

ISSN 2949-5598

ДИСКРЕТНЫЙ АНАЛИЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ ОПЕРАЦИЙ

Том 32 № 1 2025

Новосибирск
Издательство Института математики

ГОСУДАРСТВЕННО-ЧАСТНОЕ ПАРТНЁРСТВО
В ИНФРАСТРУКТУРНЫХ ПРОЕКТАХ СЫРЬЕВОЙ
ТЕРРИТОРИИ: МОДЕЛЬ НА ОСНОВЕ
КОНСОРЦИУМА НЕДРОПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ

*А. О. Зырянов^a, С. М. Лавлинский^b,
А. А. Панин^c, А. В. Плясунов^d*

Институт математики им. С. Л. Соболева,
пр. Акад. Коптюга, 4, 630090 Новосибирск, Россия

E-mail: ^aalexander.zyryanov44@gmail.com, ^blavlin@math.nsc.ru,
^caapanin1988@gmail.com, ^dapljas@math.nsc.ru

Аннотация. Предложена модель для разработки планов производственно-инфраструктурного строительства, использующая специальный механизм государственно-частного партнёрства. В его основе — формирование набора кластеров месторождений, в каждом из которых государством создаётся консорциум частных инвесторов, заинтересованных в освоении месторождений кластера. Функционал такого объединения — совместное строительство необходимой для добычи полезных ископаемых транспортной и энергетической инфраструктуры. Механизм достижения компромисса интересов государства и частных инвесторов использует модель Штакельберга, в которой лидером выступает государство. Оно определяет квоты компенсаций затрат консорциумов на реализацию инфраструктурных проектов. Роль последователя отведена системе консорциумов, формирующей программу инфраструктурного строительства. Решение соответствующей двухуровневой задачи математического программирования позволяет сформировать адресный план развития, составляющими которого являются программа инфраструктурного строительства в консорциумах, список запускаемых производственных проектов, раздел инфраструктурных затрат и компенсационных трансфертов для частных инвесторов. Показано, что задача государства Σ_2^P -трудна и принадлежит классу $\Sigma_2^P\text{O}$, если переменные, определяющие график трансфертов, принимают только целые значения. Для решения двухуровневой задачи на основе метаэвристик разработан новый стохастический приближённый гибридный алгоритм, использующий идеи покоординатного спуска.

Проведены численные эксперименты для комплекса месторождений Забайкальского края. Результаты имеют практическое значение для формирования механизма компенсаций в долевом строительстве производственной инфраструктуры. Ил. 8, библиогр. 20.

Ключевые слова: двухуровневая задача математического программирования, модель Штакельберга, метаэвристика, покоординатный спуск, полиномиальная иерархия, аппроксимационная иерархия, государственно-частное партнёрство, производственно-инфраструктурный проект, консорциум недропользователей.

Введение

Проблема формирования программы недропользования в ресурсном регионе с недостаточным уровнем развития транспортной и энергетической инфраструктуры актуальна для большинства российских ресурсных территорий. Здесь инвестор не может запустить проекты освоения месторождений из-за отсутствия дорог, ЛЭП, а государство не готово строить инфраструктурные объекты без полной уверенности в их достаточной загрузке. В большинстве сибирских и дальневосточных регионов такое положение дел сдерживает развитие региональных экономик и стимулирует разработку механизмов достижения компромисса интересов участвующих сторон.

В контексте стратегического планирования ключевая роль в процессе принятия решения отведена согласованию перечня и сроков запуска проектов освоения месторождений минерального сырья с планами создания необходимой, но отсутствующей на сегодняшний день производственной инфраструктуры. Такую инфраструктуру предполагается строить в рамках коллаборации, общие контуры которой укладываются в классическую схему государственно-частного партнёрства (ГЧП) [1–3], но сам механизм ещё предстоит определить. В сегодняшних реалиях управленческий корпус минерально-сырьевого сектора ставит во главу угла политические аргументы и использует, в основном, простейшие оценки эффективности принимаемых решений на основе анализа текущих рыночных цен и затратных характеристик технологических проектов.

