

УДК ...

ББК ...

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
УЧАСТНИКОВ ПЕРЕГОВОРОВ ПО
ФОРМИРОВАНИЮ ГОСУДАРСТВЕННО-ЧАСТНОГО
ПАРТНЕРСТВА ДЛЯ
РАЗРАБОТКИ/МОДЕРНИЗАЦИИ РЕГИОНАЛЬНОЙ
ИНФРАСТРУКТУРЫ ГРУЗОВЫХ ПЕРЕВОЗОК**

Беленький А.С.¹,

*(Национальный Исследовательский Университет
Высшая Школа Экономики, Москва)*

Корнхаузер А.Л.²

(Принстонский Университет, Принстон)

Федин Г.Г.³,

*(Национальный Исследовательский Университет
Высшая Школа Экономики, Москва)*

¹ Александр Соломонович Беленький, доктор технических наук, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник (Международная научно-учебная лаборатория анализа и выбора решений, НИУ ВШЭ), ординарный профессор (НИУ ВШЭ) (abelenky@hse.ru).

² Алан Корнхаузер, Ph.D., профессор (Центр исследования операций и финансовой инженерии, Princeton University) (alaink@princeton.edu).

³ Геннадий Геннадьевич Федин, аспирант (Аспирантская школа компьютерных наук, НИУ ВШЭ), стажер-исследователь (Международная научно-учебная лаборатория анализа и выбора решений, НИУ ВШЭ) (gfedin@hse.ru).

Предлагается подход к моделированию взаимодействия между администрацией региона страны и частными инвесторами по вопросам финансирования разработки/модернизации инфраструктуры грузовых перевозок в регионе на основе оценки сторонами необходимого для этого объема частных инвестиций. Количественные оценки требуемого общего объема инвестиций и дохода, который, как ожидается, будет генерироваться в результате функционирования этой инфраструктуры, являются ключевой информацией в переговорах с частными инвесторами по формированию потенциального государственно-частного партнерства для совместного финансирования разработки/модернизации региональной транспортной инфраструктуры государством и частным сектором. В статье предлагается система поддержки принятия решений с целью получения таких количественных оценок требуемого объема частных инвестиций и дохода, реализующая предложенный подход, и обсуждается ее структура.

Ключевые слова: билинейные функции векторных аргументов, инвестиции в инфраструктуру грузовых перевозок региона, минимаксная задача с линейными ограничениями, смешанное математическое программирование, государственно-частное партнерство, транспортные узлы и подъездные пути к ним.

1. Введение.

Крупномасштабные инженерные проекты, такие как модернизация существующей транспортной инфраструктуры и/или разработка новой транспортной инфраструктуры региона, требуют значительных инвестиций, которые федеральные и региональные органы власти, как правило, не могут обеспечить в полном объеме. В этом случае, формирование партнерства с частным сектором, например, государственно-частного партнерства и/или подписание концессионных соглашений для выполнения этих проектов является одним из возможных стратегических решений, которые могут быть рассмотрены региональными властями.

ми.

Предполагая, что юридические и финансовые условия, которые могут быть предложены потенциальным частным партнерам, являются для этих партнеров приемлемыми, региональные и/или федеральные власти должны оценить а) объем инвестиций, который, по их мнению, необходим для выполнения конкретного проекта, б) объем дохода, который реализованный на практике проект сможет генерировать в любом конкретном периоде планировании.

В проектах по разработке/модернизации инфраструктуры региональных грузовых перевозок, создание набора новых грузовых транспортных узлов с ведущими к ним дорогами и подъездными путями является одной из двух ключевых частей проекта, которую региональные администрации могут предлагать для совместного финансирования своим потенциальным партнерам из частного сектора. Другая ключевая часть проекта связана с построением эффективной системы управления таким образом модернизированной транспортной инфраструктурой. Еще одна ключевая часть проекта состоит в модернизации существующего парка транспортных средств путем приобретения новых транспортных средств, по крайней мере, для некоторых схем грузовых перевозок.

Только первые две из указанных трех частей потенциального проекта по разработке/модернизации региональной инфраструктуры грузовых перевозок—включающие строительные и инженерные работы, связанные со созданием грузовых транспортных узлов и подъездных путей к ним, и работы по созданию систем управления этими элементами транспортной инфраструктуры региона—являются предметами рассмотрения в настоящей статье.

По мере развития экономики любой страны и роста объемов транспортных потоков через ее регионы, создание новых грузовых транспортных узлов и подъездных путей к ним, а также систем управления этими элементами транспортной инфраструктуры в части грузовых перевозок как каждого конкретного региона страны, так и всей страны в целом, становится неизбеж-

ным. Однако, при отсутствии возможности финансирования соответствующих проектов как правительством страны, так и региональными администрациями в полном объеме даже совместно, необходимо вести переговоры с частными инвесторами о юридических и финансовых условиях их участия в финансировании этих проектов. Требуемый объем финансирования проекта по развитию/модернизации инфраструктуры грузового транспорта конкретного региона существенно зависит от а) выбранного местоположения и мощности новых грузовых транспортных узлов в этом регионе, б) типов и мощностей подъездных путей к ним, в) перераспределения грузопотоков среди всех грузовых транспортных узлов транспортной сети региона. Применение математических методов и компьютерных систем для анализа и решения инвестиционных проблем, в частности, проблем а)-в), связанных с развитием/модернизацией региональной инфраструктуры грузовых перевозок, требует разработки соответствующих математических моделей, обладающих определенными специфическими особенностями. Системы поддержки принятия решений на основе таких моделей могут помочь администрации региона как оценивать расходы, связанные с реализацией проекта, так и вести переговоры с частными инвесторами о юридических и финансовых условиях их участия в совместном финансировании проекта.

Идея построения такого рода системы и ее структура предложены авторами в [6]. Одна из целей настоящей статьи состоит в том, чтобы показать как эта идея может быть воплощена на практике при условии, что существующие средства количественного анализа правильно выбраны и разумно применяются. В частности, в статье приводится математическая модель, лежащая в основе системы поддержки принятия решений для оценки необходимого объема инвестиций в проекты, связанные с развитием/модернизацией инфраструктуры региональных грузовых перевозок. Такая оценка позволяет администрации региона начать конструктивные переговоры с потенциальными инвесторами из частного сектора по совместному финансированию конкретных проектов в этой сфере.

Рассмотренная в настоящей статье математическая модель является обобщением модели, структура которой предложена в [2]. Эта модель отражает правовые, технические и финансовые возможности региональной администрации по предложению частному сектору делового сотрудничества в рамках, например, потенциального государственно-частного партнерства. На основе предложенной в настоящей статье математической модели, задача отыскания количественной оценки затрат, связанных с реализацией проекта по развитию/модернизации инфраструктуры региональных грузовых перевозок, формулируется в виде задачи математического программирования. Эта задача может быть решена средствами стандартного программного обеспечения для решения задач оптимизации даже в том случае, когда все исходные данные, отражающие географию соответствующего региона, или какая-либо их часть известны лишь приближенно. Такая неопределенность отражает реальные условия региона, в рамках которых региональная администрация стремится оценивать вышеупомянутые расходы.

Помимо Введения, статья содержит еще пять разделов. В разделе 2 приводится а) содержательная постановка рассматриваемой в статье проблемы в двух ситуациях, в зависимости от предположений о том, какая информация доступна региональным властям при формализации этой проблемы, б) краткий обзор работ по проблемам государственно-частного партнерства, связанным с развитием/модернизацией инфраструктуры грузовых региональных перевозок, близким по постановке к проблеме, рассматриваемой в настоящей статье. Раздел 3 содержит два варианта математических формулировок задач, составляющих предмет рассмотрения настоящей статьи. Первый вариант формулировки представляет собой обычную задачу оптимизации с известными коэффициентами целевой функции. Второй вариант формулировки рассматривает задачу оптимизации в робастной (минимаксной) постановке, в рамках которой все коэффициенты целевой функции являются переменными. В этом случае наилучшая стратегия региональной администрации по формированию государственно-

частного партнерства ищется для «наихудшего сценария» сочетания неопределенных значений входных данных. В разделе 4 показано как свести минимаксную задачу нахождения наилучшей стратегии региональной администрации при указанном «наихудшем сценарии» к задаче смешанного математического программирования с линейными ограничениями, которая может быть решена средствами стандартного программного обеспечения. В разделе 5 кратко обсуждаются результаты проведенных авторами исследований, отраженные в статье, а раздел 6 содержит заключительные замечания.

2. Содержательная постановка рассматриваемой проблемы и краткий обзор публикаций по близким к ней проблемам.

В географическом регионе страны известны а) ожидаемый спрос на транспортные услуги грузового транспорта в каждом фрагменте региона в течение какого-либо периода планирования, б) структура существующей транспортной сети региона, включая мощности действующих грузовых транспортных узлов и пропускные способности подъездных путей к ним, а также виды грузового транспорта, которые функционируют или (потенциально) могут функционировать в каждом из этих узлов, в) ожидаемая стоимость всех типов строительных работ, связанных с развитием/модификацией транспортной системы региона, г) ожидаемая стоимость грузовых транспортных операций всех видов в регионе.

Требуется, найти

– оптимальное (с точки зрения региональной администрации) расположение новых грузовых транспортных узлов для удовлетворения ожидаемого спроса на транспортные услуги в регионе (за счет строительства новых грузовых транспортных узлов и подъездных путей к ним),

– оптимальный объем общих расходов, связанных со строительными и инженерными работами, необходимыми для создания новых грузовых транспортных узлов в выбранных (опти-

мальных) местах и подъездных путей к ним,

– максимально возможный объем доходов, которые предполагается получить от функционирования модернизированной таким образом региональной транспортной инфраструктуры для грузовых перевозок в течении любого горизонта планирования, который представляет интерес для администрации региона.

Рассматриваются две ситуации.

Ситуация 1.

Случай А. Администрации региона известно значение общего спроса на транспортные услуги в каждом пункте транспортной сети региона в течение любого периода планирования, представляющего интерес для администрации региона. Также, известны а) стоимости строительных и инженерных работ, связанных с созданием новых грузовых транспортных узлов и подъездных путей к ним, б) стоимости транспортировки грузов от отправителей к получателям через грузовые транспортные узлы (как уже существующие, так и те, которые будут построены), в) стоимости содержания и обслуживания грузовых транспортных узлов и подъездных путей к ним.

