ e-mail: agureev-igor@yandex.ru

² e-mail: aakhromeshin@yandex.ru

³ e-mail: vladislav.pyshnyi@mail.ru

Аннотация. В статье описан теоретический базис для учета сложности при решении задач транспортного спроса, выполнен анализ понятия «самоорганизованная критичность». Решены задачи описания сложного поведения в транспортных системах, указаны предпосылки или причины, вызывающие сложное поведение, формализованы традиционные определения «сложной транспортной системы». Приведены примеры некоторых моделей, демонстрирующих сложное поведение в транспортных системах.

Цель: формулировка направлений исследований в теории транспортных систем, которые должны развиваться при помощи понятийных и математических аппаратов отдельных наук, таких как теория сложности, нелинейная динамика, для решения задач транспортного спроса, сопровождающегося потоками различных событий и элементов в транспортных макросистемах, для учета сложности в задачах теории транспортных систем при моделировании динамики транспортного спроса.

Используемые подходы: разработка математических моделей нелинейных транспортных систем, демонстрирующих сложное поведение, включая модели со степенными законами распределения характеристик системы в рамках самоорганизованной критичности, а также модели, демонстрирующие бифуркации.

Методы и (или) методический аппарат исследования: методы теории самоорганизованной критичности и синергетики, позволяющие учитывать свойства сложной системы.

Полученные результаты: разработана модифицированная модель учета транспортного спроса, опирающаяся на модель транспортного поведения с использованием энтропийного подхода при определении равновесного состояния транспортной макросистемы. Показана возможность наличия в ней таких явлений, как динамический хаос, фазовые переходы, возникновение аттракторов.

Научная новизна заключается в использовании методов и подходов теории самоорганизованной критичности и теории сложности на широкий класс моделей транспортных систем, используемых в задачах транспортного спроса и отталкивающихся от моделей транспортного потока.

Практическая значимость заключается в формулировке конкретных моделей, которые могут применяться в исследованиях сложных транспортных систем.

Направления дальнейших исследований, рекомендации состоят в проведении анализа реальных статистик поведения транспортных систем, которые соответствуют различным состояниям транспортной системы, включая сложное поведение, а также постановке и решению задач теории транспортных макросистем.

Ключевые слова: сложность, сложная система, транспортная система, транспортный спрос, математическая модель, самоорганизованная критичность, фазовые переходы, аттрактор.

Для цитирования: Агуреев И. Е., Ахромешин А. В., Пышный В. А. Учет сложности в задачах транспортного спроса // Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2023. – № 6. – С. 66–78. – <https://doi.org/10.25198/2077-7175-2023-6-66>.



TAKING INTO ACCOUNT THE COMPLEXITY IN THE TASKS OF TRANSPORT DEMAND

I. E. Agureev¹, A. V. Akhromeshin², V. A. Pyshnyi³

Tula State University, Tula, Russia

¹ agureev-igor@yandex.ru

² aakhromeshin@yandex.ru

³ vladislav.pyshnyi@mail.ru

Abstract. The article describes the theoretical basis for taking into account the complexity in solving problems of transport demand, the analysis of the concept of “self-organized criticality” is carried out. The problems of describing complex conduct in transport systems are solved, the prerequisites or causes of complex behavior are indicated, the traditional definitions of a “complex transport system” are formalized. Examples of some models demonstrating complex behavior in transport systems are given.

Objective: formulation of research directions in the theory of transport systems, which should be developed with the help of conceptual and mathematical devices of individual sciences, such as complexity theory, nonlinear dynamics, to solve problems of transport demand, accompanied by flows of various events and elements in transport macrosystems, to take into account the complexity of problems in the theory of transport systems in modeling the dynamics of transport demand.

Approaches used: development of mathematical models of nonlinear transport systems demonstrating complex behavior, including models with power-law distribution of system characteristics within the framework of self-organized criticality, as well as models demonstrating bifurcations.

Methods and (or) methodological apparatus of research: methods of the theory of self-organized criticality and synergetics, allowing to take into account the properties of a complex system.

The scientific novelty lies in the use of methods and approaches of the theory of self-organized criticality and complexity theory for a wide class of models of transport systems used in problems of transport demand and based on traffic flow models.

Directions for further research, recommendations: it is required to analyze real statistics of the behavior of transport systems that correspond to various states of the transport system, including complex behavior, as well as the formulation and solution of problems of the theory of transport macrosystems.

Key words: complexity, complex system, transport system, transport demand, mathematical model, self-organized criticality, phase transitions, attractor.

Cite as: Agureev, I. E., Akhromeshin, A. V., Pyshnyi, V. A. (2023) [Taking into account the complexity in the tasks of transport demand]. *Intellect. Innovacii. Investicii* [Intellect. Innovations. Investments]. Vol. 6, pp. 66–78. – <https://doi.org/10.25198/2077-7175-2023-6-66>.

Введение

Транспортная система (ТС) города (агломерации) представляет собой сложную нелинейную динамическую систему. Обоснование данного утверждения подробно описано в работах авторов настоящей статьи [1–6].

При исследовании поведения сложных систем отдельное внимание уделяется поведению при катастрофических состояниях с точки зрения так называемой, теории самоорганизованной критичности (СОК). Термин СОК возник в работе П. Бака и К. Чена [25].

Данная теория интенсивно развивается в последние три десятилетия как самостоятельное направление в нелинейной динамике. Определение термина СОК звучит следующим образом: это свойство динамических систем, которые имеют точки бифуркации. Поведение в окрестности точки характеризуется тем, что при малом возмущении система может пройти точку бифуркации, тем самым полностью изменив свою модель поведения¹.

Применительно к транспортной науке катастрофическим поведением системы могут быть такие

¹ Самоорганизованная критичность // Википедия. – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%B0%D0%BC%D0%BE%D0%BE%D1%80%D0%B3%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D0%B7%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D0%B0%D1%8F_%D0%BA%D1%80%D0%B8%D1%82%D0%B8%D1%87%D0%BD%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%8C (дата обращения: 20.07.2023).

состояния улично-дорожной сети (УДС), как: заторы на перекрестках города в часы «пик», образование заторов в местах произошедших инцидентов, сужения проезжей части при проведении ремонтных работ, изменения схемы организации дорожного движения (реверсивное движение, одностороннее движение, изменение знаков приоритета, схемы светофорного регулирования и т. д.). Кроме этого, критическими явлениями считаются массовые ДТП в условиях сложной дорожной или погодной обстановки (дождь, снегопад, туман и т. д.), стремительное (лавинообразное) нарастание очереди пассажиров на входе в метро в часы «пик», такое же накопление пассажиров на остановках наземного городского транспорта, грузовых транспортных средств в пунктах погрузки или разгрузки и т. п. Характерной чертой сложного поведения является далеко ненулевая вероятность таких «лавинообразных» событий. В настоящей статье поставлена цель: формулировать направления исследований в теории транспортных систем, которые должны развиваться при помощи понятийных и математических аппаратов отдельных наук, таких как теория сложности, нелинейная динамика, для решения задач транспортного спроса, сопровождающегося потоками различных событий и элементов в транспортных макросистемах, для учета сложности в задачах теории транспортных систем при моделировании динамики транспортного спроса. Следует иметь в виду, что на практике подобные события расцениваются с позиции недостаточно качественного планирования транспортных процессов или отсутствия учета всех факторов, чтобы избежать таких последствий. Таким образом, важность теоретического аппарата «сложного» поведения транспортных систем является необходимым звеном при проектировании транспортных систем и планировании перевозок.