Опыт реализации самых крупных проектов такого рода [4–7] негативно оценивается экспертным сообществом и говорит о том, что программа освоения недр должна не только определить перечень мер, способствующих территориальному развитию, но и ответить на следующие ключевые вопросы, стоящие перед частным инвестором, потенциально заинтересованным в освоении природных богатств территории. Как помочь инвестору в освоении месторождений труднодоступных районов без какой-либо производственной инфраструктуры? Как оптимально построить институт стимулирования частных инвестиций, обеспечивающий

комплементарный эффект различных мер инвестиционной политики государства на территории? Как в организационном плане гармонизировать цели и объединить возможности недропользователей?

Основное внимание в статье направлено на эти проблемы. Дополнив классическую модель ГЧП механизмом консорциума, авторы в существенной степени расширяют ранее исследованные модели партнёрства [8–10] за счёт дополнения их горизонтальными связями частных инвесторов и эффектами от консолидации ресурсов. Принципиально важно, что механизм партнёрства и программа освоения приобретают в этих условиях максимально конкретный и адресный характер, который уже может быть использован напрямую в практике управления.

1. Математическая модель

Для большинства российских ресурсных регионов весь набор месторождений может быть представлен в виде системы непересекающихся территориальных кластеров, границы которых обусловлены рельефом местности и водоразделами рек. В основе предлагаемой модели лежит представление о том, что необходимая для запуска проектов недропользования производственная инфраструктура строится системой консорциумов, территориально привязанных к этим кластерам. Для каждого консорциума государство создаёт управляющую компанию (УК). Функционал УК — организация и координация долевого финансирования процесса создания необходимых инфраструктурных объектов частными инвесторами — членами консорциума, а также генерация графика компенсационных бюджетных выплат. Управляющая компания берёт на себя полный перечень государственных функций в основных процедурах согласования интересов: организация экологического контроля, проведение всесторонней предпроектной экспертизы, осуществление мониторинга хода реализации проекта и пр. Итогом деятельности управляющих компаний является развёрнутая комплексная программа освоения минерально-сырьевой базы территории. Она определяет, какие из инфраструктурных объектов будут построены, перечень запускаемых проектов освоения месторождений в каждом консорциуме (кластере), графики затрат на создание необходимой производственной инфраструктуры и их бюджетного возмещения для каждого из инвесторов.

Такая схема жизнеспособна и интересна для бизнеса лишь при условии достижения частным инвестором необходимого уровня рентабельности в совокупном проекте освоения месторождения и строительства части необходимой инфраструктуры. Для государства она привлекательна, во-первых, с точки зрения динамики затрат на развитие территории: в отличие от сегодняшней практики, бюджетные затраты на компенсации могут быть отнесены на период, когда уже начинают поступать налоги.

Во-вторых, государство получает инструмент регулирования для распределения природно-ресурсной ренты, существенно более гибкий, чем рентные налоги, назначая для высокорентабельных месторождений большую долю инфраструктурных затрат в консорциуме. Дело за малым — определить параметры такого партнёрства (программы освоения), обеспечивающие экономическую заинтересованность потенциальных недропользователей и максимально возможный объём налоговых платежей.

1.1. Модель консорциума. Как может быть описан процесс деятельности управляющей компании консорциума в части координации процессов добычи, долевого строительства инфраструктуры и согласования интересов в процедурах взаимных расчётов?

Управляющая компания консорциума, как субъект управления проектом ГЧП, координирует процесс нахождения компромисса интересов участников, ориентируясь на совокупность целей и особенности экономической среды. Важную роль здесь играют транзакционные издержки (ТИ) [11–13], существенно влияющие на процессы, связанные с образованием и деятельностью консорциума. По своей природе такой специализированный консорциум должен решать сложные, оптимизационные по своей сути задачи. Это обстоятельство существенно отличает его от сегодняшних дирекций вышеупомянутых мегапроектов и программ, инструментарий принятия управленческих решений которых не в полной мере соответствует уровню поставленных перед ними задач.