Случай Б. Администрации региона известны лишь интервалы возможных значений а) спроса на транспортные услуги в каждом пункте транспортной сети региона, б) суммарного спроса на транспортные услуги в регионе. В то же время, все остальные указанные выше значения издержек (стоимостей строительства новых грузовых транспортных узлов и подъездных путей к ним, стоимостей транспортировки грузов в регионе, стоимостей содержания и обслуживания региональной инфраструктуры грузового транспорта) являются известными величинами, как и в *Случае А.*

Ситуация 2. Администрации региона известны только интервалы значений всех параметров перечисленных в *Ситуации 1.*

В обоих случаях *Ситуации 1*, региональная администрация пытается минимизировать затраты связанные а) со строительством новых грузовых транспортных узлов и подъездных путей к ним, и б) с содержанием существующей и новой транспорт-

ной инфраструктуры. Потенциально, региональная администрация может разделить эти затраты с частным бизнесом в рамках государственно-частного партнерства. При этом администрация региона может вносить свой финансовый вклад в это потенциальное партнерство в виде налогов, которые будут поступать в региональный бюджет от транспортных компаний, использующих грузовые транспортные узлы и подъездные пути к ним в качестве элементов (новой) региональной транспортной инфраструктуры грузовых перевозок. Альтернативно, региональная администрация может предоставить частным инвесторам лицензию, дающую им право на получение прибыли от оказания транспортных услуг грузовладельцам и грузополучателям (возможность получения которой должна быть оценена обоими участниками партнерства) с последующей уплатой ими (инвесторами) части этих налогов в региональный бюджет. В обоих вариантах участия администрации в финансировании проекта, связанного с развитием/модернизацией транспортной инфраструктуры региона, общая сумма затрат на финансирование (которая уменьшается на сумму дохода, получаемого в виде вышеупомянутых налогов) должна быть минимизирована.

В *Ситуации 2* администрация региона по-прежнему пытается минимизировать разность между указанными выше затратами и ожидаемым доходом, которая будет получен в виде вышеупомянутых региональных налогов. Однако, в *Ситуации 2* известны лишь диапазоны изменения значений всех затрат, перечисленных в *Ситуации 1*.

Замечание 1.

При рассмотрении обеих ситуаций следует иметь ввиду следующие три соображения.

- 1) Все оценки и расчеты региональной администрации при решении задачи развития/модернизации региональной транспортной инфраструктуры грузовых перевозок, обычно, делаются для определенного горизонта планирования, например, на несколько лет, начиная с момента, когда все новые объекты этой инфраструктуры будут введены в эксплуата-

цию. Строительство новых объектов транспортной инфраструктуры может занимать различное время в зависимости от характеристик и особенностей региона.

- 2) Прибыль, которая, как ожидается, будет получена от функционирования региональной транспортной инфраструктуры грузовых перевозок, будет поступать ежегодно с момента начала ввода в эксплуатацию всех новых объектов этой инфраструктуры. Напротив, издержки, связанные со строительством этих новых объектов, должны быть покрыты только однократно, и только издержки на обслуживание новых и существующих объектов рассматриваемой региональной транспортной инфраструктуры должны учитываться на ежегодной основе.
- 3) При проведении количественных расчетов следует помнить о сопоставимости количественных значений параметров математической модели. Необходимо быть уверенными в том, что эти значения берутся за одинаковые периоды времени (за год, за несколько лет, за десятилетие, и т. д.), исходя из того, что мощности как новых, так и существующих грузовых транспортных узлов и подъездных путей к ним, как правило, являются значениями, рассчитываемыми на год.

Задачи, близкие по постановке к сформулированным выше задачам активно рассматриваются в научной литературе. Ниже приводится краткий обзор таких задач и результатов их исследования и/или решения. Подробный обзор публикаций, в которых рассматриваются задачи близкие по постановке к задачам, являющимся предметом исследования в настоящей статье, включая работы, входящие в представленный ниже краткий обзор, приведен авторами в [6].

Математическая модель для анализа инвестиционных проектов государственно-частного партнерства в транспортной сфере, в которых доля полученной выручки возвращается горожанам,

владеющим городской инфраструктурой, управляемой в рамках государственно-частного партнерства, предложена в работе [25]. Представленная в ней модель позволяет оценить преимущества и издержки от использования такого инвестиционного подхода для модернизации городской транспортной сети с точки зрения общественной полезности указанной модернизации, с учетом всех основных заинтересованных физических и юридических лиц — жителей, пользователей транспортной сети, государства и бизнеса. В работе [16] содержится предположение, о том, что такой подход может увеличить общественную поддержку введения платы за проезд на уже существующих дорогах.

На примере развития инфраструктуры порта, авторы работы [10] использовали многофакторный анализ для выявления факторов, наиболее сильно влияющих на успех реализации проектов государственно-частного партнерства. Основываясь на результатах нескольких исследований, к числу таких факторов авторы относят а) четкость и ясность концессионных соглашений, б) разумное разделение рисков, в) возможность технической реализации проекта, г) обязательства, взятые на себя сторонами-участниками партнерства, д) привлекательность финансовых условий, е) четкое распределение обязательств, ж) присутствие сильного частного консорциума и) реалистичность оценки стоимости и прибыли проекта. На основе эмпирического анализа, авторы работы [24] выделили а) наличие регуляторов, б) открытость рынка, в) простоту начала бизнеса, г) принудительность контракта в качестве ключевых институциональных детерминант проекта развития инфраструктуры порта и оценили их влияние на эффективность государственно-частного партнерства, создаваемого для реализации проекта.

Теоретико-игровой подход для решения задачи определения стоимости проезда по платным дорогам, принадлежащим государственно-частному партнерству, предложен в работе [27]. В ней рассматриваются два типа игроков: а) индивидуальные пользователи, каждый из которых стремится минимизировать свои издержки, б) транспортные компании, кооперирующиеся

между собой с целью минимизации суммарных издержек. Предложенный подход позволяет определять стоимости проезда по платным дорогам при транспортных потоках, являющихся оптимальными для обоих типов игроков. В работе [27] также содержится анализ других работ, рассматривающих задачу определения стоимости проезда: а) работы [28], в которой ее авторы рассмотрели систему определения стоимости проезда, которая поддерживала бы заданный уровень социальных благ, б) работы [26], в которой ее авторы рассмотрели задачу определения стоимости проезда в условиях неопределенного спроса на услуги транспортной инфраструктуры, в) работы [31], в которой ее авторы рассмотрели систему определения стоимости проезда, учитывающую объем выхлопных газов (определение стоимости проезда, взимаемой за возможность ездить внутри определённой зоны), г) работы [18], в которой ее авторы модифицировали модель из работы [31] с тем, чтобы учесть влияние времени в пути и времени, потраченного на парковку внутри выделенной зоны, на размер стоимости проезда д) работы [30], в которой ее авторы предложили рассматривать стоимости проезда как параметры в игре и определять оптимальные стоимости на основе отыскания равновесия в игре – как это было сделано в работе [27], где учитывался стохастический характер функций выигрыша игроков, и в работе [19], где рассматривалась задача определения стоимостей проезда исходя из объема выхлопных газов из автомобиля и анализировалось стохастическое равновесие для гетерогенных пользователей.

В работе [32] авторы использовали теоретико-игровой подход для анализа влияния налоговой политики государства на желание частных инвесторов инвестировать в транспортную инфраструктуру. В работе [13] авторы использовали теоретико-игровой подход для анализа возможностей государственно-частного партнерства в управлении пригородными железнодорожными пассажирскими перевозками в России. Этот подход использовался в работе [12] при анализе идеи дерегулирования в сфере общественного транспорта путем передачи некоторых регулирующих

функций государственно-частному партнерству. Эта идея представляет определенный теоретический интерес с точки зрения сравнения альтернативных организационных структур предприятий в секторе общественного транспорта. Предложенный в работе [13] подход был применен для анализа эффективности реформы пригородного железнодорожного транспорта в России.

В работе [5] рассматриваются модели в виде игр трёх лиц, в которых государство, инвестор и разработчик проекта (или нескольких проектов) взаимодействуют в попытке найти взаимоприемлемые условия партнерства. В этих моделях игроки исходят из а) минимального объема инвестиций, необходимого для каждого проекта с точки зрения государства, б) объема инвестиций, которые государство может позволить себе выделить на проект, в) стоимости реализации проекта разработчиком, г) объема инвестиций, которые инвестор может инвестировать в проект, д) некоторых других финансовых факторов. Для такого типа игр при линейных ограничениях, описывающих набор стратегий для каждого игрока, установлены необходимые и достаточные условия существования равновесий. Эти условия позволяют находить равновесия в рассматриваемой задаче путем решения задач линейного программирования, образующих двойственную пару.

Организационные проблемы, связанные с формированием государственно-частного партнерства для индийских сухих (внутренних) портов, исследуются в работе [17]. По мнению авторов, к числу основных препятствий в этой области относятся избыточная пропускная способность портов, ограничительная ценовая политика и слабая правовая база для формирования и функционирования государственно-частного партнерства. В работе [9] рассматриваются аналогичные проблемы для портов Испании, где основными препятствиями для государственно-частного партнерства в этой области, по мнению авторов этой работы, являются а) ненадлежащее распределение рисков в тендерных процессах, б) отсутствие предсказанного спроса на услуги, в) опасения государства, связанные с превращением транспортного предприятия в монополию.

Проблемы развития транспортной инфраструктуры страны через проекты государственно-частного партнерства в контексте экономического регулирования рассматриваются в работе [11]. Авторы этой работы предлагают учитывать три показателя эффективности: а) динамическую эффективность (определяющую всегда ли общественная полезность проекта превышает издержки передачи транспортной инфраструктуры в управление частному бизнесу), б) эффективность использования транспортной инфраструктуры (определяющую позволяет ли взимание платы за пользование транспортной инфраструктурой эффективнее использовать возможности этой инфраструктуры), в) операционную эффективность (определяющую как использование конкретной транспортной инфраструктуры влияет на стоимость перевозок в охватываемой ею регионе).

В работе [14] проанализировано в какой степени и каким образом экономическое и политическое окружение конкретной страны (в основном, наличие в ней коррупции и демократии) могут способствовать успеху государственно-частного партнерства в сфере развития транспортной инфраструктуры.

Следует отметить, что большинство публикаций, касающихся проблем государственно-частного партнерства в области транспорта, имеют общий характер и в них не применяются методы количественного анализа для изучения этих проблем. Хотя существуют публикации, например, [14], в которых для взаимодействия государственного и частного секторов предлагаются математические модели, связанные с формированием государственно-частного партнерства и анализом их эффективности не обязательно только в транспортной сфере. Однако ни одна из таких работ не учитывает специфику процесса оказания транспортных услуг, и по этой причине они не рассматриваются в представленном кратком обзоре.

Представленный краткий обзор показывает, что проблемы близкие к проблемам, рассматриваемым в настоящей работе, активно исследуются с применением различных подходов и методик. Однако, авторами не было найдено работ, результаты кото-

рых могли бы быть непосредственно использованы для количественного анализа и принятия решений, связанных с формированием государственно-частного партнерства в проектах развития/модернизации региональных грузовых транспортных систем.

3. Математические формулировки рассматриваемых задач.

