Сценарное моделирование траекторий цифровой трансформации транспортно-логистической инфраструктуры пассажирского комплекса

Бронников Сергей Александрович
старший преподаватель кафедры, мировая экономика и логистика, Уральский государственный университет путей сообщения, 7sigma2007@mail.ru

Статья посвящена развитию инструментария прогнозной оценки цифровой трансформации пассажирского сегмента транспортно-логистической инфраструктуры. Отправной точкой послужила статическая методика, оперирующая общим индексом цифровизации и интегральным индексом её эффективности; настоящее исследование переводит эти показатели в динамический режим. Предложена сценарная модель, описывающая перемещение объекта оценки в координатном пространстве «уровень цифровизации — эффективность» на горизонте до 2030 года. Ядром модели выступает логистическая функция насыщения цифровизации, дополненная механизмом запаздывающего отклика эффектов на инвестиционные вложения. Сформированы три сценария — инерционный, базовый и интенсивный, различающиеся интенсивностью капиталовложений и скоростью интеграции цифровых решений. Апробация выполнена на условном примере пассажирского комплекса городского транспорта. Расчёты показали, что интенсивный сценарий обеспечивает переход объекта в зону устойчивого лидерства, тогда как инерционный ведёт к стагнации показателей и риску попадания в квадрант неэффективных вложений. Полученные результаты применимы при обосновании инвестиционных программ и корректировке региональных стратегий цифровой трансформации транспорта.

Ключевые слова: цифровая трансформация, пассажирский комплекс, транспортно-логистическая инфраструктура, сценарное моделирование, интегральный индекс цифровизации, траектория развития, прогнозирование, инвестиции.

Введение

Курс на цифровую перестройку отечественного транспорта закреплён на уровне государственной политики. Стратегическое направление трансформации отрасли до 2030 года определяет искусственный интеллект, интернет вещей, распределённые реестры и беспилотные технологии как опорные драйверы обновления [1]. Пассажирский сегмент оказывается здесь наиболее чувствительной зоной — именно через него граждане ежедневно соприкасаются с результатами внедрения новых решений.

Оценить достигнутый уровень цифровизации пассажирского комплекса и соотнести его с наблюдаемыми эффектами — эту задачу успешно решает существующая методика. Но есть у неё принципиальное ограничение: получаемая картина привязана к конкретному отчётному году, то есть представляет собой не более чем моментальный срез. Между тем управленческая практика запрашивает нечто иное — представление о том, в каком направлении будет смещаться объект при варьировании вложений и организационных решений. В этой связи и формулируется исследовательская задача: над статической оценкой требуется надстроить прогнозный контур, воспроизводящий траектории развития во времени.

Дефицит динамических инструментов, обращает на себя внимание, отмечался в литературе неоднократно. Сложившиеся подходы тяготеют к описанию текущего состояния — вопрос же о долгосрочных последствиях цифровизации остаётся, по всей видимости, слабо проработанным. Восполнить этот пробел и призвана настоящая работа. Её цель состоит в разработке сценарной модели траекторий цифровой трансформации транспортно-логистической инфраструктуры (ТЛИ) пассажирского комплекса — модели, которая опирается на динамику ранее обоснованных интегральных индексов.

1. Теоретические предпосылки и анализ источников

Множество аспектов, в которых разворачивается цифровизация транспорта, осмысляется в широком круге исследований. Так, концепция «Мобильность как услуга» — та, что сводит разрозненные виды перевозок к единому сервису по запросу, — обстоятельно раскрыта в работах по интеллектуальной мобильности умных городов [6]. Что касается национального измерения этих процессов, его очерчивает аналитика цифровой экономики страны: здесь приводятся сводные индикаторы проникновения цифровых технологий в отрасли, транспортную в том числе [9].

Иную, технологическую линию исследований отличает опора на аппарат количественного анализа. Есть основания полагать, что расчётные методы способны предсказывать отдачу от внедряемых решений ещё до момента их реализации, — это показывает оценка мероприятий транспортного планирования средствами математического моделирования [2]. Наконец, обзор приложений искусственного интеллекта на транспорте систематизирует те направления, где алгоритмическая оптимизация обеспечивает наибольший прирост пропускной способности [11].

