

658.012.011.56..658.26

# МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОСНОВНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ БЕЗОПАСНОСТИ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ ГОРОДА МОСКВЫ

**М.С. Поляков**

*Институт проблем точной механики и управления  
ФГБУН ФИЦ «Саратовский научный центр Российской Академии Наук»  
Россия, 410028, Саратов, Рабочая ул., 24Б  
E-mail: maxg6000@mail.ru*

**В.А. Кушников**

*Институт проблем точной механики и управления  
ФГБУН ФИЦ «Саратовский научный центр Российской Академии Наук»  
Россия, 410028, Саратов, Рабочая ул., 24Б  
E-mail: kushnikoff@yandex.ru*

**А.С. Богомолов**

*Институт проблем точной механики и управления  
ФГБУН ФИЦ «Саратовский научный центр Российской Академии Наук»  
Россия, 410028, Саратов, Рабочая ул., 24Б  
E-mail: alexbogomolov@yandex.ru*

**А.Ф. Резчиков**

*Институт проблем управления им В.А. Трапезникова РАН  
Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65  
E-mail: gw4cy@mail.ru*

**Ключевые слова:** безопасность, прогнозирование, модель системной динамики, дорожно-транспортная сеть, дорожное движение, причинно-следственная связь.

**Аннотация:** Построена системно-динамическая модель для прогнозирования показателей безопасности дорожного движения в мегаполисе. Показатели соответствуют нормативно-правовым документам Госавтоинспекции МВД России для города Москвы. Полученные результаты будут использованы при совершенствовании математического обеспечения систем управления дорожно-транспортным движением города Москвы.

## 1. Этапы построения математической модели

Для эффективного прогнозирования критических показателей безопасности целесообразно задействовать методологию системной динамики [1], которая доказала свою эффективность при моделировании обширного спектра сложных систем и процессов [2, 3].

Разработка модели для прогнозирования динамики переменных системы предполагает [4, 5] построение схемы причинно-следственных связей и системы

дифференциальных уравнений общего вида на основе этой схемы. Конкретизация коэффициентов системы происходит на основе установленных регрессионных зависимостей между переменными. Решение поостренной системы дифференциальных уравнений позволяет моделировать динамику исследуемых показателей в их сложной взаимосвязи.

Пример модели системной динамики, основанной на формальном описании сценариев управления в сочетании с методами представления и обработки экспертных знаний о причинно-следственных связях, показан в работе [6].

Примеры моделей системной динамики для оценки макроэкономических сценариев региона по социально-экономическим критериям, показаны в работах [7-9].

## 2. Разработка графа причинно-следственных связей между переменными модели и внешними факторами

Разработка графа причинно-следственных взаимосвязей – важный этап в построении математической модели. Он наглядно иллюстрирует зависимости между переменными модели и внешними факторами. Большинство характеристик безопасности взаимосвязаны положительными и отрицательными связями. Этот факт значительно влияет на поведение характеристик с течением времени. Как показано в [10], узлы графа представляют переменные модели  $X_1 - X_{15}$  и внешние факторы  $E_1 - E_6$ , а рёбра определяют причинно-следственные связи между ними.

## 3. Построение функциональных зависимостей между переменными модели

Граф, который показывает причинно-следственные связи, используется для выявления функциональных зависимостей между различными переменными модели.

Выражения вида  $f_{A,B}(X_B)$  описывают зависимость переменной  $X_A$  от  $X_B$ , и вычисляются при помощи методов регрессионного анализа, в частности методом наименьших квадратов. Эти функциональные зависимости обычно аппроксимируются полиномами второй степени.

В качестве примера рассмотрим две функциональные зависимости: количества ДТП с пострадавшими водителями ( $X_6$ ) от количества ДТП, с места совершения которых водитель скрылся, а транспортное средство осталось на месте ( $X_4$ ). А также количества ДТП в населенных пунктах ( $X_{10}$ ) от количества ДТП из-за нарушения ПДД водителями, возраст которых от 16 до 18 лет ( $X_{13}$ ) (рис. 1).

На рис. 1 изображены графики изменения зависимостей во времени (оранжевая линия), а также фактические данные, которые взяты из статистики [4] (синяя линия). Для каждой функциональной зависимости подсчитаны характеристики. Например, для  $f_{6,4}(X_4)$ : критерий Пирсона: 0,96, среднеквадратичное отклонение = 0,178, стандартная ошибка регрессии = 0,057, дисперсия регрессии = 0,0384.