Пусть

M – число клиентов (пунктов) в транспортной системе рассматриваемого региона, для каждого из которых могут существовать исходящие (из него) и входящие (в него) транспортные потоки;

N^{new} – число мест, рассматриваемых администрацией региона как пункты для размещения в них новых транспортных узлов;

N^{exist} – число существующих транспортных узлов в регионе;

s_j – ожидаемый годовой спрос на транспортные услуги в пункте j транспортной сети (суммарный грузопоток из пункта j до грузовых транспортных узлов в новой транспортной сети и от всех этих узлов до пункта j), $j \in \overline{1, M}$;

s_j^{min} – ожидаемый минимальный годовой спрос на транспортные услуги в пункте j транспортной сети (суммарный грузопоток из пункта j до грузовых транспортных узлов в новой транспортной сети и от всех этих узлов до пункта j), $j \in \overline{1, M}$;

s_j^{max} – ожидаемый максимальный годовой спрос на транспортные услуги в пункте j транспортной сети (суммарный грузопоток из пункта j до грузовых транспортных узлов в новой транспортной сети и от всех этих узлов до пункта j), $j \in \overline{1, M}$;

S^{min} – ожидаемый минимальный годовой спрос на транспортные услуги в рассматриваемом регионе;

S^{max} – ожидаемый максимальный годовой спрос на транспортные услуги в рассматриваемом регионе;

ϵ_i – число вариантов для выбора пропускной способности нового грузового транспортного узла i , $i \in \overline{1, N^{new}}$;

μ – номер выбранного варианта пропускной способности грузового транспортного узла i , $i \in \overline{1, N^{new}}$, $\mu \in \overline{1, \epsilon_i}$;

$d_{i\mu}^{new}$ – годовая пропускная способность нового грузового транспортного узла i при выборе варианта его пропускной способности μ , $i \in \overline{1, N^{new}}$, $\mu \in \overline{1, \epsilon_i}$;

$d_{i\mu}^{max\ new}$ – максимальная годовая пропускная способность нового грузового транспортного узла i при выборе варианта его пропускной способности μ , $i \in \overline{1, N^{new}}$, $\mu \in \overline{1, \epsilon_i}$;

$d_{i\mu}^{min\ new}$ – минимальная годовая пропускная способность нового грузового транспортного узла i при выборе варианта его пропускной способности μ , $i \in \overline{1, N^{new}}$, $\mu \in \overline{1, \epsilon_i}$;

$d_{i'}^{exist}$ – годовая пропускная способность существующего грузового транспортного узла i' , $i' \in \overline{1, N^{exist}}$;

K – число видов транспорта в транспортной системе рассматриваемого региона, которые могут быть использованы для грузовых перевозок;

R_k – множество клиентов, которые могут использовать вид транспорта (подъездной путь) с индексом k для грузовых перевозок, $k \in \overline{1, K}$;

T_j – множество индексов видов транспорта, которые могут быть использованы клиентом j для грузовых перевозок, $j \in \overline{1, M}$;

L_i – множество индексов подъездных путей к новому грузовому транспортному узлу i , которые возможно построить в течении горизонта планирования, $i \in \overline{1, N^{new}}$;

$l_{i'}$ – множество индексов подъездных путей к существующему грузовому транспортному узлу i' , которые планируется обслуживать в течении горизонта планирования, $i' \in \overline{1, N^{exist}}$;

$s_{ji}^{k\ new}$ – объем годового грузопотока, который планируется перевозить между клиентом j и новым грузовым транспортным узлом i с помощью подъездного пути k , $i \in \overline{1, N^{new}}$, $j \in \overline{1, M}$, $k \in L_i \cap T_j$;

$s_{ji'}^{k\ exist}$ – объем годового грузопотока, который планируется перевозить между клиентом j и существующим грузовым транспортным узлом i' с помощью существующего подъездного пути k , $i' \in \overline{1, N^{exist}}$, $j \in \overline{1, M}$, $k \in l_{i'} \cap T_j$;

$t_{ji}^{k\ new}$ – средняя стоимость транспортировки единицы объема груза между клиентом j и новым грузовым транспортным узлом i с помощью подъездного пути k , которую планируется взимать с грузоотправителей и перевозчиков за доступ к новой грузовой транспортной инфраструктуре в грузовом транспортном узле i , $i \in \overline{1, N^{new}}$, $j \in \overline{1, M}$, $k \in L_i \cap T_j$;

$t_{ji}^{k\ exist}$ – средняя стоимость транспортировки единицы объема груза между клиентом j и существующим грузовым транспортным узлом i' с помощью подъездного пути k , которую планируется взимать с грузоотправителей и перевозчиков за доступ к существующей грузовой транспортной инфраструктуре в грузовом транспортном узле i' , $i' \in \overline{1, N^{exist}}$, $j \in \overline{1, M}$, $k \in l_{i'} \cap T_j$;

$Q_{i\mu}^{k\ new}$ – годовая пропускная способность подъездного пути k к новому грузовому транспортному узлу i при выборе варианта пропускной способности узла μ , $i \in \overline{1, N^{new}}$, $\mu \in \overline{1, \varepsilon_i}$, $k \in L_i$;

$Q_{i\mu}^{k\ new\ max}$ – максимальная годовая пропускная способность подъездного пути k к новому грузовому транспортному узлу i при выборе варианта пропускной способности узла μ , $i \in \overline{1, N^{new}}$, $\mu \in \overline{1, \varepsilon_i}$, $k \in L_i$;

$Q_{i\mu}^{k\ new\ min}$ – минимальная годовая пропускная способность подъездного пути k к новому грузовому транспортному узлу i при выборе варианта пропускной способности узла μ , $i \in \overline{1, N^{new}}$, $\mu \in \overline{1, \varepsilon_i}$, $k \in L_i$;

$Q_{i'}^{k\ exist}$ – годовая пропускная способность подъездного пути k к существующему грузовому транспортному узлу i' , $i' \in \overline{1, N^{exist}}$, $k \in l_{i'}$;

$f_{i\mu}$ – стоимость строительства нового грузового транспортного узла в пункте i с вариантом пропускной способности узла μ , $i \in \overline{1, N^{new}}$, $\mu \in \overline{1, \varepsilon_i}$;

$g_{i\mu}^k$ – стоимость строительства подъездного пути k к новому грузовому транспортному узлу в пункте i с вариантом пропускной способности узла μ , $i \in \overline{1, N^{new}}$, $\mu \in \overline{1, \varepsilon_i}$, $k \in L_i$;

$c_{i\mu}^{new}$ – стоимость годового обслуживания и содержания нового грузового транспортного узла в пункте i с вариантом пропускной способности узла μ , $i \in \overline{1, N^{new}}$, $\mu \in \overline{1, \varepsilon_i}$;

$q_{i\mu}^{k\ new}$ – стоимость годового обслуживания и содержания подъездного пути k к новому грузовому транспортному узлу в пункте i с вариантом пропускной способности узла μ , $i \in \overline{1, N^{new}}$, $\mu \in \overline{1, \varepsilon_i}$, $k \in L_i$;

$c_{i'}^{exist}$ – стоимость годового обслуживания и содержания существующего грузового транспортного узла в пункте i' , $i' \in \overline{1, N^{exist}}$;

$q_{i'}^{k'\ exist}$ – стоимость годового обслуживания и содержания подъездного пути k' к существующему грузовому транспортному узлу в пункте i' , $k' \in l_{i'}$, $i' \in \overline{1, N^{exist}}$;

ψ – длина горизонта планирования (количества лет, для которого производится расчет экономической целесообразности модернизации грузовой транспортной инфраструктуры региона);

ν – размер налогов, которые планируется взимать за доступ к транспортной инфраструктуре региона, рассчитываемый как фиксированный процент ν от тарифов, которые будут платить грузоотправители перевозчикам в зависимости от ситуации на рынке транспортных услуг,

$y_{i\mu}$ – бинарная переменная, принимающая значение 1, если новый грузовой транспортный узел с вариантом пропускной способности узла μ строится в вершине i , и значение 0 в противном случае, $i \in \overline{1, N^{new}}$, $\mu \in \overline{1, \varepsilon_i}$;

$z_{i\mu}^k$ – бинарная переменная, принимающая значение 1, если строится подъездной путь k к новому грузовому транспортному узлу i с вариантом пропускной способности узла μ , и значение 0 в противном случае, $i \in \overline{1, N^{new}}$, $\mu \in \overline{1, \varepsilon_i}$, $k \in L_i$.

Предполагается, что выполняются следующие предположения.

- 1) Для каждого сегмента $d_{i\mu}^{min\ new} \leq d_{i\mu}^{new} \leq d_{i\mu}^{max\ new}$ стоимость строительства нового грузового транспортного узла с вариантом пропускной способности узла μ в пункте i является линейной функцией от годовой пропускной способности $d_{i\mu}^{new}$ этого транспортного узла

$$f_{i\mu} = a_{i\mu} + \gamma_{i\mu} d_{i\mu}^{new}, \quad \mu \in \overline{1, \varepsilon_i}, \quad i \in \overline{1, N^{new}},$$

где $a_{i\mu}$, $\gamma_{i\mu}$ положительные вещественные числа $\mu \in \overline{1, \epsilon_i}$, $i \in \overline{1, N^{new}}$, а также выполняются неравенства $d_{i\mu}^{max\ new} \leq d_{i(\mu+1)}^{min\ new}$ для, $\mu \in \overline{1, \epsilon_i - 1}$, $\epsilon_i \geq 2$, $i \in \overline{1, N^{new}}$. Таким образом стоимость строительства нового грузового транспортного узла с вариантом пропускной способности узла μ в пункте i является кусочно-линейной функцией от годовой пропускной способности $d_{i\mu}^{new}$ этого транспортного узла.

- 2) Для каждого сегмента $Q_{i\mu}^{k\ min\ new} \leq Q_{i\mu}^{k\ new} \leq Q_{i\mu}^{k\ max\ new}$ стоимость строительства подъездного пути типа k к грузовому новому транспортному узлу в пункте i с вариантом пропускной способности узла μ является линейной функцией от годовой пропускной способности подъездного пути $Q_{i\mu}^{k\ new}$ типа k к этому транспортному узлу

$$g_{i\mu}^k = b_{i\mu}^k + \beta_{i\mu}^k Q_{i\mu}^{k\ new}, \quad \mu \in \overline{1, \epsilon_i}, \quad i \in \overline{1, N^{new}}, \quad k \in L_i,$$

где $b_{i\mu}$, $\beta_{i\mu}$ положительные вещественные числа $\mu \in \overline{1, \epsilon_i}$, $i \in \overline{1, N^{new}}$, а также выполняются неравенства $Q_{i\mu}^{k\ max\ new} \leq Q_{i(\mu+1)}^{k\ min\ new}$ для, $\mu \in \overline{1, \epsilon_i - 1}$, $\epsilon_i \geq 2$, $i \in \overline{1, N^{new}}$. Таким образом стоимость строительства подъездного пути типа k к новому грузовому транспортному узлу в пункте i с вариантом пропускной способности узла μ является кусочно-линейной функцией от годовой пропускной способности подъездного пути $Q_{i\mu}^{k\ new}$ типа k к этому транспортному узлу.