Известно, что проявлениями «сложности» являются непредсказуемость (слабопредсказуемость), способность к фазовым переходам, динамический хаос и самоорганизация в системах. Для транспортных систем такие эффекты не являются новшеством. Тем не менее, какого-либо широкого практического применения теория самоорганизованной критичности в транспортной науке до сих пор не нашла. Ради справедливости нужно сказать, что имеются научные работы в этом направлении, которые начинают отсчет примерно с 1995 года, когда была опубликована статья Nagel, Paczuski [30]. В случае СОК поведение системы в окрестности некоторой точки состояния может быть таким, что при малом возмущении система может пройти точку бифуркации и изменить модель поведения. По сути дела, речь идет о способности

систем к бифуркациям, что характерно для разных объектов, имеющих нелинейное поведение и диссипативный характер протекающих процессов. Нас интересует то, каким образом это может относиться к транспортным системам.

Обратим снова внимание, что в теории транспортных потоков СОК рассматриваются начиная с середины 90-х годов XX века [29–30]. Евин И. А. [9] указывает, что Nagel и Paczuski использовали модель СОК при изучении функции распределения времени для автомобильных заторов на автодорогах и обнаружили, что это распределение, как и распределение снежных лавин по продолжительности, хорошо описывается степенным законом с показателем, равным $3/2$. Однако в транспортных системах явление СОК существует как гораздо более широкое. Бифуркационный характер поведения транспортных систем отмечался во многих работах, в частности, для динамической модели логистической системы, пассажирской транспортной системы, системы конкуренции и др. [1]. Вопрос заключается в том, что необходимо очертить рамки применимости СОК для транспортных систем, а также выделить универсальный теоретический аппарат, подходящий для этого. Эта задача тесно связана с понятием «сложности», для которого до сих пор нет однозначного определения.

Следует различать причины сложного поведения и его следствия, или предпосылки и признаки «сложности». Например, если говорить о непредсказуемом характере поведения транспортной системы, то нужно отмечать не столько возможность наблюдения динамического хаоса, сколько присутствие потоков случайных событий, то есть, стохастическое поведение в принципе. Оба фактора могут проявляться на различных уровнях иерархии транспортной системы (микро-поведение и макро-поведение и т. п.). Если стохастическое поведение свойственно элементам ТС (микро-уровень), то динамический хаос, скорее, можно обнаружить на макроуровне. Этот поиск является серьезной задачей в силу трудностей при проведении измерений в больших системах и необходимости производить их на значительных временных отрезках.

В последнее время понятие «сложности» успешно применяют для моделей «сложных сетей» [17], которые вполне могут подходить не только для транспортного потока, но и для иных материальных, а также информационных, ресурсных потоков в транспортных системах. То есть, логистика, конкуренция, пассажиропотоки – это те объекты, для которых базовые модели сложности типа «лавины» могут иметь смысл для оценки внезапных переходов. Естественно, что транспортный поток в этом отношении является наиболее

важным объектом, так как проблемы заторов, а еще больше проблемы их предсказания («предзаторовые» ситуации) затрагивают деятельность многих специалистов, кто занимается управлением в транспортных системах. С другой стороны, устойчивость к фазовым переходам пешеходных потоков не менее значима, если вести речь о накоплении людей на входах в вокзалы, метрополитен, транспортно-пересадочные узлы и т.п. То же самое можно сказать о процессах накопления, хранения и расходования материальных запасов в логистике, где важна, как всегда, задача управления запасами, когда имеется риск потери устойчивости системы вследствие неправильно принятых решений в стратегии управления запасами или при нарушениях поставок.

Из этого мы делаем вывод о том, что задача описания «сложности» транспортных систем актуальна, а степень ее развития в настоящее время недостаточна.

Основной теорией, которая может послужить общей платформой, является теория макросистем [18–20, 22]. Однако она требует существенного развития, поскольку создавалась под задачи широкого круга систем, в которых процессы на микроуровне приводят к детерминированному поведению системы в целом, что выражается в виде стационарного состояния. Именно последнее обстоятельство следует ставить под сомнение, когда идет речь о транспортных системах: большую часть времени транспортные системы работают в нестационарных состояниях, а равновесное детерминированное поведение – скорее исключение или удобная модель.

Следует также отметить и наличие потоков управляющих воздействий, которые возникают в интеллектуальных транспортных системах и обеспечивающих их информационных автоматизированных системах. Потоки решений и управляющих воздействий могут не только улучшать условия движения транспорта, но и создавать новые риски для проявления СОК в случаях неправильно сформированных решений.

Таким образом, в статье решаются следующие задачи: 1) описать проявления сложного поведения в транспортных системах; 2) указать предпосылки или причины, вызывающие сложное поведение; 3) формализовать традиционные определения «сложной системы», 4) привести некоторые теоретические модели, демонстрирующие сложное поведение в транспортных системах.

Материалы и методы

Проявления сложности, самоорганизации и самоорганизованной критичности можно найти в биологических, социальных, физических и других системах.

Теории коллективного поведения активно рассматриваются и в гуманитарных науках (психология, социология) – поведение групп людей; в физике – поведение активных частиц; в транспортной науке – коллективное поведение пассажиров, водителей, мульти-агентное поведение в целом.

«При анализе сложных систем, рассмотрении процессов самоорганизации, различают микроскопический уровень и макроскопический уровень. И, конечно, представляют огромный интерес модели описания на каждом уровне и переход от одного уровня к другому» [17].

Проявление сложности в системе возможно на различных уровнях ее функционирования. Так, в работе [14] Г. Г. Малинецкий рассматривает математический, физический и философский уровни. Такое разделение возможно и для транспортных систем:

- *математический уровень* – математическое описание транспортной системы города;
- *физический уровень* – объекты улично-дорожной сети;
- *философский (психологический) уровень* – транспортное поведение населения.

Одна из задач настоящей статьи состоит в том, чтобы показать возможность в транспортной системе таких явлений, как динамический хаос, фазовые переходы, аттракторы и т.д. (проявление сложного поведения).

