

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Е.С. Осетрова «Математические модели, методы и алгоритмы для прогнозирования пассажирских перевозок», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»

Диссертация посвящена развитию математических моделей, методов и алгоритмов для прогнозирования пассажирских перевозок. Основу диссертации составляют результаты исследований, выполненных Осетровым Е.С. в Лаборатории информационных технологий Объединенного института ядерных исследований за период с 2014 по 2018 гг. в рамках проблемно-тематического плана Лаборатории.

Развитие математических моделей, методов и алгоритмов для прогнозирования пассажирских перевозок обусловлено их применением в решении конкретных задач обеспечения достоверной и оперативной информации для повышения эффективности управления транспортными системами при реализации контроля, координации и планирования их работы.

В качестве объекта исследования автором выбрано изменение объемов перевозок пассажиров Московским метрополитеном в виде временного ряда, а также ряд факторов, также представленных в виде временных рядов с шагом наблюдения одни сутки. Предметом исследования является разработка и оптимизация математических моделей, методов, алгоритмов и вычислительных схем, обеспечивающих достоверное прогнозирование изменений объемов перевозок пассажиров Московским метрополитеном в краткосрочной и среднесрочной перспективах.

Не вызывает сомнения высокая степень актуальности возможных прикладных направлений, на основе новых результатов, полученных в рамках представленной работы.

Диссертация содержит введение, 4 главы, заключение, список литературы.

Во **Введении** формулируется постановка и концептуальная идея решаемой в диссертационной работе задачи, отмечается ее важность и актуальность, дается обзор имеющихся к настоящему времени методов, которые могут быть применены для ее решения. Приводится краткое изложение содержания диссертации по главам, а также список решений и полученных результатов, выносимых на защиту.

В **главе 1** рассматриваются актуальные вопросы и проблемы использования современных подходов для прогнозирования изменений объемов пассажирских перевозок и спроса на транспортные услуги, их возможности и ограничения. Автором проводится анализ существующих

подходов к прогнозированию изменений объемов пассажирских перевозок и спроса пассажиров на транспортные услуги (транспортный спрос).

Автором сделан вывод о том, что большинство из существующих методик прогнозирования пассажирских перевозок применяются для стратегического прогнозирования (от одного года и более с временным шагом в один год), что обусловлено на практике периодичностью сбора и получения необходимой информации о влияющих на спрос факторах. В качестве воздействующих факторов автором предполагается рассмотрение и анализ влияния таких факторов, которые ранее не использовались для прогнозирования объемов пассажирских перевозок, а также оценить возможность их применения для математических моделей, методов и алгоритмов прогнозирования объемов пассажирских перевозок. Автором показано, что показатель энергопотребления в регионе или агломерации может выступать в качестве одного из факторов изменений объемов пассажирских перевозок, как характеристика транспортной подвижности населения и его активности в перемещениях в данном регионе. Таким образом, автором предлагается и обосновывается использование математических методов анализа и построения вычислительной схемы прогнозирования временных рядов, которые смогут выступить в качестве альтернативного и эффективного инструмента прогнозирования краткосрочных и среднесрочных изменений объемов пассажирских перевозок в зависимости от подбираемых (предлагаемых автором к рассмотрению) факторов внешней среды и энергопотребления, как фактора характеризующего социальную и экономическую активность пассажиров, связанную с использованием рассматриваемой транспортной системы.

В главе 2 развит и продемонстрирован новый подход для прогнозирования суточных объемов пассажирских перевозок в Московском метрополитене на основе искусственных нейронных сетей (ИНС) прямого типа. При обучении и прогнозировании на вход нейронной сети подавалась выборка, составленная из ключевых факторов, от которых зависит суточный трафик пассажиров в метро. Автором в качестве ИНС использовался многослойный перцептрон из пакета TMVA 4.2.0 в среде ROOT. Продемонстрирована возможность краткосрочного прогнозирования на данных, отвечающих суточным объемам пассажирских перевозок в будние дни. Проведен анализ состава и влияния различных факторов на исследуемые временные ряды. В результате проведенного анализа в программном пакете Statistical Package for the Social Sciences (SPSS) удалось сократить объем выборки, подаваемой на вход нейронной сети, а также ускорить процедуру ее обучения. Разработана процедура исключения шума на основе вейвлет-фильтрации исходных данных. Процедура фильтрации и фитирования временных рядов была реализована с помощью пакета MINUIT в среде пакета PAW (Physical Analysis Workstation). Показано, что данная процедура вейвлет-фильтрации позволяет повысить точность прогноза и, как следствие, увеличить горизонт прогнозирования в четыре раза. Одним из

факторов в вычислительной схеме при прогнозировании изменений объемов пассажирских перевозок является величина суточного потребления электроэнергии в Московской агломерации, представленная в виде временного ряда; участие данной переменной в предложенной прогнозной модели обеспечивает достаточный уровень качества прогноза. Поэтому для прогнозирования пассажирских перевозок в метрополитене с помощью искусственной нейронной сети, необходимо выполнить прогноз суточного энергопотребления в Московской агломерации, для обеспечения прогнозной модели дополнительными исходными данными.