Следует иметь ввиду, что подъездные пути к новому грузовому транспортному узлу соединяют транспортный узел с ближайшим элементом существующей региональной транспортной сети (участком автодороги, железной дороги, и т. д.) и вершина сети (пункт) j и новый грузовой транспортный узел не соединяются новым подъездным путем. При расчете стоимости транспортировки $t_{ji}^{k\ new}$ учитывается общая длина пути между пунктом j и транспортный узел i .

- 3) Ожидаемый минимальный и максимальный годовой спрос на транспортные услуги в вершине j строго положителен и $\forall j \in \overline{1, M}$ выполняются неравенства

$$0 < s_j^{min} \leq s_j \leq s_j^{max}, \forall j \in \overline{1, M}.$$

- 4) Выполняются неравенства $\sum_{i'=1}^{N^{exist}} d_{i'}^{exist} < S^{min} < S^{max}$, и $Q_{i\mu}^{k new max} \gg 1$, $\mu \in \overline{1, \epsilon_i}$, $k \in L_i$, $i \in \overline{1, N^{new}}$. К существующим грузовым транспортным узлам не будут строиться новые подъездные пути, и никаких работ по увеличению пропускной способности существующих грузовых транспортных узлов проводится не будет в течении всего периода планирования.
- 5) Число типов подъездных путей к новому грузовому транспортному узлу в пункте i , $i \in \overline{1, N^{new}}$ не зависит от выбранной пропускной способности этого нового транспортного узла. В то же время пропускная способность подъездных путей может зависеть от выбранного варианта пропускной способности грузового транспортного узла.
- 6) Грузопоток может возникать не только в вершинах сети (пунктах), в которых находятся клиенты, и быть направленным в эти пункты, но и возникать в новых и в существующих грузовых транспортных узлах и быть направленным в новые и в существующие грузовые транспортные узлы.
- 7) Фиксированный процент (ν) от тарифов, которые будут платить грузоотправители перевозчикам в зависимости от ситуации на рынке транспортных услуг в виде налогов, которые планируется взимать за доступ к грузовой транспортной инфраструктуре региона, предполагается неизменным на протяжении всего горизонта планирования ψ лет, где $\psi \geq 1$.
- 8) В процессе переговоров с потенциальными партнерами из частного сектора региональная администрация выбирает

горизонт планирования ψ , на котором она оценивает расходы, связанные с развитием/модернизацией региональной транспортной инфраструктуры грузовых перевозок. При оценке администрация исходит из годовых мощностей новых грузовых транспортных узлов и новых подъездных путей к ним, которые будут построены в этот период. Горизонт планирования начинается после того, как все новые элементы транспортной инфраструктуры или какие-либо отдельные элементы (отобранные администрацией региона) будут построены и начнут функционировать.

- 9) Функционирование региональной транспортной инфраструктуры грузовых перевозок приносит доходы в виде налогов, составляющих фиксированный процент от грузовых тарифов. Эти налоги начинают поступать, как только будут построены все новые элементы транспортной инфраструктуры (новые грузовые транспортные узлы и подъездные пути к ним), которые должны быть построены в результате развития/модернизации транспортной инфраструктуры грузовых перевозок.

Случай 1.

Рассмотрим вначале *Ситуацию 1*, когда региональная администрация исходит из известных значений ожидаемых объемов каждого грузопотока в регионе в течении горизонта планирования при решении вопроса о модернизации существующей региональной транспортной инфраструктуры грузовых перевозок и из предположения о том, что существующая транспортная система не может удовлетворить ожидаемый спрос на грузовые перевозки в регионе. Исходя из этих известных значений, администрация региона заинтересована

- а) определить, какие новые грузовые транспортные узлы требуется построить, где эти узлы должны быть расположены, какими типами подъездных путей и мощностями они должны обладать,

б) проанализировать целесообразность частичного сохранения существующей схемы грузоперевозок между узлами региональной транспортной сети с использованием существующих грузовых транспортных узлов (оценить результаты возможного переключения существующих грузопотоков на новые грузовые транспортные узлы, которые планируется построить), а также

в) проанализировать целесообразность использования существующих грузовых транспортных узлов для обслуживания новых грузопотоков.

Это определение и анализ, которые осуществляются в полном соответствии с *Ситуацией 1*, описанной в разделе 2 настоящей статьи, администрация региона заинтересована провести в рамках рассмотрения целесообразности формирования государственно-частного партнерства для реализации проекта, связанного с развитием/модернизацией региональной транспортной инфраструктуры грузовых перевозок. В этой ситуации предполагается, что региональная администрация знает значения параметров $t_{ji}^{k' exist}$, $t_{ji}^{k new}$, $f_{i\mu}$, $g_{i\mu}^k$, $c_{i\mu}^{new}$, $q_{i\mu}^{k new}$, $c_{i'}^{exist}$ и $q_{i'}^{k' exist}$ на протяжении всего горизонта планирования. Исходя из этих значений, администрация может оценить общие ожидаемые расходы, связанные с развитием/модернизацией региональной транспортной инфраструктуры грузовых перевозок и перераспределением существующих грузопотоков между существующими и новыми грузовыми транспортными узлами, из решения некоторой задачи математического программирования со смешанными переменными. Именно, такая оценка может быть получена как минимальное значение функции, отражающей ожидаемые затраты на проект, на множестве допустимых решений заданном системой линейных ограничений, связывающих переменные $s_{ji}^{k new}$, $s_{ji'}^{k' exist}$, $y_{i\mu}$ и $z_{i\mu}^k$.

Для $\psi \geq 1$, эта функция принимает вид

$$\begin{aligned} & \psi \left(\sum_{i'=1}^{N_{exist}} c_{i'}^{exist} + \sum_{i'=1}^{N_{exist}} \sum_{k' \in l_{i'}} q_{i'}^{k' exist} \right) + \sum_{i=1}^{N_{new}} \sum_{\mu=1}^{\epsilon_i} (f_{i\mu} + \psi c_{i\mu}^{new}) y_{i\mu} + \\ & + \sum_{i=1}^{N_{new}} \sum_{k \in L_i} \sum_{\mu=1}^{\epsilon_i} (g_{i\mu}^k + \psi q_{i\mu}^{k new}) z_{i\mu}^k - \nu \psi \sum_{i=1}^{N_{new}} \sum_{j=1}^M \sum_{k \in L_i \cap T_j} t_{ji}^{k new} s_{ji}^{k new} - \\ & - \nu \psi \sum_{i'=1}^{N_{exist}} \sum_{j=1}^M \sum_{k \in l_{i'} \cap T_j} t_{ji'}^{k' exist} s_{ji'}^{k' exist}. \end{aligned}$$

С целью упрощения изложения далее предполагается, что в рассматриваемой задаче на протяжении всего горизонта планирования параметры $t_{ji'}^{k' exist}$, $t_{ji}^{k new}$, $f_{i\mu}$, $g_{i\mu}^k$, $c_{i\mu}^{new}$, $q_{i\mu}^{k new}$, $c_{i'}^{exist}$, и $q_{i'}^{k' exist}$ принимают одинаковые значения. Нетрудно убедиться в том, что сделанное предположение никак не ограничивает общности дальнейших рассуждений, связанных с рассмотрением *Ситуации 1*.

Для *Ситуации 1* рассматриваемая задача формулируется в виде задачи математического программирования со смешанными переменными

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^{N_{new}} \sum_{\mu=1}^{\epsilon_i} (f_{i\mu} + \psi c_{i\mu}^{new}) y_{i\mu} + \sum_{i=1}^{N_{new}} \sum_{k \in L_i} \sum_{\mu=1}^{\epsilon_i} (g_{i\mu}^k + \psi q_{i\mu}^{k new}) z_{i\mu}^k - \\ (1) \quad & - \nu \psi \sum_{i'=1}^{N_{exist}} \sum_{j=1}^M \sum_{k \in l_{i'} \cap T_j} t_{ji'}^{k' exist} s_{ji'}^{k' exist} - \\ & - \nu \psi \sum_{i=1}^{N_{new}} \sum_{j=1}^M \sum_{k \in L_i \cap T_j} t_{ji}^{k new} s_{ji}^{k new} \rightarrow \min, \\ (2) \quad & \sum_{\mu=1}^{\epsilon_i} y_{i\mu} \leq 1, \quad i \in \overline{1, N_{new}}, \end{aligned}$$

- (3)
$$\sum_{\mu=1}^{\epsilon_i} z_{i\mu}^k \leq 1, \quad i \in \overline{1, N^{new}}, \quad k \in L_i,$$
- (4)
$$\sum_{k \in L_i} z_{i\mu}^k \leq |L_i| y_{i\mu}, \quad \forall i \in \overline{1, N^{new}}, \quad \mu \in \overline{1, \epsilon_i},$$
- (5)
$$y_{i\mu} \leq \sum_{k \in L_i} z_{i\mu}^k, \quad i \in \overline{1, N^{new}}, \quad \mu \in \overline{1, \epsilon_i},$$
- (6)
$$\sum_{j=1}^M \sum_{k \in L_i \cap T_j} s_{ji}^k \leq \sum_{\mu=1}^{\epsilon_i} y_{i\mu} d_{i\mu}^{new}, \quad \forall i \in \overline{1, N^{new}},$$
- (7)
$$\sum_{j \in R_k} s_{ji}^k \leq \sum_{\mu=1}^{\epsilon_i} z_{i\mu}^k Q_{i\mu}^{k \text{ new max}}, \quad i \in \overline{1, N^{new}}, \quad k \in L_i,$$
- (8)
$$\sum_{j=1}^M \sum_{k \in l_{i'} \cap T_j} s_{ji'}^k \leq d_{i'}^{exist}, \quad \forall i' \in \overline{1, N^{exist}},$$
- (9)
$$\sum_{j \in R_k} s_{ji'}^k \leq Q_{i'}^{k \text{ exist}}, \quad \forall i' \in \overline{1, N^{exist}}, \quad k \in l_{i'},$$
- (10)
$$\sum_{i=1}^{N^{new}} \sum_{k \in L_i \cap T_j} s_{ji}^k \leq s_j + \sum_{i'=1}^{N^{exist}} \sum_{k \in l_{i'} \cap T_j} s_{ji'}^k, \quad \forall j \in \overline{1, M},$$
- (11)
$$s_j^{min} \leq s_j \leq s_j^{max}, \quad j \in \overline{1, M},$$
- (12)
$$S^{min} \leq \sum_{j=1}^M s_j \leq S^{max},$$
- (13)
$$s_{ji}^k \geq 0, \quad i \in \overline{1, N^{new}}, \quad j \in \overline{1, M}, \quad k \in L_i,$$
- (14)
$$s_{ji'}^{k'} \geq 0, \quad i' \in \overline{1, N^{exist}}, \quad j \in \overline{1, M}, \quad k' \in l_{i'},$$
- (15)
$$y_{i\mu} \in \{0, 1\}, \quad \mu \in \overline{1, \epsilon_i}, \quad i \in \overline{1, N^{new}},$$
- (16)
$$z_{i\mu}^k \in \{0, 1\}, \quad \mu \in \overline{1, \epsilon_i}, \quad i \in \overline{1, N^{new}}, \quad k \in L_i.$$