Критерий Пирсона оценивает, насколько хорошо эмпирическое распределение данных соответствует теоретическому распределению, предоставляя меру достоверности аппроксимации.

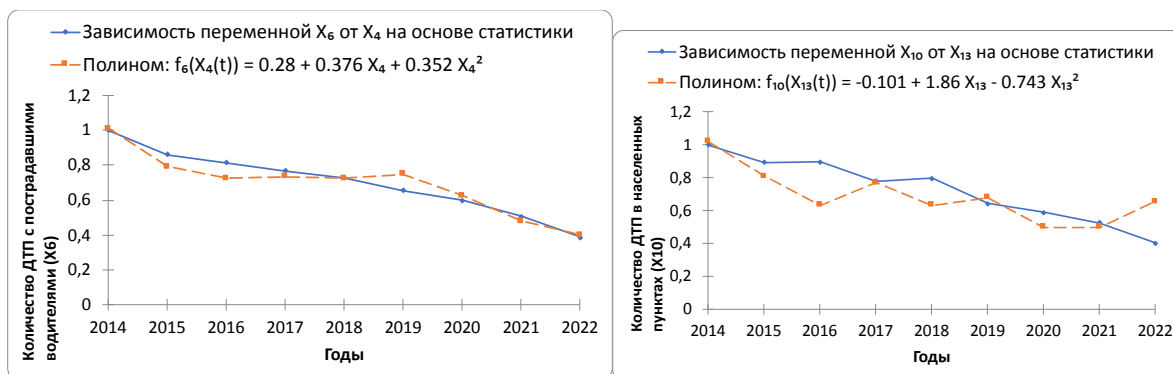


Рис. 1. Пример функциональных зависимостей ( $X_6$  от  $X_4$ ) и ( $X_{10}$  от  $X_{13}$ ).

#### 4. Моделирование и коррекция точности модели

Дифференциальные уравнения системной динамики решаются в численном виде методом Рунге-Кутты 4-го порядка точности. Полученные данные прогнозировались на статистических данных с 2015-2022 гг. Для примера покажем, как изменялась переменная  $X_4$  на временном интервале с 2015-2021 гг. (рис. 2).

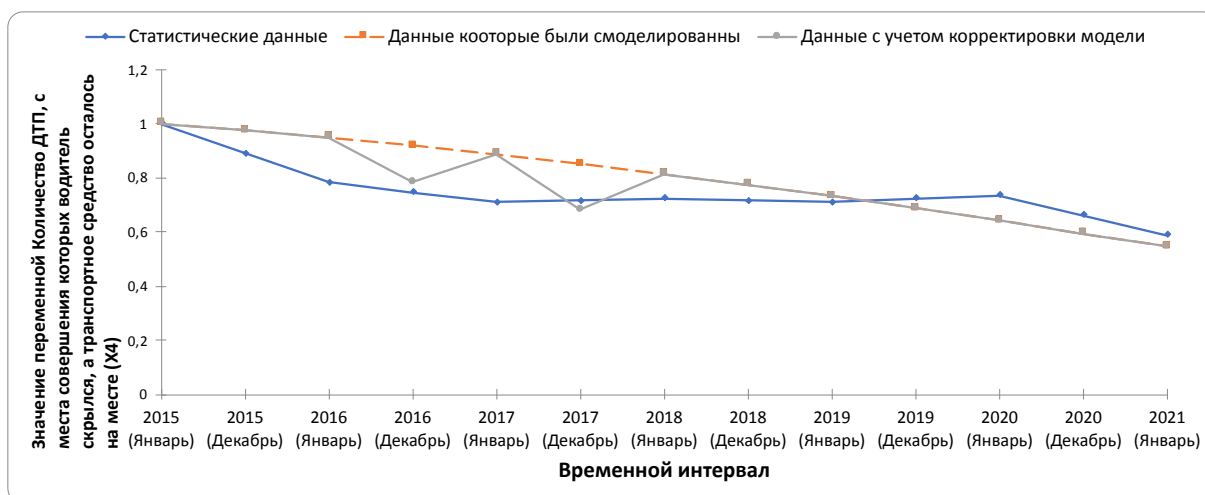


Рис. 2. Коррекция математической модели для переменной  $X_4$  на временном интервале с 2015 по 2021 год.