Очевидно, что для транспортной системы применимо такое понятие, как самоорганизация. Это четко прослеживается при исследовании состояния транспортного потока, поведения пассажиров при выборе маршрута следования, выбора типа транспорта, поведения водителей на дорогах при меняющейся дорожной обстановке. Самоорганизация заключается в возникновении пространственных и/или временных структур, которые соответствуют различным фазовым состояниям транспортного потока, колебаниях длин очередей в течение коротких или значительных интервалов времени, и т.п. Соответственно, к таким ситуациям применимо использование понятия устойчивого состояния или режима, что с математической точки зрения говорит о наличии аттрактора в модели системы. Критические явления здесь могут проявляться в фазовых переходах второго рода, изменении числа и типов аттракторов, происходящих в точках бифуркаций. При этом в критической точке сложной системы малые возмущения (изменения параметров) системы могут приводить к принципиально новому поведению системы в целом. Это известное свойство сложных систем, которое заключается в существенной чувствительности к начальным условиям (см. рисунок 1).

«Цель науки о самоорганизованной критичности – внести ясность в фундаментальный вопрос о том, почему природа сложна, а не проста, как это подразумевают законы физики» [27]. Как было указано выше, данное понятие введено датским физиком-теоретиком Пером Баком для обозначения универсального свойства сложных систем демонстрировать такое поведение, как так называемый «розовый шум» ($1/f$ шум, фликкер-шум). Было показано, что данные системы обладают свойством самопроизвольно генерировать критичность, т.е. функционировать в таких критических режимах, как «лавины», «срыв», демонстрируя резкую разбалансировку основных параметров системы при малых возмущениях (розовый шум является предвестником катастрофических событий в системе).

«Теория самоорганизованной критичности дала объяснение явлению прерывистого равновесия, которое наблюдается в процессе биологической эволюции, функционировании социальных и технических систем. Типичной оказывается ситуация, когда в течение очень большого времени ничего заметного не происходит, а затем стремительные изменения кардинально меняют облик системы, наступает время революций, что, разумеется, не отменяет множества мелких событий, которых мы просто не замечаем» [14, с. 39].

Теория самоорганизованной критичности применима к таким отраслям знаний, как: социология, политология, экономика, биология, геология (геофизика). Список можно продолжать. Приложение данной теории стало популярным при проведении социологических исследований, анализа сетевой протестной активности, анализа исторических событий, прогнозирование землетрясений и других тектонических явлений, прогнозы развития финансовых рынков и возможных критических обвалов котировок отдельных компаний/отраслей/экономик стран и т. д.

Критические явления в транспортных системах описаны в работе [12], в которой приведена классификация таких ситуаций: нормальная, предкритическая. Для исследования критических ситуаций в транспортных системах используется соотношение:

$$\Psi_1 = \frac{x_{\max}}{\bar{x}}, \quad (1)$$

где

x_{\max} – максимальное значение исследуемой характеристики x ,

\bar{x} – среднее значение.

Во всех системах, в которых проявляется СОК, существует докритическое функционирование (поведение), критические явления и послекритическое функционирование (поведение). Проводя аналогию с транспортными системами, можно указать на то,

что транспортный поток города имеет такие же свойства при уплотнении движения и снижении скорости перемещения автомобилей в потоке, то есть предзаторовые состояния. Образование и распространение заторов являются критическими явлениями, в системе происходит фазовый переход к принципиально новому поведению. Послекритическое поведение транспортной системы – снижение количества заторов.

При этом классическим подходом в моделировании транспортных потоков является подход, при котором на макроуровне трафик описывается как жидкость, а единичное транспортное средство, как частица этой жидкости, где водитель наблюдает локальный трафик «вокруг себя» и принимает решения относительно увеличения или снижения скорости движения в потоке.

Также можно привести пример с 3-х фазной теорией Кернера [28], где различается свободный, плотный, широкие движущиеся кластеры (локальные движущиеся заторы), синхронизированный транспортный поток. Между различными состояниями транспортного потока происходят фазовые переходы к новому состоянию.

В качестве инструмента для анализа причин сложного поведения систем можно привести использование степенных законов распределения энергии системы по состояниям, степенных законов распределения вероятности лавины запросов, затрагивающих экономических агентов и слоев экономики, которую вызывает единичный запрос. При этом производитель каждого типа продукции является «экономическим агентом», а слои системы (уровни) – отрасли экономики [14, с. 230]. Степенные законы достаточно адекватно описывают распределение кластеров пожара по размерам; вероятность возгорания внутри кластера и вероятность пожара площадью s – тоже представляются степенным законом [14, с. 238].

В природе обнаружено огромное количество систем, демонстрирующих розовый шум. Он очень широко наблюдается в физических и других системах (от изменения яркости звезд до биения сердца и электрической активности головного мозга). На роль основного объяснения розового шума и претендует теория СОК: он является проявлением во времени некоторого степенного закона. Статистические степенные законы связывают определенным образом количество объектов с их основными свойствами. Если выполняется степенной закон (степенное распределение), то эта связь формализуется как обратная пропорциональность. Например, сильных землетрясений происходит мало, средней силы – среднее количество, а слабых – очень много. Если некоторая совокупность объектов подчиняется степенному рас-

пределению, то в ней есть объекты всех масштабов, что, вообще говоря, характерно для фрактальных структур. Именно степенной закон распределения характерен для силы и количества землетрясений (закон Гутенберга-Рихтера).

Покажем, каким образом все перечисленное может относиться к автомобильным транспортным системам. Рассмотрим событие, связанное с коллективным дорожно-транспортным происшествием. Покажем, что в этом случае транспортная система демонстрирует лавинообразное поведение, свойственное сложным системам. Величину «энергии» E транспортной системы мы определим как характеристику, равную произведению суммарной длины участка с ДТП L на приращение этой длины за Δt : $E \sim L(\lambda - \nu) \Delta t$. Здесь λ и ν – это интенсивности притока и выхода автомобилей из зоны ДТП. Очевидно, чем более протяженной является длина L зоны ДТП, тем более вероятным будет приток в нее автомобилей и тем более затрудненным выход. Смысл величины E для транспортной системы, таким образом, заключается в аналогии с механической потенциальной энергией, которая обладает потенциалом, характеризующим распределение плотности энергии.

Тогда из приведенного соотношения, учитывая линейный характер приращения длины участка $(\lambda - \nu) \Delta t \sim L$, получим, что «энергия» транспортной системы является функцией

$$E(L) \sim L^2. \quad (2)$$

Последнему, согласно [2], соответствует степенной закон распределения с показателем α , который можно записать в виде:

$$P(E) \sim E^{-(1+\alpha)}, \quad (3)$$

где

$$\alpha = 1/2.$$

Это означает, что «ущерб» в транспортной системе определяется формулой (3) с $\alpha = 1/2$, где в качестве «ущерба» следует понимать время простоя транспорта в ДТП, которое зависит от квадрата длины участка с ДТП. Сама формула (3) является степенным распределением, для которого характерно то, что «крупные» события, которым соответствует высокое значение энергии системы, происходят не так уж и редко по сравнению с показательным и нормальным распределением.