Ограничения задачи (1)-(16) имеют следующий смысл:

(2) – для каждого нового грузового транспортного узла i может быть выбран только один вариант пропускной способности, $i \in \overline{1, N^{new}}$,

(3) – для каждого из $|L_i|$ типов подъездных путей к новому грузовому транспортному узлу i может быть выбран только один вариант пропускной способности, $i \in \overline{1, N^{new}}$,

(4) – варианты пропускных способностей подъездных путей к новому грузовому транспортному узлу i должны соответствовать выбранному варианту пропускной способности нового транспортного узла, $i \in \overline{1, N^{new}}$,

(5) – для каждого выбранного варианта пропускной способности μ нового грузового транспортного узла i должен быть построен хотя бы один подъездной путь, $\mu \in \overline{1, \epsilon_i}$, $i \in \overline{1, N^{new}}$,

(6) – грузопоток через новый грузовой транспортный узел i не должен превышать выбранную максимальную пропускную способность нового транспортного узла, $i \in \overline{1, N^{new}}$,

(7) – грузопоток через подъездной путь k нового грузового транспортного узла i не должен превышать выбранную максимальную пропускную способность данного подъездного пути, $i \in \overline{1, N^{new}}$, $k \in L_i$,

(8) – грузопоток через существующий грузовой транспортный узел i' не должен превышать максимальную пропускную способность этого транспортного узла, $i' \in \overline{1, N^{exist}}$,

(9) – грузопоток через подъездной путь k существующего грузового транспортного узла i' не должен превышать максимальную пропускную способность этого подъездного пути, $i' \in \overline{1, N^{exist}}$, $k \in l_{i'}$,

(10) – весь спрос клиента (пункта, вершины региональной транспортной сети) j на транспортные услуги должен быть удовлетворен, $j \in \overline{1, M}$,

(11) – спрос клиента (пункта, вершины региональной транспортной сети) j на транспортные услуги должен находиться в определенных пределах, $j \in \overline{1, M}$,

(12) – суммарный спрос всех M клиентов (пунктов, вершин региональной транспортной сети) на транспортные услуги (грузопоток) должен находиться в определенных пределах,

(13)-(16) – ограничения на неотрицательность действительных и значения бинарных переменных.

Эта система ограничений является обобщением модели представленной в [2].

Система ограничений (2)-(16), которая предполагается совместной, является обобщением системы ограничений математической модели предложенной в [2]. Совместность этой системы может быть установлена путем решения вспомогательной задачи смешанного математического программирования, которая может быть сформулирована в соответствии с методологией, описанной в [1]. Совместность, в частности, означает, существует транспортная сеть способная обрабатывать ожидаемые грузопотоки, между всеми M узлами (пунктами, вершинами региональной грузовой транспортной сети) и грузовыми транспортными узлами (как существующими, так и подлежащими строительству). Если предположение о совместности не выполняется, то проверка путем решения вышеупомянутой вспомогательной задачи смешанного математического программирования определяет, какие существующие дороги следует модернизировать для увеличения их пропускной способности. Кроме того, она позволяет определить, какие новые дороги должны быть построены для удовлетворения ожидаемого спроса на транспортные услуги в регионе. В любом случае параметры всех существующих грузовых транспортных узлов и подъездных путей к ним, за исключением тех, которые связаны с новыми грузовыми транспортными узлами и подъездными путями к ним, при которых формулируется задача нахождения необходимого объема инвестиций, можно считать известными.

В *Ситуации 1* администрация региона может также быть заинтересована в оценке целесообразности формирования специального вида государственно-частного партнерства для реализации проекта, связанного с развитием/модернизацией региональной транспортной инфраструктуры грузовых перевозок. В рамках этого специального вида партнерства, налоги, которые, как ожидается, региональная администрация будет взимать с поставщиков транспортных услуг, больше не будут рассматриваться региональной администрацией как ее финансовый вклад в это партнер-

ство. Инвесторы получают лицензию на оказание транспортных услуг путем найма транспортных и других компаний для работы как с грузовладельцами, так и с грузополучателями и будут нести ответственность за уплату этих налогов (смотри раздел 2). При этом они будут иметь право на получение прибыли от оказания транспортных услуг грузовладельцам и грузополучателям (в предположении о том, что эта прибыль может быть получена в принципе). Ясно, что целевая функция оптимизационной задачи вида (1)-(16), решаемой при анализе целесообразности формирования указанного специального вида государственно-частного партнерства, будет отличаться от рассмотренной выше целевой функции только знаком ее второго члена (плюс вместо минуса).

Целевая функция задачи (1)-(16) лишь частично отражает затраты, которые понесет региональная администрация (и, потенциально, государственно-частное партнерство) при реализации проекта по развитию/модернизации региональной транспортной инфраструктуры грузовых перевозок. Чтобы оценить суммарные издержки, связанные с реализацией проекта, в предположении о том, что значения параметров $c_{i'}^{exist}$ и $q_{i'}^{k' exist}$, $i' \in \overline{1, N^{exist}}$, $k' \in \overline{1, l_{i'}}$ на протяжении всего горизонта планирования ψ остаются неизменными, к целевой функции (1) необходимо прибавить слагаемое

$$\psi\left(\sum_{i'=1}^{N^{exist}} c_{i'}^{exist} + \sum_{i'=1}^{N^{exist}} \sum_{k' \in \overline{1, l_{i'}}} q_{i'}^{k' exist}\right)$$

отражающее издержки, связанные с обслуживанием существующих транспортных узлов и подъездных дорог к ним. В силу постоянства указанных издержек, задачу (1)-(16) можно решать с целевой функцией (1) и затем прибавить указанное слагаемое к оптимальному значению целевой функции. Если эти издержки постоянны только в течении года во время горизонта планирования, к оптимальному значению целевой функции задачи (1)-(16)

следует прибавить слагаемое

$$\sum_{\kappa=1}^{\psi} \left(\sum_{i'=1}^{N^{exist}} c_{i'}^{exist \kappa} + \sum_{i'=1}^{N^{exist}} \sum_{k' \in l_{i'}} q_{i'}^{k' exist \kappa} \right),$$

где $c_{i'}^{exist \kappa}$ и $q_{i'}^{k' exist \kappa}$ значения соответствующих параметров в году κ , $\kappa \in \overline{1, \psi}$.

Замечание 2.

Следует иметь в виду, что для того, чтобы проанализировать насколько выгодно частным инвесторам участие в проекте необходимо решить отдельную оптимизационную задачу. Эта задача может иметь систему ограничений (2) - (16) и целевую функцию, описывающую ожидаемую прибыль от оказания инвесторами финансовых услуг

$$\left(\sum_{i'=1}^{N^{exist}} \sum_{j=1}^M \sum_{k \in l_{i'} \cap T_j} t_{ji'}^{k' exist} s_{ji'}^{k' exist} + \sum_{i=1}^{N^{new}} \sum_{j=1}^M \sum_{k \in L_i \cap T_j} t_{ji}^{k new} s_{ji}^{k new} \right) - f_{ex}(s_{ji'}^{k' exist}, s_{ji}^{k new}),$$

где функция $f_{ex}(s_{ji'}^{k' exist}, s_{ji}^{k new})$ отражает затраты, связанные с оказанием транспортных услуг государственно-частным партнерством инвесторов с региональной администрацией, в объемах, определенных векторами $s_{ji'}^{k' exist}, s_{ji}^{k new}$. Целевая функция в этой задаче отражает максимальный ежегодный доход, на который инвесторы могут рассчитывать в рамках концессионного соглашения, определяющего, что они будут единственным оператором, предоставляющим транспортные услуги всем грузовладельцам и грузополучателям в регионе в течение всего периода, определенного этим соглашением. Значение максимального годового дохода совпадает со значением максимума указанной целевой функции задачи при ограничениях (2)-(16), умноженного на коэффициент ψ . Сравнивая полученное так значение максимального ежегодного дохода со значением целевой функции в задаче (1)-(16), в которой второе и третье слагаемые целевой функции имеют знак плюс, можно предположить будут ли частные

инвесторы заинтересованы в предоставлении каких-либо транспортных услуг в рамках концессионного соглашения, равно как и финансовых услуг в рамках потенциального государственно-частного партнерства.

Очевидно, что если даже в ситуации когда частные инвесторы являются единственным поставщиком транспортных услуг в течение ψ лет, общие расходы превышают ожидаемую прибыль, частные инвесторы могут быть заинтересованы в инвестировании лишь в развитие/модернизацию региональной инфраструктуры грузовых перевозок без последующего предоставления транспортных услуг в рамках концессионного соглашения с администрацией региона. Напротив, если ожидаемая прибыль превышает ожидаемые общие расходы, инвесторы могут быть заинтересованы в оценке своей ожидаемой прибыли и расходов в условиях конкуренции, при которых они смогут предоставлять транспортные услуги. Однако рассмотрение соответствующей задачи выходит за рамки настоящей статьи.

Формулировка задачи смешанного математического программирования в виде системы соотношений (1)-(16) является математической формализацией *Случая В Ситуации 1*, описанного в разделе 2. Для *Случая А Ситуации 1*, неравенства (11) в системе ограничений (2)-(16) необходимо заменить на равенства $s_j = s_j^{max}$, $j \in \overline{1, M}$ и исключить неравенства (12) (так как будет выполняться равенство $\sum_{j=1}^M s_j^{max} = S^{max}$). В обоих случаях, сформулированные задачи смешанного математического программирования могут быть решены с использованием стандартных пакетов для решения оптимизационных задач, например, [23].

Ситуация 2.

Если лицам, принимающим решения в администрации региона, известны лишь диапазоны изменения значений параметров в задаче (1)-(16), администрация региона может быть заинтересована в оценке "наихудшего" возможного сценария финансовых затрат, связанных с развитием/модернизацией региональной инфраструктуры грузовых перевозок.