Транзакционные издержки включают в себя не только расходы по заключению контрактов, но и затраты, появляющиеся в процессе взаимодействия экономических агентов. Для случая масштабных сырьевых проектов транзакционные издержки в неосвоенных районах могут оказаться достаточно большими. Управляющая компания, как представитель собственника (государства), несёт ТИ в части контроля, мониторинга, затрат на создание институциональной инфраструктуры. В рамках консорциума транзакционные издержки инвестора связаны с разработкой оценки воздействия на окружающую среду, издержками на содержание служб, взаимодействующих с контролирующими органами, и т. п.

Практика экономического анализа различает транзакционные издержки до (ТИ-до) и транзакционные издержки после (ТИ-после) старта проекта [11]. Это связано с различиями в подходах к управлению природными ресурсами до и после начала реализации проектных мероприятий. Особенности институциональной среды также влияют на процесс формирования издержек, определяя то, каким образом эти издержки распределяются между правительством и бизнесом.

Традиционный подход к исчислению транзакционных издержек позволяет предположить, что в рамках консорциума общая величина ТИ

управляющей компании и частных инвесторов пропорциональна объёму капиталовложений проекта. Практика показывает, что этот факт наблюдается как у инфраструктурного проекта, так и у проекта освоения месторождения.

Та же практика позволяет уловить характер динамики ТИ — рост ТИ-до на протяжении T_1 лет к моменту старта и постепенный спад ТИ-после до некоторого уровня, который определяется условиями контракта. Кроме того, мы будем фиксировать долю ТИ, включаемых в себестоимость. Вкупе все сделанные предположения дают возможность алгоритмически определить величину транзакционных издержек и представить в агрегированном виде характер их изменения во времени.

1.2. Модель формирования ГЧП. Введём следующие обозначения:

- $T = \{-T_1, \dots, 0, 1, \dots, T_2\}$ — временной горизонт, T_2 — длительность периода планирования;
- T_0 — временной лаг, определяющий начальный момент компенсационных выплат из бюджета;
- I — множество производственных (добычных) проектов;
- J — множество инфраструктурных проектов;
- K — множество консорциумов.

Предполагается, что у каждого инвестора одно месторождение, которое он может осваивать.

Для производственного проекта $i \in I$ определим

- DBP_i^t — график налоговых платежей, возникающих в процессе реализации проекта;
- CFP_i^t — кэшфло проекта (разница доходов и расходов);
- MTCR_i^t — транзакционные издержки управляющей компании консорциума, членом которого является инвестор, на всём временном горизонте проекта: в периоды подготовки (ТИ-до, $t = -T_1, \dots, 0$) и реализации (ТИ-после, $t = 1, \dots, T_2$);
- ITCR_i^t — транзакционные издержки инвестора на всём временном горизонте проекта: в периоды подготовки (ТИ-до, $t = -T_1, \dots, 0$) и реализации (ТИ-после, $t = 1, \dots, T_2$).

Для инфраструктурного проекта $j \in J$ определим

- ZI_j^t — график капитальных вложений по проекту;
- MTCI_j^t — транзакционные издержки управляющей компании консорциума, реализующего проект;
- ITCI_j^t — совокупные транзакционные издержки инвесторов, участвующих совместно в проекте;
- VDI_j^t — бюджетные доходы, порождённые мультипликативным воздействием проекта на экономику территории.

На этапе подготовки проектов ($t = -T_1, \dots, 0$) параметры модели DBP_i^t , CFP_i^t , ZI_j^t и VDI_j^t предполагаются нулевыми.

Взаимосвязь проектов $i \in I$ и $j \in J$:

- μ_{ij} — булева переменная, фиксирующую необходимость реализации инфраструктурного проекта $j \in J$ для запуска производственного проекта $i \in I$,

$$\mu_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если реализация проекта } i \in I \text{ невозможна без реализации проекта } j \in J, \\ 0 & \text{иначе.} \end{cases}$$

Наборы производственных и инфраструктурных проектов разбиты на консорциумы непересекающимся образом и соответствуют исходной кластеризации территории.