Одной из отправных точек для базовой методики автора послужил методический подход, оценивающий эффективность цифровой трансформации инфраструктуры через сводный показатель [7]. Ограничение, впрочем, здесь то же, что и у большинства смежных подходов, — дело сводится к статической фиксации состояния. Обзор, таким образом, обнажает характерный разрыв. Арсенал средств измерения и объяснения цифровизации накоплен богатый; чего недостаёт — так это прогнозного, сценарно-ориентированного инструментария применительно к пассажирскому комплексу. Содержание последующих разделов и определяется, по существу, этим разрывом.

2. Методические основы динамизации индексов

В основе базовой методики — две сводные величины. Первая из них, общий индекс цифровизации (DI), агрегирует три блока: инфраструктурный, сервисный и организационно-управленческий. Вторая — интегральный индекс эффективности (EI); в нём собраны результаты экономические, социальные, экологические и технологические. Обе величины в статическом варианте рассчитываются на фиксированный момент через аддитивные свёртки:

$DI = \Sigma_{i=1..3} W_i \cdot I_i$, $EI = \Sigma_{m=1..4} v_m \cdot e_m$

где W_i и v_m — весовые коэффициенты блоков и групп эффектов;

I_i и e_m — нормированные значения соответствующих составляющих.

Логика нормирования и определения весов методом анализа иерархий заимствована из аппарата организационно-экономического моделирования [8].

Явное введение времени как переменной — вот что отличает переход к прогнозу. При таком переходе обе величины обращаются в функции DI(t) и EI(t), а объект оценки предстаёт уже не точкой, но траекторией в плоскости «уровень — эффективность». Здесь уместно оговориться: безграничным рост цифровизации не бывает — по мере насыщения инфраструктуры отдача каждого очередного вложения убывает. Это поведение хорошо передаёт логистическая кривая. Динамику блочного индекса зададим, соответственно, уравнением насыщения:

$I_i(t) = I_i^{max} / [\ 1 + ((I_i^{max} - I_i^0) / I_i^0) \cdot e^{-\alpha_i u_i (t - t_0)}\ ]$

где I_i^0 — стартовое значение блока в базовом году t_0;

I_i^{max} — предельно достижимый уровень (потолок насыщения);

α_i — коэффициент восприимчивости блока к вложениям;

u_i — интенсивность инвестиций в блок, задаваемая сценарием.

Особого внимания заслуживает связь вложений с эффектами. Мгновенной отдача от цифровизации не бывает: между внедрением решения и наблюдаемым результатом неизбежно проходит время. Именно этот лаг τ и вводится в уравнение эффективности — так, что эффект текущего периода оказывается обусловлен уровнем цифровизации периодов предшествующих:

$$EI(t) = \beta \cdot DI(t - \tau) + \gamma \cdot [DI(t - \tau)]^2 + \varepsilon$$

Синергетический прирост отражает квадратичное слагаемое. Дело в том, что интеграция решений в единую экосистему даёт, по эмпирическим оценкам, на 20–30 % большую отдачу в сравнении с изолированным внедрением [13]. Коэффициенты β и γ оцениваются регрессионно на ретроспективных данных, что согласуется с эконометрической традицией анализа цифровых факторов [10], а выделение значимых драйверов опирается на факторный аппарат [5]. Свободный член ε агрегирует внешние влияния, не связанные напрямую с цифровизацией.

Значение DI(t) на каждом шаге по-прежнему собирается из блочных индексов с сохранением исходных весов $W_1 = 0,35$, $W_2 = 0,40$, $W_3 = 0,25$, присвоенных инфраструктурному, сервисному и организационно-управленческому блокам соответственно.

3. Формирование сценариев

Сценарный подход предполагает, что будущее не единственно — оно ветвится в зависимости от управленческих решений. Различие сценариев концентрируется в двух параметрах: интенсивности вложений u_i и приоритетах их распределения между блоками. Ориентиры предельных уровней и темпов заимствованы из прогнозной аналитики отраслевого развития [14] и системы стратегических индикаторов цифрового суверенитета [4].

Инерционный сценарий исходит из сохранения сложившейся практики: финансирование поддерживается на минимальном уровне, приоритеты не пересматриваются. Цифровизация продолжается по инерции, преимущественно в сервисном блоке, где рыночные стимулы действуют сами по себе. Базовый сценарий предполагает умеренное наращивание вложений с частичным перераспределением в пользу отстающего организационно-управленческого блока. Целенаправленную стратегию описывает интенсивный сценарий: вложения здесь максимальны, приоритет отдан интеграции разрозненных систем, а управление на основе данных развивается опережающими темпами.