Пусть далее

$$\begin{aligned}
 x &= (s_{ij}^{k \text{ new}}, s_{i'j}^{k' \text{ exist}}) \in R_+^{M \sum_{i=1}^{N^{\text{new}}} |L_i| + M \sum_{i'=1}^{N^{\text{exist}}} |l_{i'}|}, \\
 t &= (t_{ij}^{k \text{ new}}, t_{i'j}^{k' \text{ exist}}) \in R_+^{M \sum_{i=1}^{N^{\text{new}}} |L_i| + M \sum_{i'=1}^{N^{\text{exist}}} |l_{i'}|}, \\
 y &= (y_{i\mu}) \in R_+^{\sum_{i=1}^{N^{\text{new}}} \epsilon_i}, f = (f_{i\mu}) \in R_+^{\sum_{i=1}^{N^{\text{new}}} \epsilon_i}, \\
 c &= (c_{i\mu}^{\text{new}}) \in R_+^{\sum_{i=1}^{N^{\text{new}}} \epsilon_i} g = (g_{i\mu}^k) \in R_+^{\sum_{i=1}^{N^{\text{new}}} \epsilon_i |L_i|}, \\
 q &= (q_{i\mu}^{k \text{ new}}) \in R_+^{\sum_{i=1}^{N^{\text{new}}} \epsilon_i |L_i|}, z = (z_{i\mu}^k) \in R_+^{\sum_{i=1}^{N^{\text{new}}} \epsilon_i |L_i|},
 \end{aligned}$$

переменные, для которых справедливы неравенства

$$\begin{aligned}
 t &\in \Lambda = \{t \geq 0 : tI \leq l\}, f \in \Theta = \{f \geq 0 : fF \leq r\}, \\
 g &\in \Gamma = \{g \geq 0 : gG \leq e\}, c \in \Delta = \{c \geq 0, cW \leq \lambda\}, \\
 q &\in \Upsilon = \{q \geq 0, q\Psi \leq \eta\}, \\
 (x, y, z) &\in \Phi = \{(x, y, z) \geq 0 : P(x, y, z) \geq \delta\}, \\
 x &\in MX = \{x \geq 0 : Ax \geq b\}, \\
 y &\in \Omega Y = \{y \geq 0 : By \geq \pi, y \in T_{\sum_{i=1}^{N^{\text{new}}} \epsilon_i}\}, \\
 z &\in HZ = \{z \geq 0 : Kz \geq h, z \in T_{\sum_{i=1}^{N^{\text{new}}} |L_i| \epsilon_i}\},
 \end{aligned}$$

где $I, F, G, W, \Psi, P, A, B, K$ – матрицы, а $l, r, e, \lambda, \eta, \delta, b, \pi, h$ – векторы соответствующих размеров, $T_{\sum_{i=1}^{N^{\text{new}}} \epsilon_i}$ – единичный куб в пространстве $R_+^{\sum_{i=1}^{N^{\text{new}}} \epsilon_i}$, и $T_{\sum_{i=1}^{N^{\text{new}}} |L_i| \epsilon_i}$ – единичный куб в пространстве $R_+^{\sum_{i=1}^{N^{\text{new}}} \epsilon_i |L_i|}$.

Далее предполагается, что а) множества $MX, \Lambda, \Theta, \Gamma, \Delta$, и Υ являются непустыми выпуклыми многогранниками в Евклидовых пространствах соответствующих размеров, которые описываются совместными системами линейных уравнений и неравенств, б) множества ΩY и HZ являются подмножествами выпуклых многогранников в конечномерных пространствах соответствующих размеров ($R_+^{\sum_{i=1}^{N^{\text{new}}} \epsilon_i}$ и $R_+^{\sum_{i=1}^{N^{\text{new}}} |L_i| \epsilon_i}$, соответственно), образованных векторами с координатами 0 или 1 (например,

принадлежащих единичным кубам $T_{\sum_{i=1}^{N^{new}} \epsilon_i}$ и $T_{\sum_{i=1}^{N^{new}} |L_i| \epsilon_i}$, соответственно), в) $P(x, y, z) \geq \delta$ определяет подмножество выпуклого многогранника, содержащего векторы (x, y, z) с булевыми компонентами (y, z) .

С использованием введенных обозначений задачу оценки "наихудшего" возможного сценария финансовых затрат на проект, соответствующую *Ситуации 2* (смотри раздел 2), можно сформулировать как обобщение задачи (1)-(16). Для горизонта планирования $\psi \geq 1$ лет и при сделанных выше предположениях 1-9, эта задача в векторно-матричной форме может быть записана в виде:

$$(17) \quad \max_{(t, f, c, g, q) \in \Lambda \times \Theta \times \Delta \times \Gamma \times \Upsilon} \left(-\nu\psi \langle t, x \rangle + \langle (f + \psi c), y \rangle + \langle (g + \psi q), z \rangle \right) \\ \rightarrow \min_{(x, y, z) \in (MX \times \Omega Y \times HZ) \cap \Phi}$$

Пусть $u = (t, (f + \psi c), (g + \psi q))$, $v = (x, y, z)$ и пусть

$$D = \begin{bmatrix} -\nu\psi E_1 & 0_1 & 0_2 \\ 0_3 & E_2 & 0_4 \\ 0_5 & 0_6 & E_3 \end{bmatrix}$$

является матрицей с числом строк равным сумме чисел элементов в векторах t, f и g , где E_1, E_2, E_3 единичные матрицы размеров $(M \sum_{i=1}^{N^{new}} |L_i| + M \sum_{i'=1}^{N^{exist}} |l_{i'}|)$, $\sum_{i=1}^{N^{new}} \epsilon_i$ и $\sum_{i=1}^{N^{new}} \epsilon_i |L_i|$, соответственно, 0_κ , $\kappa \in \bar{1, 6}$ нулевые матрицы соответствующих размеров, и пусть $\Pi = (MX \times \Omega Y \times HZ) \cap \Phi$.

Тогда задачу (17) можно переписать в виде следующей минимаксной задачи

$$(18) \quad \max_{u \in \Lambda \times \Theta \times \Delta \times \Gamma \times \Upsilon} \langle u, Dv \rangle \rightarrow \min_{v \in \Pi}.$$

Если $\hat{u} = (x, (f + \psi c), (g + \psi q))$, $\hat{v} = (t, y, z)$, и $\hat{\Pi} = (\Lambda \times \Omega Y \times HZ) \cap \Phi$, это минимаксная задача может быть записана в виде

$$(19) \quad \max_{\hat{u} \in MX \times \Theta \times \Delta \times \Gamma \times \Upsilon} \langle \hat{u}, D\hat{v} \rangle \rightarrow \min_{\hat{v} \in \hat{\Pi}}.$$

Так как вектор x принадлежит множествам MX и $\hat{\Pi}$, задача (19) является оптимизационной задачей со связанными переменными, решение которой представляет значительные трудности даже в случае, когда все переменные непрерывны [1] (что не имеет места в задаче (19)), и рассмотрение методов отыскания решения такой задачи в этом случае выходит за рамки настоящей статьи.

Задача (17) может также быть сформулирована в виде

$$(20) \quad \max_{(t,f,c,g,q) \in \Lambda \times \Theta \times \Delta \times \Gamma \times \Upsilon} \left(-\nu\psi \langle t, x \rangle + \langle f, y \rangle + \psi \langle c, y \rangle + \langle g, z \rangle + \psi \langle q, z \rangle \right) \rightarrow \min_{(x,y,z) \in (MX \times \Omega Y \times HZ) \cap \Phi}.$$

Пусть $(f, c) = \tilde{f}$, $(g, q) = \tilde{g}$, и

$$\tilde{f} \in \tilde{\Theta} = \{ \tilde{f} = (f, c) \geq 0 : fF \leq r, cW \leq \lambda \},$$

$$g \in \tilde{\Gamma} = \{ \tilde{g} = (g, q) \geq 0 : gG \leq e, q\Psi \leq \eta \}.$$

где $\tilde{\Theta}$ и $\tilde{\Gamma}$ выпуклые многогранники. Тогда задача (17) может быть сформулирована в виде

$$(21) \quad \max_{(t,\tilde{f},\tilde{g}) \in \Lambda \times \tilde{\Theta} \times \tilde{\Gamma}} \left(-\nu\psi \langle t, x \rangle + \langle \tilde{f} \tilde{E}_2, y \rangle + \langle \tilde{g} \tilde{E}_3, z \rangle \right) \rightarrow \min_{(x,y,z) \in (MX \times \Omega Y \times HZ) \cap \Phi}$$

где $\tilde{E}_2 = \begin{bmatrix} E_2 \\ \psi E_2 \end{bmatrix}$, $\tilde{E}_3 = \begin{bmatrix} E_3 \\ \psi E_3 \end{bmatrix}$, и E_2, E_3 единичные матрицы как и в (17), (18), а задача (18) может быть сформулирована в виде

$$(22) \quad \max_{\tilde{u} \in \Lambda \times \tilde{\Theta} \times \tilde{\Gamma}} \langle \tilde{u}, \tilde{D}v \rangle \rightarrow \min_{v \in \Pi}$$

$$\text{где } \tilde{u} = (t, \tilde{f}, \tilde{g}), v = (x, y, z), \tilde{D} = \begin{bmatrix} -\nu\psi E_1 & 0 & 0 \\ 0_7 & E_2 & 0_8 \\ 0_9 & \psi E_2 & 0_{10} \\ 0_{11} & 0_{12} & E_3 \\ 0_{13} & 0_{14} & \psi E_3 \end{bmatrix},$$

$0_\kappa, \kappa \in \overline{7, 14}$ это нулевые векторы соответствующих размеров.

4. Сведение минимаксной задачи (22) к задаче смешанного математического программирования.

В [6] показано, что справедливо равенство

$$\min_{v \in \Pi} \max_{\tilde{u} \in \Lambda \times \tilde{\Theta} \times \tilde{\Gamma}} \langle \tilde{u}, \tilde{D}v \rangle = \min_{v \in \Pi, Jw \geq \tilde{D}v} \langle \omega, w \rangle$$

где J – матрица, и ω – вектор соответствующих размеров, что позволяет свести решение задачи (18) к задаче смешанного математического программирования с линейными ограничениями.

Пусть $Y = \{y \geq 0 : By \geq \pi\}$ и $Z = \{z \geq 0 : Kz \geq h\}$. Тогда

$$\min_{v \in (MX \times Y \times Z) \cap \Phi, Jw \geq \tilde{D}v} \langle \omega, w \rangle$$

является нижней границей для

$$\min_{v \in \Pi, Jw \geq \tilde{D}v} \langle \omega, w \rangle,$$

и эта нижняя граница может быть найдена из решения задачи линейного программирования

$$\langle \omega, w \rangle \rightarrow \min_{v \in (MX \times Y \times Z) \cap \Phi, Jw \geq \tilde{D}v} .$$

Как известно [1], решение этой задачи линейного программирования и двойственной к ней определяют седловую точку в антагонистической игре на выпуклых многогранниках $\Lambda \times \tilde{\Theta} \times \tilde{\Gamma}$ и $MX \times Y \times Z$ с платежной функцией $\langle \tilde{u}, \tilde{D}v \rangle$.