Распределение проектов и инвесторов по консорциумам:

$$\alpha_{kj} = \begin{cases} 1, & \text{если инфраструктурный проект } j \\ & \text{принадлежит консорциуму } k, \\ 0 & \text{иначе;} \end{cases}$$

$$\beta_{ki} = \begin{cases} 1, & \text{если производственный проект } i \\ & \text{принадлежит консорциуму } k, \\ 0 & \text{иначе.} \end{cases}$$

Бюджетные ограничения и дисконты:

- BudG^t , DG — бюджет и дисконт государства;
- BudI_i^t , DI — бюджет и дисконт инвестора.

Целочисленные переменные модели:

$$z_i = \begin{cases} 1, & \text{если производственный проект } i \text{ запускается инвестором этого проекта,} \\ 0 & \text{иначе;} \end{cases}$$

$$c_j = \begin{cases} 1, & \text{если инфраструктурный проект } j \text{ реализуется некоторым консорциумом,} \\ 0 & \text{иначе.} \end{cases}$$

Вещественные переменные:

- $\overline{W}_k^t$ — предложенный государством трансферт на компенсацию инфраструктурных затрат недропользователей и накладные расходы УК консорциума k ;
- W_k^t — реализованный государством трансферт на компенсацию инфраструктурных затрат недропользователей и накладные расходы УК консорциума k ;
- R_i^t — график компенсационных выплат частному инвестору i ;

• D_{ij} — доля инвестора i в совокупных затратах на строительство объекта инфраструктуры j ;

• $\Theta > 0$ — некоторое большое число.

Модель формирования ГЧП формулируется как следующая задача двухуровневого математического программирования.

Задача государства ($\widetilde{\text{PG}}$). Максимизировать дисконтированный поток бюджетных доходов

$$\sum_{t \in T} \left(\sum_{i \in I} \text{DBP}_i^t z_i + \sum_{j \in J} \text{VDI}_j^t c_j - \sum_{k \in K} W_k^t \right) / (1 + \text{DG})^t \rightarrow \max_{\overline{W}, z, c, W, R, D} \quad (1)$$

при условиях

$$\overline{W}_k^t \geq 0, \quad t \in T, k \in K, \quad (2)$$

$$\sum_{k \in K} \overline{W}_k^t \leq \text{BudG}^t, \quad t \in T, \quad (3)$$

$$(z, c, W, D, R) \in \mathcal{F}^*(\overline{W}), \quad (4)$$

где $\mathcal{F}^*$ — множество оптимальных решений для задачи консорциумов:

$$\begin{aligned} & \gamma \sum_{t \in T} \sum_{i \in I} \left((\text{CFP}_i^t - \text{ITCP}_i^t) z_i - \sum_{j \in J} (\text{ZI}_j^t + \text{ITCI}_j^t) D_{ij} + R_i^t \right) / (1 + \text{DI})^t + \\ & + (1 - \gamma) \sum_{t \in T} \left(\sum_{i \in I} \text{DBP}_i^t z_i + \sum_{j \in J} \text{VDI}_j^t c_j - \sum_{k \in K} W_k^t \right) / (1 + \text{DG})^t \rightarrow \\ & \rightarrow \max_{z, c, W, R, D} \end{aligned} \quad (5)$$