Параметры сценариев сведены в таблицу 1. Что до значений ui, то они нормированы на единичный максимум — и трактовать их следует как долю от предельно возможной интенсивности вложений в блок.

Таблица 1

Параметры интенсивности инвестиций по сценариям и блокам цифровизации

Блок цифровизации	Инерц. u_i	Базов. u_i	Интенс. u_i	Потолок I_i^{max}
Инфраструктурный	0,10	0,30	0,55	0,95
Сервисный	0,20	0,35	0,50	0,98
Организационно-управленческий	0,08	0,40	0,65	0,92

Источник: составлено автором на основе стратегических ориентиров [4; 14].

Числовые параметры внешне однотипны — но за этой однотипностью кроется принципиальное расхождение управленческих философий. Три сформированных сценария задают, по сути, не просто разные объёмы финансирования, а несовпадающие логики распределения ресурсов между блоками. Сложившуюся структуру вложений консервирует инерционный вариант; базовый — вводит адресную поддержку отстающего организационно-управленческого блока; интенсивный же подчиняет всё распределение задаче сквозной интеграции систем. Что касается заданных в таблице 1 параметров ui и потолков насыщения Iimax, то они служат исходными данными для описанного выше расчётного аппарата — а тем самым позволяют перейти от качественного описания сценариев к количественной оценке порождаемых ими траекторий.

4. Апробация модели на примере городского пассажирского комплекса

Отправными данными послужили результаты базовой оценки условного пассажирского комплекса крупного города (Город N) за 2024 год. Стартовые значения блоков составили: инфраструктурный $I_1^0 = 0,65$, сервисный $I_2^0 = 0,78$, организационно-управленческий $I_3^0 = 0,52$; соответствующий им общий индекс — DI(2024) = 0,670, интегральный индекс эффективности — EI(2024) = 0,625. Такое положение отвечает первому квадранту матрицы «уровень — эффективность», но с близостью к границе зоны высокого потенциала.

Коэффициенты восприимчивости приняты по блокам как $\alpha_1 = 0,45$, $\alpha_2 = 0,35$, $\alpha_3 = 0,55$ — организационно-управленческий блок отзывчивее прочих, поскольку стартует с низкой базы и располагает наибольшим резервом. Параметры уравнения эффективности получили следующие оценки: $\beta = 0,78$, $\gamma = 0,18$ при лаге $\tau = 1$ год. Годичное запаздывание выбрано не произвольно — оно согласуется с той задержкой проявления эффектов, что наблюдается в региональной практике [3]. Для расчетов был выбран период за 2024–2030 гг.

Прогнозные же траектории общего индекса цифровизации — по всем трём сценариям — представлены в таблице 2.

Таблица 2

Прогнозная динамика общего индекса цифровизации DI(t) по сценариям

Сценарий	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Инерционный	0,670	0,679	0,687	0,694	0,701	0,707	0,712
Базовый	0,670	0,705	0,738	0,767	0,792	0,813	0,831
Интенсивный	0,670	0,728	0,781	0,826	0,862	0,889	0,910

Источник: рассчитано автором.

Динамику интегрального индекса эффективности, соответствующую этим траекториям, приводит таблица 3; получена она через уравнение запаздывающего отклика. Значения за 2024 год совпадают, что примечательно, со стартовыми — отклик же на изменение вложений обнаруживает себя лишь начиная с 2025 года.

Таблица 3

Прогнозная динамика интегрального индекса эффективности EI(t) по сценариям

Сценарий	**2024**	**2025**	**2026**	**2027**	**2028**	**2029**	**2030**
Инерционный	0,625	0,631	0,638	0,644	0,650	0,655	0,660
Базовый	0,625	0,652	0,689	0,724	0,755	0,781	0,803
Интенсивный	0,625	0,671	0,724	0,773	0,816	0,851	0,879

Источник: рассчитано автором.

Совмещение обеих координат дает траектории движения объекта по матрице — их графическую интерпретацию представляет рисунок 1. Каждая линия здесь соединяет положения Города N за последовательные годы; квадранты же сохраняют тот смысл, что был закреплен за ними в исходной матрице «уровень цифровизации — эффективность».