Математическая модель начинает выполнять коррекцию, если разность между спрогнозированными и статистическими данными превышает 10%. На рис. 2 видно, что с января 2016 года по январь 2018 года значения спрогнозированной переменной  $X_4$  отличаются от фактических значений более чем на 10%, поэтому модель начала коррекцию. Однако, на оставшемся промежутке времени модель не корректировалась (ломанная линия).

На рис. 3 изображен график, иллюстрирующий изменения во времени спрогнозированных показателей безопасности дорожного движения города Москвы на временном интервале с 2020-2025 гг. Сравнение результатов моделирования с реальными статистическими данными проводилось для каждой переменной за указанный период.

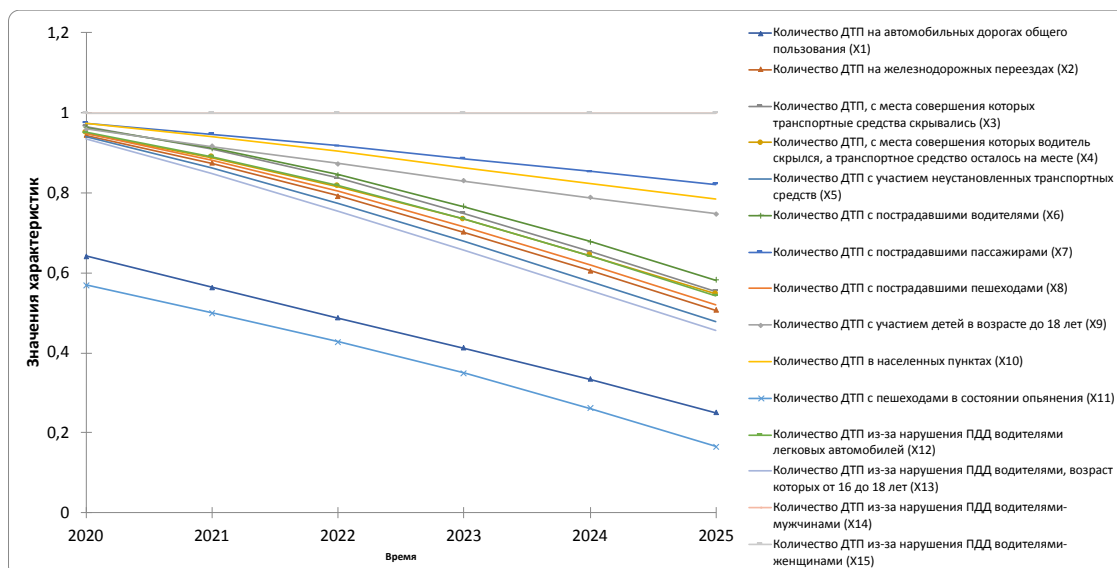


Рис. 3. Результаты прогнозирования основных показателей безопасности дорожного движения Москвы с 2020 по 2025 год.

На рис. 4 изображены лепестковые диаграммы, которые показывают срез спрогнозированных переменных модели и их предельные значения за 2023 и 2024 года. Пограничные значения переменных обозначены красным. Из рисунка видно, что в 2023 году характеристика  $X_7$  превысила допустимые значения. В этом случае ЛПР (лицо принимающее решения) должно отправить информацию в соответствующие органы для достижения приемлемых значений этой характеристики в будущем.