при условиях

$$W_k^t \leq \overline{W}_k^t, \quad t \in T, k \in K, \quad (6)$$

$$\sum_{t \in T} \left(\sum_{i \in I} \text{DBP}_i^t z_i \beta_{ki} + \sum_{j \in J} \text{VDI}_j^t c_j \alpha_{kj} - W_k^t \right) / (1 + \text{DG})^t \geq 0, \quad k \in K, \quad (7)$$

$$R_i^t = 0, \quad -T_1 \leq t \leq T_0, \quad i \in I, \quad (8)$$

$$R_i^t \geq 0, \quad T_0 + 1 \leq t \leq T_2, \quad i \in I, \quad (9)$$

$$R_i^t \leq \Theta z_i, \quad T_0 + 1 \leq t \leq T_2, \quad i \in I, \quad (10)$$

$$R_i^t \leq \Theta \sum_{j \in J} D_{ij} \text{ZI}_j^t, \quad T_0 + 1 \leq t \leq T_2, \quad i \in I, \quad (11)$$

$$\sum_{i \in I} R_i^t \beta_{ki} + \sum_{j \in J} \text{MTCI}_j^t c_j \alpha_{kj} + \sum_{i \in I} \text{MTCP}_i^t z_i \beta_{ki} \leq W_k^t, \quad k \in K, t \in T, \quad (12)$$

$$0 \leq D_{ij} \leq \mu_{ij} z_i, \quad i \in I, j \in J, \quad (13)$$

$$\sum_{i \in I} D_{ij} \beta_{ki} = \alpha_{kj} c_j, \quad k \in K, j \in J, \quad (14)$$

$$\sum_{t \in T} \sum_{i \in I} ((\text{CFP}_i^t - \text{ITCP}_i^t) z_i - (\text{ZI}_j^t + \text{ITCI}_j^t) D_{ij} + R_i^t) / (1 + \text{DI})^t \geq 0, \quad i \in I, \quad (15)$$

$$c_j \geq \mu_{ij} z_i, \quad i \in I, j \in J, \quad (16)$$

$$\sum_{1 \leq t \leq \omega} \left(-(\text{CFP}_i^t - \text{ITCP}_i^t) z_i + \sum_{j \in J} (\text{ZI}_j^t + \text{ITCI}_j^t) D_{ij} - R_i^t \right) \leq \sum_{1 \leq t \leq \omega} \text{BudI}_i^t, \quad \omega \in T, i \in I. \quad (17)$$

В сформулированной модели управляющие компании стремятся достичь компромисса интересов партнёров. Распределение инфраструктурных затрат и компенсаций государства происходит так, чтобы, с одной стороны, сгладить стремление инвесторов к получению максимально возможной ренты, а с другой, принять во внимание тот факт, что государство является собственником недр (5). С помощью параметра γ в модели фиксируется уровень значимости интересов инвесторов. Соотношения (13)–(15) определяют, каким образом затраты на инфраструктуру (с учётом трансакционных издержек) распределяются внутри консорциума. Инфраструктурные ограничения добычи минерального сырья определяются условием (16): производственный проект не реализуется при отсутствии необходимой производственной инфраструктуры. Бюджетные ограничения (2) и (17) имеют различную степень «жёсткости»: недропользователь может задействовать в следующем году финансовые средства, не израсходованные в текущем году.

Компенсации инвесторам начинают поступать с года $T_0 + 1$ ((8), (9)). Ограничение на бюджет управляющей компании (12) учитывает, что она несёт трансакционные издержки, возникающие со стороны государства. Поток выплат недропользователям должен не только гарантировать бюджету баланс доходов всех видов и трансфертов, направляемых консорциумам (7), но и обеспечить рентабельное возмещение затрат инвестора на инфраструктуру (15).

Необходимым условием образования консорциума является прирост целевой функции государства (7) в результате формирования соответствующей организационной структуры. В такой ситуации единый консорциум, включающий весь набор месторождений, проигрывает совокупности нескольких консорциумов, сформированных в соответствии с кластеризацией территории.

Представленная модель генерирует структуру партнёрства и соответствующую ей программу развития территории $\{c_j, z_i, R_i^t, D_{ij}\}$, в которой определён не только перечень запускаемых проектов, но и сформированы детали раздела затрат в долевом строительстве и стратегия компенсационных выплат.