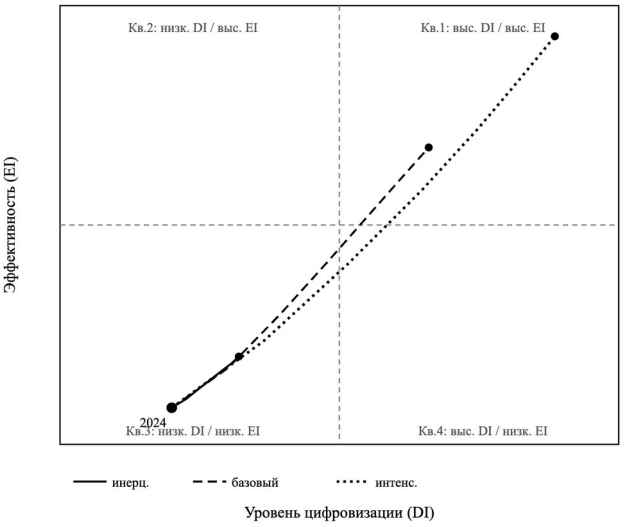


Рис. 1. Прогнозные траектории движения пассажирского комплекса Города N по матрице «уровень цифровизации — эффективность», 2024–2030 гг.
Источник: построено автором по данным таблиц 2 и 3

Работоспособность предложенного инструментария расчёты подтвердили: динамизированные индексы DI(t) и EI(t) воспроизвели содержательно различимые траектории движения объекта по матрице, тогда как заложенные механизмы — насыщения и запаздывающего отклика — сообщили этим траекториям реалистичный характер. Ключевая закономерность проступает уже на уровне числовых результатов: с расширением горизонта прогноза расхождение сценариев нарастает, причём определяется оно не столько абсолютным объёмом вложений, сколько их адресностью. Содержательная же интерпретация полученных траекторий — равно как и вытекающие отсюда управленческие выводы — раскрывается далее.

5. Результаты и обсуждение

Чем дальше отодвигается горизонт прогноза, тем ощутимее расходятся траектории — и расхождение это содержательно. Инерционное развитие оставляет объект почти неподвижным: за семь лет DI прибавляет лишь около 0,04, EI — порядка 0,035. Город N, если судить формально, удерживается в первом квадранте; вот только движется он вдоль нижней границы этого квадранта, а стало быть, при неблагоприятной внешней конъюнктуре рискует соскользнуть в область неэффективных вложений. Отказ от активной

политики, выходит, достигнутого не консервирует — он это достигнутое медленно обесценивает.

Базовый сценарий выводит объект в устойчивую зону первого квадранта: к 2030 году DI достигает 0,831 при EI порядка 0,803. Срабатывает здесь перераспределение вложений в пользу организационно-управленческого блока — того звена, которое в исходной оценке и оказалось наиболее слабым. Основной прирост совокупной эффективности дает, примечательно, именно его подтягивание, а вовсе не дальнейшее усиление сервисного блока, развитого и без того. Продуктивность управления на основе данных — того, что свойственно зрелым моделям интеллектуальной мобильности, — этим наблюдением, по всей видимости, и подтверждается [6].

Наибольший размах демонстрирует интенсивный сценарий — он же, впрочем, обнажает и границы модели. Ближе к концу горизонта блочные индексы подступают к своим потолкам, и логистическая природа роста берет свое: темпы прироста идут на убыль. За пределами 2030 года дальнейшие вложения, есть основания полагать, станут давать все меньшую отдачу — а это ставит вопрос о разумном пределе интенсификации. Что до экологической составляющей, то она, стартовав с самого низкого значения, при интенсивном варианте обнаруживает опережающую динамику; тут сказывается эффект оптимизации маршрутов и расписаний.

Из сопоставления сценариев выводится практический ориентир. Сосредоточена наибольшая управленческая ценность не в максимизации вложений как таковой, а в адресном их направлении на отстающие блоки — при одновременном контроле за приближением к потолку насыщения. Ограничения же предложенного инструмента обозначим прямо. Коэффициенты восприимчивости, равно как и параметры уравнения эффективности, оценены на ограниченной ретроспективе; потолки насыщения — заданы экспертно. Модель, сверх того, оставляет за скобками возможные технологические скачки, то есть появление решений, сдвигающих сами потолки вверх, — хотя реальность подобных сдвигов обзор приложений искусственного интеллекта, по всей видимости, подтверждает [11].