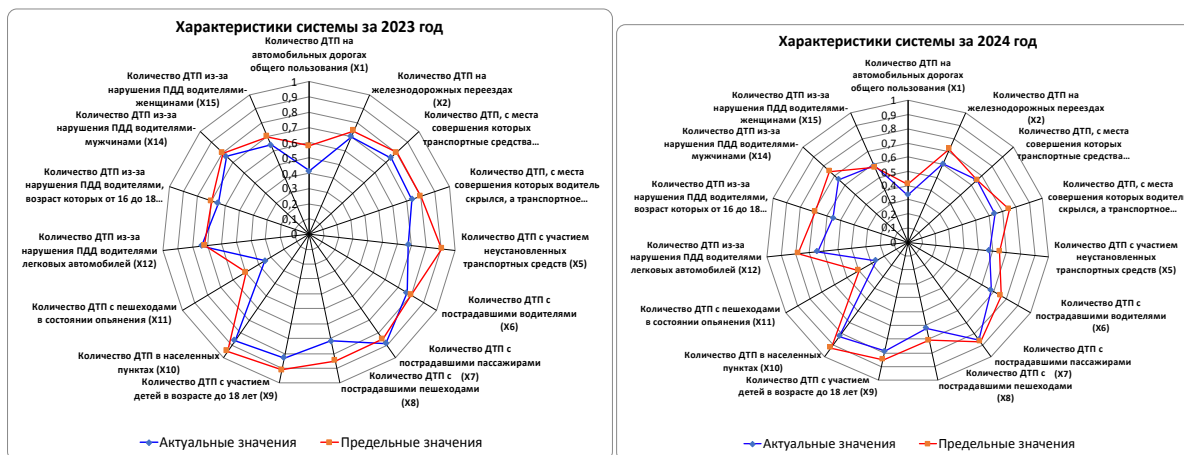


Рис 4. Сравнение спрогнозированных показателей безопасности дорожного движения Москвы с предельными значениями за 2023 и 2024 годы.

## 5. Заключение

Разработана математическая модель, основанная на принципах системной динамики, которая позволяет спрогнозировать ключевые показатели безопасности дорожного движения в Москве. Эта методология включает систему нелинейных дифференциальных уравнений, решение которой обеспечивает прогнозы показателей безопасности на заданных временных отрезках. Также была предложена процедура

коррекции математической модели, которая позволяет более точно и достоверно прогнозировать показатели безопасности дорожного движения.

## Список литературы

1. Форрестер Д. Мировая динамика / Пер. с англ. М.: АСТ, 2003. 379 с.
2. Резчиков А.Ф., Кушников В.А., Иващенко В.А., Богомолов А.С., Филимонюк Л.Ю. Моделирование последствий наводнений на основе причинно-следственных комплексов и системно-динамического подхода Форрестера // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2017. Т. 136 № 4. С. 13-20.
3. Khamutova M.V., Rezchikov A.F., Kushnikov V.A., et al. Forecasting characteristics of flood effects // Journal of Physics: Conference Series. Tomsk, 17–20 января 2018 года. Vol. 1015, 5. Institute of Physics Publishing. 2018. P. 052012.
4. Сайт Госавтоинспекции МВД России, сведения о показателях состояния безопасности дорожного движения. <http://stat.gibdd.ru/> (дата обращения: 24.10.2023).
5. Информационно-правовой портал Гарант, Федеральный закон от 10 декабря 1995 г. N 196-ФЗ «О безопасности дорожного движения». <http://base.garant.ru/10105643/> (дата обращения: 21.10.2023).
6. Dranko O.I., Bogomolov A.S., Rezchikov A.F., Tsvirkun A.D., Stepanovskaya I.A. System-dynamic Modeling of the Decarbonization Strategy // Proceedings of 2023 26th International Conference on Soft Computing and Measurements SCM 2023. 2023. P. 281–284.
7. Pashchenko A.F. Analysis of the Quality of Predictive Models of Macroeconomic Parameters of Moscow for the period of 10 years. 2020 13th International Conference “Management of large-scale system development” (MLSD’2020). P. 1-5.
8. Tsvirkun A., Dranko O., Dvoryashina M. The Model for Assessing Scenarios for Managing the Economic Development of the Region // 2022 15th International Conference Management of large-scale system development (MLSD’2020). P. 1-5.
9. Loginovskiy O.V., Dranko O.I., Hollay A.V. Mathematical Models for Decision-Making on Strategic Management of Industrial Enterprise in Conditions of Instability // Proceedings of the Workshop on Internationalization of Education in Applied Mathematics and Informatics for HighTech Applications («EMIT»). (CEUR Workshop Proceedings). Leipzig, Germany. 2018. Vol. 2093. P. 1-12.
10. Поляков М.С., Кушников В.А., Богомолов А.С., Резчиков А.Ф. Модели системной динамики для анализа характеристик дорожно-транспортной системы России // Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD’2023): Труды XVI международной конференции. М.: ИПУ им. В.А. Трапезникова РАН. 2023. С. 1002-1012.