2. Вопросы сложности

В данной статье рассматривается новая двухуровневая модель взаимодействия государства и частных инвесторов, использующая специальный механизм государственно-частного партнёрства с консорциумом. Структурные особенности такой модели не позволяют воспользоваться оценками вычислительной сложности ранее разработанных двухуровневых моделей ГЧП [8–10]. Оценка сложностного статуса рассматриваемой модели — практический путь уточнения класса эффективных алгоритмов для задач большой размерности. Полученные далее результаты объясняют, почему в работе авторы не пошли по пути разработки для задачи государства точных или приближённых полиномиальных алгоритмов с оценками отклонения полученного решения от оптимального.

Свяжем с задачей государства $\widehat{PG}$ стандартную задачу распознавания $D(\widehat{PG})$, в которой входными данными являются исходные данные задачи государства и произвольное рациональное число U . В задаче $D(\widehat{PG})$ мы должны решить, существует ли допустимое решение со значением целевой функции, большим или равным U . Задача $D(\widehat{PG})$ принадлежит классу Σ_2^P , если существует недетерминированная оракульная машина Тьюринга, распознающая задачу $D(\widehat{PG})$ за полиномиальное время, используя в качестве оракула некоторый язык из класса NP. Класс Σ_2^P относится ко второму уровню полиномиальной иерархии [14]. Задача оптимизации принадлежит классу NPO, если её стандартная задача решения принадлежит классу NP [14]. Аналогично класс $\Sigma_2^P O$ содержит оптимизационные задачи, для которых соответствующая стандартная задача распознавания принадлежит классу Σ_2^P [14]. Класс NPO относится к первому уровню иерархии аппроксимации, а класс $\Sigma_2^P O$ — ко второму уровню этой иерархии.

Покажем, что задача государства Σ_2^P -трудна для случая $\gamma = 1$, сведя Σ_2^P -полную задачу о сумме подмножеств на интервале (subset-sum-interval problem) к рассматриваемой задаче [15].

Задача о сумме подмножеств на интервале. Заданы целые положительные числа $q_1, \dots, q_l$, R и $r \leq l$. Спрашивается, найдётся ли целое число S такое, что $R \leq S < R + 2^r$ и не существует подмножеств $I \subseteq \{1, \dots, l\}$, удовлетворяющих равенству $\sum_{i \in I} q_i = S$.

Теорема 1. Задача $\widetilde{\text{PG}} \Sigma_2^P$ -трудна.

ДОКАЗАТЕЛЬСТВО. Сведём указанную задачу к задаче $\widetilde{\text{PG}}$, построив следующий вход задачи государства. Рассмотрим один консорциум (положим $\text{NC} = 1$), $\text{NP} = l + \lceil \log_2(R + 2^r) \rceil + 1$ производственных проектов и один общий для всех этих проектов инфраструктурный проект (положим $\text{NI} = 1$). Так как $\text{NI} = \text{NC} = 1$, имеем $\alpha_{11} = 1$, $\mu_{i1} = 1$ и $\beta_{1i} = 1$ для всех производственных проектов. Горизонт планирования составляет 3 года ($T_1 = T_0 = 0$, $T_2 = 3$). Положим $\text{DG} = \text{DI} = 0$.

Для первых l производственных проектов имеем

$$\text{CFP}_i^1 = 0, \quad \text{CFP}_i^2 = -2q_i, \quad \text{CFP}_i^3 = q_i.$$

Для проектов i , $l + 1 \leq i \leq l + \lceil \log_2(R + 2^r) \rceil$, положим

$$\text{CFP}_i^1 = 0, \quad \text{CFP}_{l+1}^2 = -2^{i-l}, \quad \text{CFP}_i^3 = 2^{i-l-1} - \varepsilon,$$

где $\varepsilon = 1/(\lceil \log_2(R + 2^r) \rceil + 1)$. Кроме того,

$$\text{CFP}_{\text{NP}}^1 = \text{CFP}_{\text{NP}}^2 = 0, \quad \text{CFP}_{\text{NP}}^3 = \Delta,$$

где $\Delta > 0$ — достаточно большое число, например $\Delta = 2(R + 2^r) + \sum_i q_i$.