Решение задач (21) и (22) позволяет оценить только часть издержек государственно-частного партнерства связанных с развитием/модернизацией региональной транспортной инфраструктуры грузовых перевозок. Как уже упоминалось при рассмотрении задачи (1)-(16), чтобы учесть издержки, связанные с эксплуатацией уже существующих грузовых транспортных узлов и подъездных путей к ним (в течение горизонта планирования в ψ лет) при

оценке экономической эффективности проекта развития региональной транспортной инфраструктуры грузовых перевозок за ψ лет, $\psi \geq 1$, к оптимальному значению целевой функции задач (21) и (22) необходимо прибавить слагаемое

$$\psi \left(\sum_{i'=1}^{N_{exist}} c_{i'}^{exist} + \sum_{i'=1}^{N_{exist}} \sum_{k' \in I_{i'}} q_{i'}^{k' exist} \right)$$

или

$$\sum_{\kappa=1}^{\psi} \left(\sum_{i'=1}^{N_{exist}} c_{i'}^{exist \kappa} + \sum_{i'=1}^{N_{exist}} \sum_{k' \in I_{i'}} q_{i'}^{k' exist \kappa} \right),$$

Здесь $c_{i'}^{exist \kappa}$ и $q_{i'}^{k' exist \kappa}$ это известные значения соответствующих параметров в году κ , $\kappa \in \overline{1, \psi}$ горизонта планирования. Рассмотрение случая, когда значения этих параметров и значения параметров $c_{i\mu}^{new}$ и $q_{i\mu}^{k new}$ неизвестны осуществляется путем включения этих параметров в качестве компонент соответствующих векторов переменных сформулированных минимаксных задач (21) и (22).

5. Краткое описание результатов исследования.

1. С точки зрения авторов, настоящая работа вносит определенный вклад в решение практических крупномасштабных проблем, связанных с принятием стратегических управленческих решений по инвестированию в развитие/модернизацию инфраструктуры региональных грузовых перевозок. В частности, в ней показывается, а) как можно оценить объем необходимых инвестиций в соответствующий проект и какая часть из этих инвестиций требуется от частного сектора, б) как этот объем можно определить, в) как оценить ожидаемую сумму дохода от функционирования указанной инфраструктуры и какая сумма может заинтересовать частных инвесторов в создании государственно-частного партнерства для развития/модернизации инфраструктуры региональных грузовых перевозок. Как показано в статье, все

эти оценки могут быть получены в результате решения некоторой задачи математического программирования. Хотя эта задача существенно нелинейная и является задачей математического программирования со смешанными переменными, в статье показано, что эту задачу можно решить с использованием известных методов смешанного математического программирования, реализованных в рамках стандартных пакетов прикладных программ, например, CPLEX и MILP. Таким образом, решение рассматриваемой задачи стратегического планирования не требует разработки каких-либо эвристик или специального программного обеспечения при интересных для практики размерах задачи. Этот вывод отличает подход, предлагаемый авторами статьи от подходов предлагаемых некоторыми другими авторами, в том числе авторами работы [21], к решению той части проблемы развития/модернизации инфраструктуры грузовых перевозок, которая связана с отысканием местоположения новых грузовых транспортных узлов,

2. Хотя число пунктов в региональной грузовой транспортной сети может быть довольно большим, число географических мест, подходящих для размещения новых грузовых транспортных узлов, обычно, относительно невелико (например, обычно, не превышает 10). Кроме того, а) число вариантов пропускной способности узла, из которых ее значение можно выбрать, обычно, не превышает 4, б) число типов новых подъездных путей к новому грузовому транспортному узлу, которые планируется построить, обычно, не превышает 3, в) пропускная способность подъездного пути каждого типа к каждому грузовому транспортному узлу, как правило, определяется пропускной способностью этого узла. Таким образом, число булевых переменных в задачах, возникающих на практике и формулируемых в виде задачи (1) - (16) или задачи (22), относительно невелико. Это позволяет решать практические задачи указанных видов с использованием стандартных программных пакетов, таких как MILP или CPLEX, довольно быстро, даже с помощью вариантов этих пакетов, реализованных в нутбуках. (О пакетах программного обеспечения

для решения задач оптимизации см., например, [8] и [23].)

3. Даже если бы число булевых переменных в какой-либо практической задаче, которая рассматривается в этой статье, была большим, нижние оценки расходов и прибыли/убытка могли бы быть рассчитаны с использованием методов линейного программирования. Эти методы описаны, в частности, в книгах [7] и [29], и их использование оказывается возможным в силу результатов, приведенных в статье [5]. Именно, как показано в [5], отыскание минимакса билинейной функции с непрерывными переменными, например, в непрерывном аналоге задачи (22) сводится к решению задач линейного программирования образующих двойственную пару. Таким образом, вычисление указанных нижних оценок требует решения лишь непрерывного аналога задачи (22).

4. Как известно, в управлении операциями вообще и в транспортных системах, в частности, экспериментальные данные, полученные в одной системе, обычно можно использовать для улучшения качества управления в другой системе, по крайней мере, в течение короткого промежутка времени. В проблемах стратегического управления, особенно возникающих в транспортных системах, ситуация однако, другая. Именно, стратегические решения в транспортных системах не являются универсальными по очевидным причинам. Они уникальны для каждой конкретной системы, и они, как правило, не могут быть воспроизведены в других системах. Закономерности, установленные исследователями на основе какого-либо конкретного набора данных, не имеют большого значения для лиц, принимающих решения, которые участвуют в разработке стратегических управленческих решений. Такое положение вещей имеет место, поскольку указанные закономерности могут резко измениться, когда они определяются на основе другого набора данных, в условиях, когда эти стратегические решения принимаются на длительный период времени. Напротив, лица, принимающие стратегические решения, чувствуют себя «вооруженными», когда они имеют простую в использовании систему поддержки принятия решений, помогающую им быстро находить решения задач, с которыми они сталкиваются, при

любых наборах данных.

«Ценность» стратегических рекомендаций, основанных на закономерностях, выявленных в результате экспериментов с конкретным набором (и даже с несколькими конкретными наборами) данных, как правило, сомнительна. Исключение составляют ситуации, в которых эти закономерности позволяют исследователям а) указать класс ситуаций, в каждой из которых (в пределах этого класса) эти закономерности выполняются всегда, б) установить поддающиеся проверке критерии для определения того, принадлежит ли какая-либо конкретная рассматриваемая ситуация этому классу. В противном случае, не только такие закономерности не способствуют развитию какой-либо теории, они могут вводить в заблуждение тех и даже наносить ущерб тем, кто применяет их на практике. Последнее особенно имеет место в отношении финансовых решений, которые должны быть приняты региональными администрациями или правительствами стран, поскольку, как правило, на карту поставлены деньги налогоплательщиков. В этих случаях любые необоснованные решения, базирующиеся на экспериментальных данных могут привести к финансовым проблемам, по крайней мере, в регионе, для которого эти решения принимаются. Хотя авторам неизвестны такие классы ситуаций в стратегическом управлении, в том числе в области развития/модернизации транспортных инфраструктур, выявление этих классов ситуаций не входит тем не менее в число целей настоящей статьи.

Изложенные соображения авторов, разумеется, не означают, что все результаты экспериментальных расчетов, относящиеся к принятию стратегических управленческих решений по развитию/модернизации инфраструктур, в том числе транспортных, бесполезны с практической точки зрения. Эти соображения также не означают, что лица, ответственные за принятие решений в области стратегического управления, всегда будут игнорировать результаты указанных экспериментальных расчетов, поскольку эти результаты могут в конечном итоге выявить чрезвычайно полезную стратегическую деловую информация. Однако, следует

иметь в виду, что именно по этой причине реальные данные вряд ли будут предоставляться региональными администрациями заинтересованным исследователям.

По очевидным финансовым причинам (особенно если переговоры с потенциальными инвесторами из частного сектора скоро предстоят или уже планируются), а также для обеспечения безопасности, региональные администрации предпочитают иметь систему поддержки принятия решений, которая позволяет им самим производить вычисления на реальных данных с любыми такими данными, которые они могут решить ввести в эту систему. В то же время, как упоминалось ранее, результаты экспериментальных расчетов, выполненные по какому-либо конкретному набору данных (реальных или нет), могут весьма существенно измениться при использовании другого набора данных в этих расчетах.

6. Заключительные замечания.

1. Одной из целей настоящей статьи являлось предложить систему поддержки принятия решений, которая может помочь региональной администрации в ее переговорах, как с федеральным правительством, так и с частными инвесторами по вопросам финансирования проектов развития/модернизации инфраструктуры региональных грузовых перевозок. Позволяя оценивать необходимый объем инвестиций в такие проекты, предложенная система способна подтвердить необходимость создания государственно-частного партнерства, если ни федеральное правительство, ни региональная администрация ни обе ветви власти совместно не могут полностью финансировать какой-либо конкретный проект.

2. Предложенный в настоящей статье подход к моделированию рассматриваемой в рамках статьи проблемы с учетом неопределенности в значениях всех ее параметров состоит в формулировке формализующей эту проблему задачи как робастной задачи отыскании минимакса билинейной функции на Декартовом произведении двух множеств допустимых значений вектор-

ных переменных. Одним из этих множеств является выпуклый многогранник, а другим множеством является подмножество другого выпуклого многогранника, образованного векторами, каждая из компонент которого равна либо 0, либо 1. Как доказано в статье авторов [6], отыскание минимакса искомой билинейной функции этих двух векторных переменных сводится к решению задачи математического программирования со смешанными переменными.

3. Любая система поддержки принятия решений для анализа работы существующей региональной транспортной инфраструктуры и/или для разработки оптимального варианта такой инфраструктуры, которая сможет эффективно работать, должна удовлетворять определенным критериям. В частности, такая система должна позволять администрации региона

а) находить и оценивать варианты этой инфраструктуры (которые администрация региона может считать представляющими интерес для региона) за приемлемое время, несмотря на то, что с этой целью потребуются решать задачи большого размера,

б) отображать расположение всех элементов инфраструктуры на географической карте региона, страны и мира графически, в простой для понимания форме,

в) вводить новую и изменять уже существующую информацию, относящуюся к транспортной инфраструктуре, через простые в эксплуатации интерфейсы,

г) получать решения (варианты инфраструктуры) на основе доступной информации, включая данные, которые в принципе могут быть известны только приблизительно, а также по статистическим оценкам, которые могут быть рассчитаны на основе этой информации,

д) включать как новую информацию, так и новые закономерности, формализующие отношения между переменными и параметрами в используемых математических моделях, по мере того, как они становятся известными в ходе разработки и анализа стратегических решений, связанных с инфраструктурой региональных грузовых перевозок.