Заключение

Прогнозный контур — вот что настоящее исследование надстроило над статической методикой оценки цифровизации пассажирского комплекса. Главным результатом стала сценарная модель: динамизация ранее обоснованных индексов DI и EI позволила ей воспроизводить траектории движения объекта в координатах «уровень цифровизации — эффективность». Реалистичное поведение системы — с убывающей отдачей и временным лагом — удалось описать благодаря логистической функции насыщения, соединенной с механизмом запаздывающего отклика эффектов.

Апробация на примере условного городского комплекса обнаружила примечательную вещь: выбор инвестиционной стратегии предопределяет не столько скорость развития, сколько само его направление. Инерционный путь оборачивается стагнацией и накоплением рисков; базовый — обеспечивает устойчивый прогресс за счет адресной поддержки отстающих блоков; интенсивный же максимизирует результат, но упирается в пределы насыщения. Во всех активных сценариях наибольший прирост совокупной эффективности дает развитие организационно-управленческого блока — и вывод этот наделен прямым прикладным значением.

Перспективы дальнейшей работы видятся в трёх направлениях: проведении анализа чувствительности к параметрам модели, дифференциации сценариев по видам транспорта и типам поселений, а также в интеграции инструмента с существующими системами управления инфраструктурой. Реализация этих шагов, опирающаяся на модели цифровой зрелости логистики [15] и организационно-экономический аппарат [8], позволит превратить предложенную модель в полноценный элемент поддержки инвестиционных и стратегических решений.

Литература

1. Распоряжение Правительства РФ от 27.12.2021 № 3915-р «Об утверждении стратегического направления в области цифровой трансформации транспортной отрасли Российской Федерации до 2030 года» // Собрание законодательства РФ. 2022. № 2. Ст. 501.
2. Ахромешин А. В., Пышный В. А., Севостьянов А. Л. Оценка эффективности внедрения мероприятий документов транспортного планирования с помощью математического моделирования // Грузовик. 2025. № 1. С. 43–47.
3. Булатова Н. Н., Перминов Н. Н., Якимов А. И. Современное состояние и перспективы развития региональной транспортно-логистической инфраструктуры в условиях цифровизации // Экономический вестник ВСГУТУ. 2025. № 1 (19). С. 20–27.
4. Демидов А. В. Система показателей достижения целей технологического и цифрового суверенитета в рамках актуализируемой транспортной стратегии // Цифровая трансформация в экономике транспортного комплекса: сб. науч. тр. VI междунар. науч.-практ. конф. М., 2025. С. 27–31.
5. Ефимова О. В., Кабанова Т. А. Применение метода факторного анализа для оценки основных параметров, влияющих на экономическую эффективность цифровых сервисов // Цифровая трансформация в экономике транспортного комплекса: сб. науч. тр. VI междунар. науч.-практ. конф. М., 2025. С. 155–160.
6. Куприяновский В.П., Акимов А.В., Покусаев О.Н., Аленьков В.В., Намиот Д.Е., Синягов С.А. Интеллектуальная мобильность и мобильность как услуга в умных городах // International journal of open information technologies. 2012. Т. 5. № 12. С. 77-122.
7. Хорошевич А. А. Методика оценки уровня цифровой трансформации транспортной отрасли // Веснік Беларускага дзяржаўнага эканамічнага ўніверсітэта. 2023. № 5. С. 15-21.
8. Орлов А. И. Организационно-экономическое моделирование: теория принятия решений. М.: Кнорус, 2018. 568 с.
9. Федюков В.Э. Цифровая экономика: анализ развития в российской федерации / приоритетные направления развития экономики страны в условиях глобализации: теория и практика // Материалы всероссийской научно-практической конференции. Новороссийск, 2021. С. 530-532.
10. Федорова Е. А., Коркмазова Б. К., Муратов М. А. Оценка влияния цифровизации на эффективность транспортных компаний: эконометрический анализ // Управленческие науки. 2023. Т. 13, № 1. С. 6–19.
11. Abduljabbar R., Dia H., Liyanage S., Bagloee S. Applications of Artificial Intelligence in Transport: An Overview // Sustainability. 2022. Vol. 14, № 3. P. 1–23.
12. European Commission. Digital Transport and Logistics Forum (DTLF): Final Report. Brussels: European Commission, 2023. 124 p.
13. International Transport Forum. Transport Outlook 2023. Paris: OECD Publishing, 2023. 280 p.
14. World Bank. Digital Logistics Maturity Model: A Guide for Developing Countries. Washington, DC: World Bank, 2023. 96 p.