Доходы государства от всех проектов в первые два года и для первых l проектов в третьем году равны 0. В графике налоговых платежей для проектов i , $l < i \leq \text{NP}$, положим $\text{DBP}_i^3 = \Delta$.

Для инфраструктурного проекта определим следующий график капитальных вложений:

$$\text{ZI}_1^1 = \sum_i q_i, \quad \text{ZI}_1^2 = \text{ZI}_1^3 = 0.$$

Бюджет государства по годам равен

$$\text{BudG}^1 = 2^r - 1, \quad \text{BudG}^2 = 2(R + 2^r - 1) + 1, \quad \text{BudG}^3 = 0.$$

Инвесторы имеют ненулевой бюджет только в первый год:

$$\begin{aligned} \text{BudI}_i^1 &= q_i, \quad i \leq l, \\ \text{BudI}_i^1 &= 2^{(i-l-1)}, \quad l < i < \text{NP}, \\ \text{BudI}_{\text{NP}}^1 &= \sum_i q_i - R - 2^r + 1. \end{aligned}$$

Все остальные параметры производственных (ITCP_i^t , MTCP_i^t) и инфраструктурных (VDI_j^t , MTCI_j^t , ITCI_j^t) проектов равны 0.

Структура данных задачи такова, что государство и консорциум будут стремиться реализовать инфраструктурный и последний инвестиционный проекты для получения дохода Δ . Однако инвестору NP для инфраструктурного проекта не хватает $R + 2^r - 1$ бюджетных средств.

Государство в первый год может дать $\overline{W}_1^1 \leq 2^r - 1$ бюджетных средств. Таким образом формируется дефицит бюджета $S = R + 2^r - 1 - \overline{W}_1^1$, который консорциум будет стремиться покрыть за счёт бюджетов других инвесторов, обеспечивая реализацию их инвестиционных проектов, которые не выгодны ни инвесторам, ни консорциуму. Это означает, что необходимо минимизировать остаток от бюджетов привлекаемых инвесторов.

Учитывая, что $R \leq S \leq R + 2^r - 1$, такой минимум легко найти, так как бюджеты инвесторов с номерами от $l + 1$ по $l + \lceil \log_2(R + 2^r) \rceil$ покрывают любое число в данном интервале, а следовательно, искомый минимум равен 0. При уменьшении доходов этих инвесторов в последний год на ε они становятся наименее привлекательны для консорциума. Если консорциум может покрыть величину S числами q_i , то он вообще не будет привлекать этих выгодных для государства клиентов. В противном случае привлечёт ровно одного, что даст государству дополнительный доход в Δ . Кроме того, бюджет государства во второй год позволяет не только компенсировать затраты инвесторов в первый год, но и выйти на неотрицательную прибыль для инвесторов с номерами от l до $l' = l + \lceil \log_2(R + 2^r) \rceil$, поэтому

$$\overline{W}_1^2 = 2S + \varepsilon \sum_{i=l+1}^{l'} z_i.$$

Таким образом, государство будет так выбирать $\overline{W}_1^1$, чтобы S не покрывалось числами q_i , если это возможно. Теорема 1 доказана.

Переменные $\overline{W}_j^t$ и W_j^t в задаче государства $\widetilde{\text{PG}}$ непрерывны. Это обстоятельство является причиной, которая не позволяет связать данную задачу с классом Σ_2^{PO} . Однако если предположить, что эти переменные целочисленны, то выполняется

Теорема 2. *Задача $\widetilde{\text{PG}}$ принадлежит классу Σ_2^{PO} .*

ДОКАЗАТЕЛЬСТВО может быть легко получено модификацией доказательства теоремы 3 из работы [9].

Теорема 3. *Если $\text{NPO} \neq \Sigma_2^{\text{PO}}$, то задача государства не может лежать в классах PO , FPTAS , PTAS , APX , Log-APX , Poly-APX , Exp-APX .*

ДОКАЗАТЕЛЬСТВО следует из определения аппроксимационной иерархии [16].