Результаты

Рассмотрим перечисленные выше методы по отношению к транспортным системам. Выделим такие системы, как: 1) макроэкономическая транспортная

система и ее динамика, заключающаяся в изменении транспортного спроса и транспортного поведения на больших временах (медленные переменные); 2) транспортная система, в которой наблюдается макроэкономическая динамика транспортного потока, т.е. его фазовые переходы (быстрые переменные); 3) материальные потоки и миграция материальных запасов – макроэкономическая логистическая система.

Решением задачи транспортного спроса занимаются ученые как в России, так и за рубежом. При этом ставятся различные формулировки и как следствие решения задач транспортного спроса, а именно: расчет базового состояния для городской агломерации [25], методики прогнозирования [7; 11; 21; 23; 24], управление [15; 16], представление транспортного спроса методом матриц деления транспортных потоков [8; 13].

Новые исследования А. Дж. Вильсона в области исследования транспортных систем городов касаются таких тем, как моделирование динамики городского развития, визуализация сложного поведения транспортных систем, стохастические процессы, иерархические сети, т.е. те вопросы, которые свойственны именно сложным транспортным системам [31–39].

Подходы к изучению транспортных потоков, транспортного спроса с точки зрения теории сложности, синергетики и нелинейной динамики позволяют осуществлять изучение транспортного поведения с учетом происходящих процессов на микро-, макро- и мезо-уровнях и на различных временных интервалах минуты/часы/сутки. Математический аппарат нелинейной динамики позволяет понять суть явлений, происходящих в транспортной системе при так называемых «фазовых переходах», то есть при качественном изменении плотности потока и скорости движения автомобилей на дорогах; найти аттракторы притяжения возможных состояний транспортной системы; построить модели прогнозирования и управления транспортным спросом и, как конечная цель, – управление транспортным поведением населения, т.е. разработка методик поддержки принятия решений о совершении той или иной поездки, с целью достижения оптимального функционирования всей транспортной системы, исходя из заданных параметров (оптимумов функционирования).

Примером сложного поведения в транспортной системе могут служить фазовые портреты и их проекции, представленные ниже (рисунок 1). Переменными здесь являются:

x – количество выполненной транспортной работы;

y – суммарные потери времени при выполнении работы x ;

z – инвестиции, направленные на развитие транспортной системы.

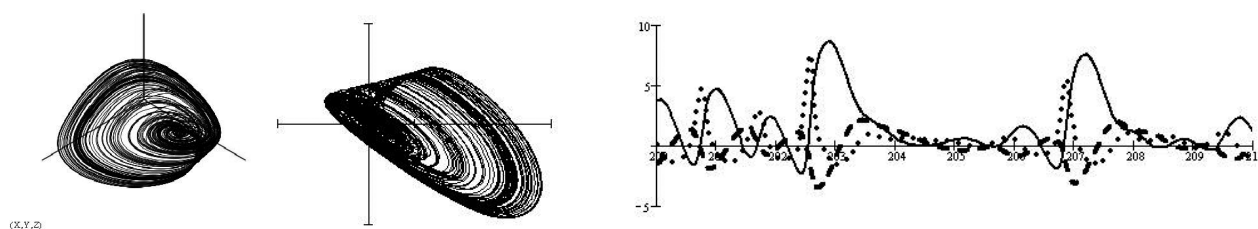


Рисунок 1. Пример аттрактора – макроскопическая динамика транспортных процессов
 Источник: разработано авторами

Данный пример показывает вариант сложного поведения транспортной системы, а именно хаотический режим (динамический хаос, режим, чувствительный к выбору начальных условий), который может служить моделью неравновесной динамики в окрестности стационарного состояния макросистемы. Таким образом, задачи поиска равновесных (устойчивых) состояний, возникновения аттракторов и фазовых переходов в системе представляются интересными для решения в теории транспортных систем. С точки зрения практики, важным является наличие такой модели типа, представленного на рисунке 1, которая соответствовала бы реально наблюдаемым временным рядам.

В простых системах события, означающие переход системы в новые качественные состояния, имеют значительно меньший вес по сравнению со сложными системами. Согласно Олемскому А. И. [16], данный подход отвечает (соответствует) моделированию простых систем. Определение «сложных систем» согласно [16, с. 21]: сложные системы – это

такие, в которых при небольших изменениях параметров могут происходить существенные изменения состояния.

Дадим определение простой системы. Будем считать систему простой, если выполняются условия:

- 1) система, в которой нет бифуркаций (P_1);
- 2) абсолютно предсказуемая система (P_2);
- 3) система с единственным сценарием развития (P_3);
- 4) система без иерархии (P_4);
- 5) изолированная система (P_5);
- 6) система без макроскопического внутреннего движения (P_6).

В этом случае простую систему можно описать следующей логической схемой:

$$P_1 \wedge P_2 \wedge P_3 \wedge P_4 \wedge P_5 \wedge P_6. \quad (4)$$

Соответственно, сложная система – система, которая не является простой и описывается выражением:

$$(\neg P_1) \vee (\neg P_2) \vee (\neg P_3) \vee (\neg P_4) \vee (\neg P_5) \vee (\neg P_6). \quad (5)$$

В уравнениях (4), (5) символы обозначают логические операции:

- « \wedge » – конъюнкцию;
- « \vee » – дизъюнкцию;
- « \neg » – отрицание.

В качестве примеров проявления сложности в транспортных системах можно привести моделирование следующих ситуаций: модель склада, модель управления запасом, модель заполнения придомового пространства автомобилями и т. д.

Сложные явления в транспортных системах могут проявляться на различных уровнях:

- транспортные потоки;
- информационные потоки;
- потоки управления;
- потоки людей (пешеходов и пассажиров).

Обсуждение

Направление данной публикации – обзорно-проблемная статья. Одна из задач, которые ставят перед собой авторы – постановка вопросов, которые решаются при помощи понятийных и математических аппаратов таких наук, как: теория сложности, теория самоорганизованной критичности, нелинейная динамика, синергетика.

Вопросы, которые необходимо ставить и на которые нужно искать ответы в рамках транспортной науки, следующие:

- 1) возможно ли на практике применить систему уравнений типа Лоренца в транспортной системе? Как из макроописания возможно получить маломодовый вариант, т. е. уравнения для переменной, сопряженной переменной и параметра порядка. Результатом описа-

ния сложной транспортной системы могут быть такие маломодовые уравнения (отображающие результат самоорганизации), которые являются уже объектами теории динамического хаоса;

2) как может быть описана эволюция функций распределения переменных системы (для этого имеются различные уравнения: Фоккера-Планка, Ито-Стратоновича, Ланжевена), есть ли возможности построения подобных уравнений для транспортных систем? Что будет использоваться в качестве функций распределения в таком случае и для каких случайных величин?