Scenario modeling of digital transformation trajectories of the transport and logistics infrastructure of the passenger complex

Bronnikov S.A.
Ural State University of Railway Transport

JEL classification: C01, C02, C1, C4, C5, C6, C8

The paper develops a forecasting toolkit for assessing the digital transformation of the passenger segment of transport and logistics infrastructure. The starting point is a static methodology operating with an aggregate digitalization index and an integral index of its efficiency; the present study converts these indicators into a dynamic mode. A scenario model is proposed that describes the movement of the assessed object within the coordinate space "level of digitalization — efficiency" over the horizon up to 2030. The core of the model is a logistic saturation function of digitalization, supplemented by a mechanism of delayed response of effects to investment inflows. Three scenarios are formed — inertial, baseline and intensive — differing in the intensity of investment and the pace of integration of digital solutions. Testing was carried out on a conditional example of the urban passenger transport complex. The calculations demonstrated that the intensive scenario ensures the transition of the object into the zone of sustainable leadership, whereas the inertial one leads to stagnation and the risk of falling into the quadrant of inefficient investment. The results obtained are applicable in substantiating investment programs and adjusting regional strategies for the digital transformation of transport.

Keywords: digital transformation, passenger complex, transport and logistics infrastructure, scenario modeling, integral digitalization index, development trajectory, forecasting, investment.

References

1. Decree of the Government of the Russian Federation No. 3915-r of 27.12.2021 "On the Approval of the Strategic Direction in the Field of Digital Transformation of the Transport Industry of the Russian Federation until 2030". Sobranie zakonodatelstva RF, 2022, № 2, art. 501. (In Russ.)
2. Akhromeshin A. V., Pyshnyy V. A., Sevostyanov A. L. Assessing the effectiveness of implementing transport planning measures using mathematical modeling. Gruzovik, 2025, № 1, P. 43–47. (In Russ.)
3. Bulatova N. N., Perminov N. N., Yakimov A. I. Current state and prospects for the development of regional transport and logistics infrastructure under digitalization. Ekonomicheskiy vestnik VSGUTU, 2025, № 1 (19), P. 20–27. (In Russ.)
4. Demidov A. V. A system of indicators for achieving the goals of technological and digital sovereignty within the updated transport strategy. In: Digital Transformation in the Economy of the Transport Complex. Moscow, 2025, P. 27–31. (In Russ.)
5. Efimova O. V., Kabanova T. A. Application of factor analysis to assess the main parameters affecting the economic efficiency of digital services. In: Digital Transformation in the Economy of the Transport Complex. Moscow, 2025, P. 155–160. (In Russ.)
6. Kupriyanovsky V.P., Akimov A.V., Pokusaev O.N., Alenkov V.V., Namiot D.E., Sinyagov S.A. Intellectual mobility and mobility as a service in smart cities//International journal of open information technologies. 2012. VOL. 5. № 12. P. 77-122 (In Russ.).
7. Khoroshevich A. A. Methodology for assessing the level of digital transformation of the transport industry//Vesnik Belaruskaga dzyarzhaқnaga ekanamichnaga ў niversi teta. 2023. № 5. P. 15-21 (In Russ.).
8. Orlov A.I. Organizational and economic modeling: decision theory. M.: Knorus, 2018. 568 p. (In Russ.)
9. Fedyukov V.E. Digital economy: analysis of development in the Russian federation/priority areas of development of the country's economy in the context of globalization: theory and practice//Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference. Novorossiysk, 2021. P. 530-532 (In Russ.).
10. Fedorova E. A., Korkmazova B. K., Muratov M. A. Assessing the impact of digitalization on the efficiency of transport companies: an econometric analysis. Upravlencheskie nauki, 2023, vol. 13, № 1, pp. 6–19. (In Russ.)
11. Abduljabbar R., Dia H., Liyanage S., Bagloee S. Applications of Artificial Intelligence in Transport: An Overview. Sustainability, 2022, vol. 14, № 3, P. 1–23.
12. European Commission. Digital Transport and Logistics Forum (DTLF): Final Report. Brussels, European Commission, 2023. 124 p.
13. International Transport Forum. Transport Outlook 2023. Paris, OECD Publishing, 2023. 280 p.
14. World Bank. Digital Logistics Maturity Model: A Guide for Developing Countries. Washington, DC, World Bank, 2023. 96 p.