В главе 3 развита и апробирована вычислительная схема (на основе ИНС рекуррентного типа и подхода «Гусеница»-SSA), позволившая обеспечить прогнозирование потребления электроэнергии в Московской агломерации в среднесрочной перспективе. Как и в случае суточных объемов пассажирских перевозок, этот ряд был подвергнут процедуре вейвлет-фильтрации для исключения из него высокочастотного шума. В данной главе продемонстрирована возможность и эффективность комплексного использования ИНС рекуррентного типа и подхода «Гусеница»-SSA, когда для вычисления прогнозного участка, используемого на этапе проведения среднесрочного прогноза с помощью обученной ИНС, применялся метод «Гусеница»-SSA, реализованный в пакете CaterpillarSSA (version 3.40, Professional Edition). Сформированная таким образом входная выборка и последовательность этапов вычислений позволили: достичь быстрого и эффективного обучения нейронной сети, а также обеспечить точность среднесрочного прогнозирования суточного энергопотребления для Московской агломерации.

В главе 4 создана и продемонстрирована работа вычислительной схемы (на основе ИНС рекуррентного типа и подхода «Гусеница» - SSA), позволившая обеспечить прогнозирование пассажиропотока в Московском метрополитене в среднесрочной перспективе. Предложенная автором вычислительная схема включала три варианта прогноза: 1) на основе искусственных нейронных сетей: использовалась многослойная ИНС рекуррентного типа, на вход которой подавался набор факторов, влияющих на суточный объем пассажирских перевозок; 2) используя сингулярно-спектральный анализ, реализованный в пакете «Гусеница»-SSA: в этом случае анализировались только данные временного ряда суточных перевозок пассажиров; 3) совместное использование ИНС и подхода «Гусеница»-SSA: на вход ИНС, в дополнение к указанным выше факторам, подавались данные прогноза, вычисленные с помощью метода «Гусеница»-SSA.

Прогноз методом «Гусеница»-SSA оказался смещенным относительно прогнозируемых данных в область больших значений пассажиропотока. Это же явилось причиной смещения прогнозных значений в область больших величин объемов перевозок пассажиров при совместном использовании методов ИНС и SSA. Таким образом, подтвердилась гипотеза, о чувствительности ИНС к данным подаваемым на вход сети.

Наилучшего варианта прогноза удалось добиться с помощью ИНС. При этом из перечня факторов, подаваемых на вход ИНС, можно исключить отклонения дневной температуры от среднестатистической нормы. Данный фактор не оказал значимого влияния на результаты прогноза.

Результаты экспериментов показали, что относительная ошибка симметрична относительно нуля и не превышает 3-5%. Таким образом, используя ИНС, можно с указанной точностью прогнозировать временные ряды, характеризующие изменения объемов перевозок пассажиров метрополитеном.

В разделе **Заключение** подводятся итоги выполненных исследований, дается краткое описание работ, положенных в основу диссертации, формулируются основные результаты и личный вклад соискателя в проведенные исследования.

По тексту диссертации и автореферата имею следующие замечания:

1. В главе 2 автором исходный временной ряд, описывающий суточные объемы перевозок пассажиров метрополитеном был разделен на два ряда: рабочие (будние) дни и выходные (праздничные) дни. Дальнейшее рассмотрение в главе 2 и в последующих главах посвящено только изучению временного ряда объемов пассажирских перевозок по рабочим (будним) дням. На мой взгляд, целесообразно было бы провести исследование, позволяющее качественно и количественно сравнить результаты применения предложенных автором методов, моделей и алгоритмов для временного ряда объемов пассажирских перевозок по выходным (праздничным) дням. Впрочем, это замечание носит рекомендательный характер для продолжения исследований в рамках направлений, представленных в диссертации.
2. В тексте автореферата (стр. 26) рисунок 19 и рисунок 20 перегружены информацией, что затрудняет их восприятие и интерпретацию. Однако в тексте диссертации данное обстоятельство устраняется автором детальными комментариями и соответствующими пояснениями.
3. В текстах диссертации и автореферата имеются погрешности грамматического и стилистического характера.

Несмотря на сделанные замечания, в целом диссертация написана на высоком научном уровне и представляет собой законченную научно-исследовательскую работу в рамках поставленных в ней целей и решаемых задач.

Автореферат диссертации соответствует содержанию диссертации.

Результаты диссертации способствуют повышению эффективности и скорости принятия управленческих решений на предприятиях городского общественного транспорта в зависимости от ситуации, как на метрополитене и смежных видах транспорта, так и в окружающей внешней среде, включая климатические условия и динамику энергопотребления, как индикатора экономической, деловой и социальной активности населения агломерации или региона, который использует метрополитен в качестве одного из основных видов транспорта.