3) Какой может быть динамика таких функций распределения? Можно ли выявить эти распределения экспериментально, например, для распределения пассажирообмена на остановках?

4) Каковы типы кризисов и бифуркаций, в том числе при проявлении самоорганизованной критичности, например, при переполнении остановок в дни проведения массовых мероприятий, то есть нелинейного отклика на увеличение пассажиропотока?

Так как транспортная система города (агломерации) является сложной, то в ней есть *источники сложности*, то есть особые состояния открытой системы, в которой проявляется самоорганизация, возникают диссипативные структуры и фазовые переходы. Эти источники требуют выявления и перевода в управляемое состояние на основе описываемых подходов.

При поиске источников сложности следует учесть, что большое количество элементов в транспортной системе взаимодействуют между собой и образуют иерархические структуры. Это такие элементы, как:

1) сообщества людей, которые имеет свое определенное транспортное поведение. При этом картина транспортного поведения меняется день ото дня, проявляя динамику;

2) транспортные потоки, движущиеся с различной скоростью и имеющие принципиальные качественные различия (характеристики). Для примера можно привести трехфазную теорию Кернера (различается свободный и плотный потоки, широкие движущиеся кластеры (локальные движущиеся заторы), синхронизированный транспортный поток. Между различными состояниями транспортного потока происходят фазовые переходы к новому состоянию;

3) материальные потоки, например, динамика склада (логистическая задача) – взаимодействие разных систем в одном пространстве: поток автомобилей, операции погрузки/разгрузки грузов и т. д.

Именно эти элементы образуют сложные комбинации своих состояний (динамических), они образуют случайные потоки событий, которые меняют конфи-

гурации. При этом наблюдается следующая методическая последовательность для выявления: потоки → распределения → функции распределения → переменные → эволюция функций.

В результате могут быть целенаправленно разработаны модели сложных транспортных систем. Так, в работе [6] рассмотрены постановки задач о равновесных состояниях ТС для различных структурных уровней УДС и центров массового тяготения. Практический интерес представляют собой следующие задачи:

1) о распределении корреспонденций между транспортными районами города;

2) о распределении корреспонденций по целям поездок;

3) распределение трудовых и социальных корреспонденций по УДС;

4) расчет предельных емкостей одной корреспонденции, а также перегона и маршрута в целом.

В настоящее время требуется перевод этих постановок в рамках учета сложности.

Выводы и заключения

В статье решены следующие задачи:

1) описаны некоторые проявления сложного поведения в транспортных системах;

2) указаны основные предпосылки или причины, вызывающие сложное поведение;

3) формализованы традиционные определения «сложной системы» с использованием результатов междисциплинарных исследований;

4) приведены некоторые модели, демонстрирующие сложное поведение в транспортных системах.

При этом можно сделать следующие выводы:

1) при решении динамических задач транспортного спроса целесообразно применение аппарата теории самоорганизованной критичности, т.к. транспортная система – сложная открытая нелинейная динамическая система, свойства которой наиболее полно проявляются в динамике;

2) в транспортной системе можно обнаружить различные структурные уровни проявления сложности системы. Это значит, что сложное поведение можно наблюдать, как на уровне групп взаимодействующих транспортных средств (микроуровень), так и на уровне макросистемы в целом (сложная системная динамика, неравновесные переходы);

3) в транспортной системе можно выделить докритическое функционирование и критические явления, то есть переходы в новые качественные состояния, объясняемые методами СОК;

4) критические явления могут возникать вследствие поведения человека (транспортное поведение),

природных явлений (снег на дороге приводит к изменению стиля вождения с возможным образованием заторовых состояний на УДС) и др.;

5) показана возможность возникновения в транспортных системах таких явлений, как динамический хаос, фазовый переход, аттракторы и др.;

6) теория сложности, теория СОК и нелинейная динамика имеют общий базис, однако: «неверно считать, что любое сложное поведение системы и поведение на основе СОК являются синонимами. Поведение на основе СОК действительно является сложным, приводящим к появлению целостности системы, но обратное неверно. Сложное поведение системы (экономики в том числе) может иметь и другие альтернативные формы. Мир слишком сложен, чтобы его мож-

но было ограничить рамками СОК [10];

7) описана и обоснована связь между реальными явлениями в транспортных системах (приведен пример группового ДТП) и СОК.

Для практического подтверждения выводов необходимо выполнить анализ реальных статистик поведения транспортных систем, которые соответствуют различным состояниям транспортной системы, включая сложное поведение, а также постановки и решение задач теории транспортных макросистем, которые покажут результаты моделирования сложного поведения транспортных систем на различных уровнях описания.

Данные задачи авторы работы ставят перед собой для проведения дальнейших исследований.

Литература

1. Агуреев И. Е. Нелинейные модели транспортных систем // Мир транспорта и технологических машин. – 2009. – № 2. – С. 3–16. – EDN: TBTNBV.
2. Агуреев И. Е. Развитие теории макросистем как необходимое условие повышения качества транспортного моделирования // Мир транспорта. – 2020. – Т. 18. – № 2. – С. 6–20. – <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2020-18-06-20>. – EDN: WLYRNQ.
3. Агуреев И. Е., Ахромешин А. В. Математическая модель транспортного поведения на основе теории транспортных макросистем // Мир транспорта. – 2021. – Т. 19. – № 6(97). – С. 13–18. – <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2021-19-6-2>. – EDN: MCXWKF.
4. Агуреев И. Е., Ахромешин А. В. Обоснование выбора теоретического аппарата для описания транспортного поведения жителей города (мегаполиса) // Вестник СибАДИ. – 2021. – Т. 18. – № 6(82). – С. 746–758. – <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-6-746-758>. – EDN: KPSSET.
5. Агуреев И. Е., Ахромешин А. В. Подходы к формализации понятия транспортного поведения населения городских агломераций // Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2021. – № 2. – С. 60–70. – <https://doi.org/10.25198/2077-7175-2021-2-60>. – EDN: ATBYTR.
6. Агуреев И. Е., Ахромешин А. В., Пышный В. А. Постановка задач «О равновесиях (равновесных состояниях)» транспортных систем города // Вестник СибАДИ. – 2023. – Т. 20. – № 1(89). – С. 52–75. – <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-1-52-75>. – EDN: FJRONG.
7. Бутузова А. Б., Елфимова Н. А. Оценка транспортного спроса с использованием четырехшаговой транспортной модели // Молодежный вестник ИрГТУ. – 2020. – Т. 10. № 4. – С. 41–45. – EDN: GVERQD.
8. Глухарев К. К., Валуев А. М. Математические модели потоков автомобилей, реализующих транспортный спрос // Управление развитием крупномасштабных систем MLSД'2010: материалы четвертой международной конференции, Москва, 04–06 октября 2010 года. – Москва: Учреждение Российской Академии управления им. В. А. Трапезникова РАН, 2010. – Том 2. – С. 55–57. – EDN: WFZBZB.
9. Евин И. А. Введение в теорию сложных сетей // Компьютерные исследования и моделирование. – 2010. – Т. 2. – № 2. – С. 121–141. – EDN: NDWDGH.
10. Костюк В. Н. Теория самоорганизованной критичности как теория сложности // Информационные технологии и вычислительные системы. – 2016. – № 3. – С. 66–73. – EDN: WTITKB.
11. Кочнева Д. И., Бруснянин Д. А. Методика прогнозирования транспортного спроса в пунктах зарождения пассажиропотока на градуированной транспортной сети // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. – 2014. – № 4(24). – С. 50–58. – EDN: TEWMMF.
12. Лябах Н. Н., Бутакова М. А. Анализ критических ситуаций в транспортных системах // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2004. – № 2. – С. 70–72. – EDN: NOFURZ.
13. Мазурин Д. С. Расчет транспортного спроса в моделях на основе динамического распределения транспортных потоков // Системный анализ и информационные технологии (САИТ – 2017): Сборник трудов Седьмой Международной конференции, Светлогорск, 13–18 июня 2017 года. – Светлогорск: Федеральный

исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук, 2017. – С. 113–116. – EDN: ZGPMСJ.

14. Малинецкий Г. Г., Подлазов А. В. Чудо самоорганизованной критичности // Бак П. Как работает природа: теория самоорганизованной критичности. – М.: УРСС. – 2013. – С. 13–56.

15. Морозов В. В. Управление транспортным спросом как новый способ решения проблем функционирования транспортных систем крупных городов // Актуальные проблемы науки и техники глазами молодых ученых: материалы Международной научно-практической конференции, Омск, 08–09 февраля 2016 года. – Омск: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)», 2016. – С. 535–539. – EDN: WAMGHH.

16. Олемской А. И. Синергетика сложных систем: Феноменология и статистическая теория. – М.: КРА-САНД. – 2009. – 379 с.

17. Попков Ю. С. Математическая демоэкономика: Макросистемный подход. – М.: ЛЕНАНД, 2013. – 560 с.

18. Попков Ю. С. Теория макросистем, – М.: УРСС, 2013. – 245 с.

19. Попков Ю. С., Швецов В. И. Принцип локальных равновесий в моделях региональной динамики // Математическое моделирование. – 1990. – Т. 2. – №. 5. – С. 40–59. – EDN: VNENPN.

20. Разработка методики и создание модели расчета транспортного спроса для транспортных и пассажирских перемещений / А. Н. Зацепин [и др.] // Транспортное дело России. – 2018. – № 6. – С. 352–356. – EDN: PNUVVJ.

21. Ресин В. Н., Попков Ю. С. Развитие больших городов в условиях переходной экономики. – М.: Эдиториал УРСС, 2000. – 328 с.

22. Сакульева Т. Н. Транспортный спрос как функция состояния транспортной сети // Управление. – 2019. – Т. 7. – № 3. – С. 47–53. – <https://doi.org/10.26425/2309-3633-2019-3-47-53>. – EDN: BNXPHH.

23. Хитрова Т. И., Коротенко А. П. Разработка транспортных проектов Иркутской области на основе моделей транспортного спроса // Известия Байкальского государственного университета. – 2021. – Т. 31. – № 1. – С. 34–42. – [https://doi.org/10.17150/2500-2759.2021.31\(1\).34-42](https://doi.org/10.17150/2500-2759.2021.31(1).34-42). – EDN: TSFIFJ.

24. Швецов В. И., Алиев А. С. Математическое моделирование загрузки транспортных сетей. – М.: УРСС, 2003. – 64 с.

25. Bak P., Chen K. (1991) Self-organized criticality, *Scientific American*, Vol. 264. Is. 1, pp. 46–53.

26. Bak P., Tang C., Wiesenfeld K. (1987) Self-organized criticality: An explanation of the 1/f noise, *Physical review letters*, Vol. 59. Is. 4, pp. 381–384. – <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.59.381>.

27. Kerner B. S., Klenov S. L., Schreckenberg M. (2014) Probabilistic physical characteristics of phase transitions at highway bottlenecks: incommensurability of three-phase and two-phase traffic-flow theories, *Physical Review E*, Vol. 89. Is. 5, 052807. – <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.89.052807>.

28. Nagatani T. (1996) Self-organized criticality in 1D traffic flow, *Fractals*, Vol. 4. No. 3, pp. 279–283. – <https://doi.org/10.1142/S0218348X96000388>.

29. Nagel K., Rasmussen S., Barrett C. L. (1996) Network traffic as a self-organized critical phenomena, Los Alamos National Lab.(LANL), Los Alamos, NM (United States), №. LA-UR-96-659, CONF-9509330-2, p. 15, available at: <https://www.santafe.edu/research/results/working-papers/network-traffic-as-a-self-organized-critical-pheno> (accessed: 20.07.2023).

30. Wilson A. (2008) Boltzmann, Lotka and Volterra and spatial structural evolution: an integrated methodology for some dynamical systems, *Journal of The Royal Society Interface*, Vol. 5. No. 25, pp. 865–871. – <https://doi.org/10.1098/rsif.2007.1288>.

31. Wilson A. (2010) Remote sensing as the ‘X-ray crystallography’ for urban ‘DNA’, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 31. No. 22, pp. 5993–6003. – <https://doi.org/10.1080/01431161.2010.512308>.

32. De Martinis V., Pagliara F., Wilson A. (2014) The evolution and planning of hierarchical transport networks, *Environment and Planning B: Planning and Design*, Vol. 41. Is. 2, pp. 192–210. – <https://doi.org/10.1068/b39102>

33. Dearden J., Jones M. W., Wilson A. (2015) DynaMoVis: Visualization of dynamic models for urban modeling, *The Visual Computer*, Vol. 31. Is. 6–8. pp. 1079–1088. – <https://doi.org/10.1007/s00371-015-1096-9>.

34. Piovani D., Molinero C., Wilson A. (2017) Urban retail dynamics: insights from percolation theory and spatial interaction modelling, *PLoS ONE* 12(10), e0185787. – <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0185787>.

35. Guo W. et al. (2017) Urban analytics: multiplexed and dynamic community networks, arXiv preprint arXiv:1706.05535, available at: <https://arxiv.org/abs/1706.05535>(accessed: 20.07.2023).