Описанные особенности подхода к моделированию проблемы, предложенного в настоящей статье, свидетельствуют о том, что требуемая система поддержки принятия решений для указанных целей может быть легко построена на основе системы принятия решений, рассмотренной в настоящей статье. Такая система поддержки принятия решений должна включать программное обеспечение а) для решения задач линейного и математического программирования со смешанными переменными, б) графического отображения решений задач математического программирования со смешанными переменными. Как уже упоминалось ранее, стандартные программные пакеты для решения задач математического программирования со смешанными переменными широко доступны для использования даже на ноутбуках. Программное обеспечение для географической информационной системы, применяемое при решении задач, связанных с транспортом, описано, например, в [3]. Иллюстративный пример использования конкретного варианта системы поддержки принятия решений для выработки стратегических решений по модернизации инфраструктуры региональных грузовых перевозок на модельных данных, включая графическое представление решений задач смешанного математического программирования, которые необходимо решать с этой целью, приведен авторами в [6].

4. Нетрудно убедиться в том, что предложенный подход к математическому моделированию проблемы может быть использован для оценки необходимого объема инвестиций в развитие/модернизацию инфраструктур региональных пассажирских перевозок, а также в развитие/модернизацию региональных инфраструктур грузовых и пассажирских перевозок одновременно.

5. В рамках основных предположений 1 и 2, сделанных в разделе 3 настоящей статьи, авторами рассматриваются кусочно-линейные аппроксимации функций затрат на строительство как новых транспортных узлов, так и новых подъездных путей к ним, которые обычно описываются выпуклыми функциями с положительными значениями. Описание известных методов аппроксимации, в частности, таких выпуклых функций кусочно-линейными

функциями можно найти во многих научных публикациях, в том числе в [15].

6. Основное предположение 4 (см. раздел 3), согласно которому в плановом периоде не строятся новые подъездные пути к существующим грузовым транспортным узлам и не проводятся какие-либо работы по модернизации существующих подъездных путей к этим узлам, не является ограничительным. Действительно, введением новых переменных в систему ограничений задачи (1)-(16), можно рассматривать модернизацию существующих грузовых транспортных узлов и подъездных путей к ним в качестве части проекта, связанного с разработкой новой региональной инфраструктуры грузовых перевозок.

7. Основное предположение 9 (см. раздел 3), определяющее, что доход в форме региональных налогов (которые администрация региона рассчитывает получить в результате функционирования модернизированной грузовой транспортной инфраструктуры региона) становится реальностью только после того, как начнут функционировать все новые объекты (новые транспортные узлы и подъездные пути к ним), которые планируется построить, не является ограничительным. Это происходит потому, что региональная администрация может решать задачу (1)-(16) или задачу (22) несколько раз, с учетом графика ввода в действие этих новых объектов в течение любого определенного периода времени. С этой целью такой период времени следует разделить на соответствующее число частей, в каждой из которых региональная администрация ожидает, что определенный комплекс объектов будет построен и начнет работать, и рассматривать уже построенные новые объекты как существующие.

8. По мнению авторов, представленный в настоящей статье краткий обзор работ в области моделирования государственно-частного партнерства по осуществлению проектов, связанных с развитием/модернизацией элементов транспортных инфраструктур, помогает обосновать необходимость разработки системы поддержки принятия решений, предложенной в этой статье.

Литература

1. БЕЛЕНЬКИЙ А.С. *Минимаксные задачи планирования с линейными ограничениями и методы их решения* // Автоматика и телемеханика. – 1981. – №10. – С. 157–170.
2. ФЕДИН Г.Г. *Применение робастного подхода к задаче размещения транспортных узлов с подъездными путями в географическом регионе с существующей транспортной системой* // УБС – 2018. – №72. – С. 108–137.
3. ABULIZI N., KAWAMURA A., TOMIYAMA K., FUJITA S. *Measuring and evaluating of road roughness conditions with a compact road profiler and ArcGIS* // Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition). – 2016. – No. 3(5). – P. 398–411.
4. AERTS G., GRAGE T., DOOMS M., HAEZENDONCK E. *Public-Private Partnerships for the Provision of Port Infrastructure: An Explorative Multi-Actor Perspective on Critical Success Factors* // The Asian Journal of Shipping and Logistics. – 2014. – No. 30. – P. 273–298.
5. BELENKY A. *Two classes of games on polyhedral sets in systems economic studies* // Kalyagin V. A., Pardalos P. M., Rassias T., eds. Network Models in Economics and Finance. (Springer Verlag) – 2014. – P. 35–84.
6. BELENKY A., FEDIN G., KOHRNHAUSER A. *Estimating the volume of investment needed for developing a regional freight transportation infrastructure* // Издательский дом ВШЭ. Series WP7 Математические методы анализа решений в экономике, бизнесе и политике – 2018.
7. BERTSTIMAS D., TSITSIKLIS J. *Introduction to linear optimization* // Scientific Series in Optimization and Neural Computation. (Athena) – 1997.
8. BIXBY R. *Solving real-world linear programs: a decade and more of progress* // Operation Research. – 2002. – No. 50 (1). – P. 3–15.
9. CABRERA M., SUAREZ-ALEMAN A., TRUJILLO L. *Public-*

- private partnerships in Spanish Ports: Current status and future prospects // Utilities Policy.* – 2015. – No. 32. – P. 1–11.
10. CARPINTERO S., SIEMIATYCKI M. *The politics of delivering light rail transit projects through public-private partnerships in Spain: A case study approach // Transport Policy.* – 2016. – No. 49. – P. 159–167.
 11. CARMONA M. *The regulatory function in public-private partnerships for the provision of transport infrastructure // Research in Transportation Economics.* – 2010. – No. 30. – P. 110–125.
 12. DEMENTIEV A. *Strategic partnerships in local public transport // Research in Transportation Economics.* – 2016. – No. 59. – P. 65–74.
 13. DEMENTIEV A., LOBOYKO A. *Trusting partnerships in a regulatory game: The case of suburban railway transport in Russia // Research in Transportation Economics.* – 2014. – No. 48. – P. 209–220.
 14. GALILEA P., MEDDA F. *Does the political and economic context influence the success of a transport project? An analysis of transport public-private partnerships // Research in Transportation Economics.* – 2010. – No. 30. – P. 102–109.
 15. GAVRILOVICH M. *Optimal approximation of convex curves by functions which are piecewise linear // Journal of Mathematical Analysis and Applications.* – 1975. – No. 52 (2). – P. 260–282.
 16. GEDDES R.R., NENTCHEV D.N. *Road Pricing and Asset Publicization: A New Approach to Revitalizing U.S. Infrastructure // AEI Policy Brief American Enterprise Institute.* (Washington, DC). – 2013.
 17. HARALAMBIDES H., GUJAR G. *The Indian dry ports sector, pricing policies and opportunities for public-private partnerships // Research in Transportation Economics.* – 2011. – No. 33. – P. 51–58.
 18. LIU Z., WANG S., MENG Q. *Optimal joint distance and time toll for cordon-based congestion pricing // Transport. Res. Part*

- В. – 2014. – No. 69. – P. 81–97.
19. MENG Q., LIU Z., WANG S. *Optimal distance tolls under congestion pricing and continuously distributed value of time* // Transport. Res. Part E. – 2012. – No. 48. – P. 937–957.
 20. MENG Q., WANG X. *Intermodal hub-and-spoke network design: incorporating multiple stakeholders and multi-type containers* // Transport. Res. Part B. – 2011. – No. 45. – P. 724–742.
 21. MERAKLI M., YAMAN H. *Robust intermodal hub location under polyhedral demand uncertainty* // Transport. Res. Part B. – 2016. – No. 86. – P. 66–85.
 22. MERAKLI M., YAMAN H. *A capacitated hub location problem under hose demand uncertainty* // Computers and Operations Research. – 2017. – No. 88. – P. 58–70.
 23. MITTELMANN H. *Benchmarks for optimization software* // <http://plato.asu.edu/bench.html> (дата обращения 11.08.2018).
 24. PANAYIDES P.M., PAROLA F., LAM J. *The effect of institutional factors on public-private partnership success in ports* // Transportation Research Part A: Policy and Practice. – 2015. – No. 71. – P. 110–127.
 25. ROUHANI M.O., GEDDES R., GAO H.O., BEL G. *Social welfare analysis of investment public-private partnership approaches for transportation projects* // Transportation Research Part A: Policy and Practice. – 2016. – No. 88. – P. 86–103.
 26. SUMALEE A., XU W. *First-best marginal cost toll for a traffic network with stochastic demand* // Transport. Res. Part B. – 2011. – No. 45. – P. 41–59.
 27. WANG H., ZHANG X. *Joint implementation of tradable credit and road pricing in public-private partnership networks considering mixed equilibrium behaviors* // Transportation Res. Part E. – 2016. – No. 94. – P. 158–170.
 28. YANG H., ZHANG X. *Multiclass network toll design problem with social and spatial equity constraints* // J. Transport. Eng.. – 2002. – No. 128. – P. 420–428.

29. YUDIN D., GOLSHTEIN E. *Linear Programming* // publ Israel Program of Scientific Translations. (Jerusalem). – 1965.
30. ZHANG X., YANG H., HUANG H.-J. *Multiclass multicriteria mixed equilibrium on networks and uniform link tolls for system optimum* // Eur. J. Oper. Res.. – 2008. – No. 189. – P. 146–158.
31. ZHANG X., YANG H. *The optimal cordon-based network congestion pricing problem* // Transport. Res. Part B. – 2004. – No. 38. – P. 517–537.
32. ZHANG Z., DURANGO-COHEN P.L. *A strategic model of public-private partnerships in transportation: Effect of taxes and cost structure on investment viability* // Research in Transportation Economics. – 2012. – No. 36. – P. 9–18.

ARTICLE TITLE

Alexander Belenky, Department of Mathematics, Faculty of Economics and the International Laboratory of Decision Choice and Analysis, The National Research University Higher School of Economics, Moscow, Russia (abelenky@hse.ru).

Gennadii Fedin, PhD student, Research Assistant, National Research University Higher School of Economics, Moscow, Russia (gfedin@hse.ru).

Alain Kornhauser, Faculty of Operations Research and Financial Engineering, Princeton University, Princeton, NJ, USA (alaink@princeton.edu).

Abstract: An approach to the interaction between a regional administration and private investors based on estimating the volume of private investment needed to develop/modernize a regional freight transportation infrastructure is proposed. The estimates of the required investment volume and those of the amount of the revenue expected to be generated by the infrastructure functioning are key ones in negotiations of the regional administration with the private investors on forming a potential public-private partnership to finance the development/modernization of the infrastructure. A decision-support tool for estimating the required volume of private investment to this end is proposed. The tool includes a) a mathematical model underlying three problems formulated on its basis depending on the information available to the decision makers—two mixed programming problems and a minimax problem, which is proven to be reducible to a mixed programming one with all integer variables being Boolean, b) a standard software package for solving mixed programming problems, and c) a software package for processing data. The use of the tool in structuring negotiations between a regional administration and private investors is discussed.

Keywords: bilinear functions of vector arguments, investment in developing a regional freight transportation infrastructure, minimax problems with linear constraints, mixed programming problems, public-private partnership, transport hubs and access roads to them

*Статья представлена к публикации
членом редакционной коллегии ...*

*Поступила в редакцию ...
Дата опубликования ...*