36. Piovani D. et al. (2018) Measuring accessibility using gravity and radiation models, *Royal Society open science*, Vol. 5. Is. 9, 171668. – <https://doi.org/10.1098/rsos.171668>.
37. Wilson A. (2018) The future of urban modelling, *Applied Spatial Analysis and Policy*, Vol. 11, pp. 647–655. – <https://doi.org/10.1007/s12061-018-9258-6>.
38. Ellam L. et al. (2018) Stochastic modelling of urban structure, *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, Vol. 474. Is. 2213. – <https://doi.org/10.1098/rspa.2017.0700>.
39. Dearden J. et al. (2019) Using the State Space of a BLV Retail Model to Analyse the Dynamics and Categorise Phase Transitions of Urban Development, *Urban Science*, Vol. 3. Is. 1, 31. – <https://doi.org/10.3390/urbansci3010031>.

References

1. Agureev, I. E. (2009) [Nonlinear models of transport systems]. *Mir transporta i tekhnologicheskikh mashin* [World of transport and technological machines]. Vol. 2, pp. 3–16. (In Russ.).
2. Agureev, I. E. (2020) [Development of the theory of macrosystems as a necessary condition for improving the quality of transport modeling]. *Mir transporta* [World of Transport]. Vol. 18. No. 2, pp. 6–20. – <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2020-18-06-20>. (In Russ.).
3. Agureev, I. E., Akhromeshin, A. V. (2021) [Mathematical model of transport behavior based on the theory of transport macrosystems]. *Mir transporta* [World of Transport]. Vol. 19. No. 6(97), pp. 13–18. – <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2021-19-6-2>. (In Russ.).
4. Agureev, I. E., Akhromeshin, A. V. (2021) [Justification for the choice of theoretical apparatus for describing the transport behavior of city (metropolis) residents]. *Vestnik SibADI* [Vestnik SibADI]. Vol. 18. No. 6(82), pp. 746–758. – <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-6-746-758>. (In Russ.).
5. Agureev, I. E., Akhromeshin, A. V. (2021) [Approaches to formalizing the concept of transport behavior of the population of urban agglomerations]. *Intellekt. Innovacii. Investicii* [Intellect. Innovation. Investments]. Vol. 2, pp. 60–70. – <https://doi.org/10.25198/2077-7175-2021-2-60>. (In Russ.).
6. Agureev, I. E., Akhromeshin, A. V., Pyshny, V. A. (2023) [Statement of problems “On equilibria (equilibrium states)” of city transport systems]. *Vestnik SibADI* [Bulletin of SibADI]. Vol. 20. No. 1(89), pp. 52–75. – <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-1-52-75>. (In Russ.).
7. Butuzova, A. B., Elfimova, N. A. (2020) [Assessment of transport demand using a four-step transport model]. *Molodezhnyy vestnik IrGTU* [Youth Bulletin of ISTU]. Vol. 10. No. 4, pp. 41–45. (In Russ.).
8. Glukharev, K. K., Valuev, A. M. (2010) [Mathematical models of vehicle flows realizing transport demand]. *Upravleniye razvitiyem krupnomasshtabnykh sistem MLSLSD’2010: materialy chetvertoy mezhdunarodnoy konferentsii, Moskva, 04–06 oktyabrya* [Management of the development of large-scale systems MLSLSD’2010: materials of the fourth international conference, Moscow, October 04–06]. Moscow: Establishment of the Russian Academy of Management named after. In A. Trapeznikova RAS, Volume 2, pp. 55–57. (In Russ.).
9. Evin, I. A. (2010) [Introduction to the theory of complex networks]. *Komp’yuternyye issledovaniya i modelirovaniye* [Computer research and modeling]. Vol. 2. No. 2, pp. 121–141. (In Russ.).
10. Kostyuk, V. N. (2016) [The theory of self-organized criticality as a theory of complexity]. *Informatsionnyye tekhnologii i vychislitel’nyye sistemy* [Information technologies and computing systems]. Vol. 3, pp. 66–73. (In Russ.).
11. Kochneva, D. I., Brusyanin, D. A. (2014) [Methodology for forecasting transport demand at points of origin of passenger traffic on a graduated transport network]. *Vestnik Ural’skogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* [Bulletin of the Ural State Transport University]. Vol. 4(24), pp. 50–58. (In Russ.).
12. Lyabakh, N. N., Butakova, M. A. (2004) [Analysis of critical situations in transport systems]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Severo-Kavkazskiy region. Tekhnicheskkiye nauki* [News of higher educational institutions. North Caucasus region. Technical science]. Vol. 2, pp. 70–72. (In Russ.).
13. Mazurin, D. S. (2017) [Calculation of transport demand in models based on the dynamic distribution of transport flows]. *Sistemnyy analiz i informatsionnyye tekhnologii (SAIT - 2017): Sbornik trudov Sed'moy Mezhdunarodnoy konferentsii, Svetlogorsk, 13–18 iyunya* [System analysis and information technologies (SAIT – 2017): Collection of proceedings of the Seventh International Conference, Svetlogorsk, June 13–18]. Svetlogorsk: Federal Research Center “Informatics and Management” of the Russian Academy of Sciences, pp. 113–116. (In Eng.).
14. Malinetsky, G. G., Podlazov, A. V. (2013) [The miracle of self-organized criticality]. *Bak P. Kak rabotayet priroda: teoriya samoorganizovannoy kritichnosti* [Bak P. How nature works: the theory of self-organized criticality]. Moscow: URSS, pp. 13–56. (In Eng.).
15. Morozov, V. V. (2016) [Transport demand management as a new way to solve problems in the functioning

of transport systems of large cities]. *Aktual'nyye problemy nauki i tekhniki glazami molodykh uchenykh: materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Omsk, 08–09 fevralya 2016 goda* [Current problems of science and technology through the eyes of young scientists: materials of the International Scientific and Practical Conference, Omsk, February 08–09]. Omsk: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education “Siberian State Automobile and Highway University (SibADI)”, pp. 535–539. (In Eng.).

16. Olemskoy, A. I. (2009) *Sinergetika slozhnykh sistem: Fenomenologiya i statisticheskaya teoriya* [Synergetics of complex systems: Phenomenology and statistical theory]. Moscow: KRASAND, 379 p.

17. Popkov, Yu. S. (2013) *Matematicheskaya demoekonomika: Makrosistemnyy podkhod* [Mathematical demoeconomics: Macrosystem approach]. Moscow: LENAND, 560 p.

18. Popkov, Yu. S. (2013) *Teoriya makrosistem* [Theory of macrosystems]. Moscow: URSS, 245 p.

19. Popkov, Yu. S., Shvetsov, V. I. (1990) [The principle of local equilibria in models of regional dynamics]. *Matematicheskoye modelirovaniye* [Mathematical Modeling]. Vol. 2. No. 5, pp. 40–59. (In Russ.).

20. Zatsepin, A. N. (2018) [Development of a methodology and creation of a model for calculating transport demand for transport and passenger movements]. *Transportnoye delo Rossii* [Transport business of Russia]. Vol. 6, pp. 352–356. (In Eng.).

21. Resin, V. N., Popkov, Yu. S. (2000) *Razvitiye bol'shikh gorodov v usloviyakh perekhodnoy ekonomiki* [Development of large cities in a transitional economy]. Moscow: Editorial URSS, 328 p.

22. Sakulyeva, T. N. (2019) [Transport demand as a function of the state of the transport network]. *Upravleniye* [Management]. Vol. 7. No. 3, pp. 47–53. – <https://doi.org/10.26425/2309-3633-2019-3-47-53>. (In Eng.).

23. Khitrova, T. I., Korotenko, A. P. (2021) [Development of transport projects in the Irkutsk region based on transport demand models]. *Izvestiya Baykal'skogo gosudarstvennogo universiteta* [News of the Baikal State University]. Vol. 31. No. 1, pp. 34–42. – [https://doi.org/10.17150/2500-2759.2021.31\(1\).34-42](https://doi.org/10.17150/2500-2759.2021.31(1).34-42). (In Eng.).

24. Shvetsov, V. I., Aliev, A. S. (1987) *Matematicheskoye modelirovaniye zagruzki transportnykh setey* [Mathematical modeling of loading transport networks]. M.: URSS, 64 p.

25. Bak, P., Tang, C., Wiesenfeld, K. (1987) Self-organized criticality: An explanation of the $1/f$ noise. *Physical review letters*. Vol. 59. No. 4, pp. 381. (In Eng.).

27. Kerner, B. S., Klenov, S. L., Schreckenberg, M. (2014) Probabilistic physical characteristics of phase transitions at highway bottlenecks: incommensurability of three-phase and two-phase traffic-flow theories. *Physical Review E*. Vol. 89. No. 5, pp. 052807. (In Eng.).

28. Nagatani, T. (1996) Self-organized criticality in 1D traffic flow. *Fractals*. Vol. 4. No. 03, pp. 279–283. (In Eng.).

29. Nagel, K., Rasmussen, S., Barrett, C. L. (1996) Network traffic as a self-organized critical phenomena. Los Alamos National Lab.(LANL), Los Alamos, NM (United States), №. LA-UR-96-659; CONF-9509330-2. (In Eng.).

30. Wilson, A. (2008) Boltzmann, Lotka and Volterra and spatial structural evolution: an integrated methodology for some dynamical systems. *Journal of The Royal Society Interface*. Vol. 5. No. 25, pp. 865–871. (In Eng.).

31. Wilson, A. (2010) Remote sensing as the ‘X-ray crystallography’ for urban ‘DNA’. *International Journal of Remote Sensing*. Vol. 31. No. 22, pp. 5993–6003. (In Eng.).

32. De Martinis, V., Pagliara, F., Wilson, A. (2014) The evolution and planning of hierarchical transport networks. *Environment and Planning B: Planning and Design*. Vol. 41. No. 2, pp. 192–210. (In Eng.).

33. Dearden, J., Jones, M. W., Wilson, A. (2015) DynaMoVis: Visualization of dynamic models for urban modeling. *The Visual Computer*. Vol. 31. No. 6–8, pp. 1079–1088. (In Eng.).

34. Piovani, D., Molinero, C., Wilson, A. (2017) Urban retail dynamics: insights from percolation theory and spatial interaction modelling. arXiv preprint arXiv. (In Eng.).

35. Guo, W. et al. (2017) Urban analytics: multiplexed and dynamic community networks. arXiv preprint arXiv:1706.05535. Available at: <https://arxiv.org/abs/1706.05535> (accessed: 20.07.2023) (In Eng.).

36. Piovani, D. et al. (2018) Measuring accessibility using gravity and radiation models. *Royal Society open science*. Vol. 5. No. 9, pp. 171668. (In Eng.).

37. Wilson, A. (2018) The future of urban modelling. *Applied Spatial Analysis and Policy*. Vol. 11, pp. 647–655. (In Russ.).

38. Ellam, L. et al. (2018) Stochastic modelling of urban structure // Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. Vol. 474. No. 2213, pp. 20170700. (In Eng.).

39. Dearden, J. et al. (2019) Using the State Space of a BLV Retail Model to Analyse the Dynamics and Categorise Phase Transitions of Urban Development. *Urban Science*. Vol. 3. No. 1, pp. 31. (In Eng.).

Информация об авторах:

Игорь Евгеньевич Агуреев, доктор технических наук, профессор кафедры транспортно-технологических механизмов и процессов, Тульский государственный университет, Тула, Россия

Author ID: 15872, **ORCID ID:** 0000-0002-7903-139X

e-mail: agureev-igor@yandex.ru

Андрей Владимирович Ахромешин, кандидат технических наук, доцент кафедры транспортно-технологических механизмов и процессов, Тульский государственный университет, Тула, Россия

Author ID: 1187323, **ORCID ID:** 0000-0001-8016-9655

e-mail: aakhromeshin@yandex.ru

Владислав Александрович Пышный, кандидат технических наук, доцент кафедры транспортно-технологических механизмов и процессов, Тульский государственный университет, Тула, Россия

Author ID: 702882, **ORCID ID:** 0000-0003-0380-8147

e-mail: vladislav.pyshnyi@mail.ru

Вклад соавторов:

Агуреев И. Е. – формулировка задач исследования, научные положения.

Ахромешин А. В. – оформление, поиск и подбор источников литературы. Анализ исследований отечественных и зарубежных авторов в области исследования теории самоорганизованной критичности.

Пышный В. А. – анализ исследований отечественных и зарубежных авторов в области исследований энтропийного подхода.

Статья поступила в редакцию: 24.07.2023; принята в печать: 03.11.2023.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Information about the authors:

Igor Evgenievich Agureev, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Transport and Technological Mechanisms and Processes, Tula State University, Tula, Russia

Author ID: 15872, **ORCID ID:** 0000-0002-7903-139X

e-mail: agureev-igor@yandex.ru

Andrey Vladimirovich Akhromeshin, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Transport and Technological Mechanisms and Processes, Tula State University, Tula, Russia

Author ID: 1187323, **ORCID ID:** 0000-0001-8016-9655

e-mail: aakhromeshin@yandex.ru

Vladislav Alexandrovich Pyshnyi, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Transport and Technological Mechanisms and Processes, Tula State University, Tula, Russia

Author ID: 702882, **ORCID ID:** 0000-0003-0380-8147

e-mail: vladislav.pyshnyi@mail.ru

Contribution of the authors:

Agureev I. E. – formulation of research objectives, scientific provisions.

Akhromeshin A. V. – design, search and selection of literature sources. Analysis of the research of domestic and foreign authors in the field of research of the theory of self-organized criticality.

Pyshnyi V. A. – analysis of the research of domestic and foreign authors in the field of entropy approach research.

The paper was submitted: 24.07.2023.

Accepted for publication: 03.11.2023.

The authors have read and approved the final manuscript.