Полученные результаты оценки сложностного статуса рассматриваемой модели делают бессмысленными попытки построить для задачи государства точные или приближённые полиномиальные алгоритмы с теми

или иными оценками отклонения полученного решения от оптимального. Именно поэтому для решения задачи строится стохастический приближённый гибридный алгоритм, использующий локальный поиск и идеи метода покоординатного спуска [17].

Алгоритм вначале выбирает стартовое решение $\{W_k^t\}$, для получения которого решается одноуровневая задача с целевой функцией (1) и ограничениями верхнего и нижнего уровней (2), (3), (6)–(17). Стартовое решение становится текущим рекордом, который в ходе работы алгоритма будет улучшаться. Критерием остановки алгоритма является проведение I итераций подряд без улучшения рекорда. Локальный поиск идёт по значениям переменных текущего рекорда $\{\overline{W}_j^t\}$. На каждой итерации случайно выбирается заданная доля переменных, чьи значения поочерёдно варьируются. Для каждой из выбранных переменных выбирается N' случайных значений из интервала от 0 до той доли годового бюджета государства, которая остаётся свободной, используя равномерное распределение. Это означает, что любая выбранная переменная W_j^t определяет для текущего рекорда $\{\overline{W}_j^t\}$ окрестность из N' соседей. Для каждого пробного значения при условии, что выполнены ограничения (2), решается задача нижнего уровня и вычисляется значение целевой функции государства на найденном допустимом решении. Если эта величина больше текущего рекорда, то обновляем текущее значение переменной и рекорд. Иначе оставляем всё без изменений.

Алгоритм

ШАГ 1. Выбрать стартовое решение государства $\{W_k^t\}$; текущее лучшее решение $\{\overline{W}_k^t\}$ положить равным $\{W_k^t\}$; за рекорд принять значение целевой функции государства при $\{\overline{W}_k^t\}$, $k \in K$, $t \in T$.

ШАГ 2. Присвоить $i := 0$.

ШАГ 2.1. Если $i < I$, то присвоить $i := i + 1$, $k' := 1$, $t' := 1$, иначе перейти на шаг 3.

ШАГ 2.2. С вероятностью p перейти на шаг 2.2.1, иначе перейти на шаг 2.3.

ШАГ 2.2.1. Присвоить $N := 1$.

ШАГ 2.2.2. Выбрать значение переменной $\widehat{W}_{k'}^{t'}$ из интервала от 0 до $\text{BudG}^{t'} - \sum_{k \in K \setminus \{k'\}} \overline{W}_k^{t'}$, используя равномерное распределение.

ШАГ 2.2.3. Если при $\widehat{W}_k^t$ значение целевой функции государства выше рекорда, то обновить рекорд и присвоить $\overline{W}_k^t := \widehat{W}_k^t$, $i := 0$.

ШАГ 2.2.4. Если $N < N'$, то присвоить $N := N + 1$ и перейти на шаг 2.2.2.

ШАГ 2.3. Если $t' < T_2$, то присвоить $t' := t' + 1$ и перейти на шаг 2.2, иначе если $k' < \text{НС}$, то присвоить $k' := k' + 1$, $t' := 1$ и перейти на шаг 2.2, иначе перейти на шаг 2.1.

ШАГ 3. Вернуть наилучшее найденное решение $\{\overline{W}_k^t\}$ и рекордное значение целевой функции лидера.

Данный приближённый стохастический алгоритм отличается от классического метода покоординатного спуска следующими чертами.

1. На каждой итерации используется только часть переменных, которые выбираются случайным образом.
2. В отличие от классического метода, в котором рассматривается только два значения для каждой переменной (одно получено сдвигом с заданной длиной шага в направлении соответствующего координатного вектора, а другое получено сдвигом с тем же шагом в противоположном направлении), в предлагаемом алгоритме для любой выбранной переменной, которая рассматривается как равномерно распределённая на интервале от 0 до годового бюджета государства случайная величина, порождается N' значений.

3. Численный эксперимент

В качестве модельного полигона в экспериментах рассматриваются пять попарно не пересекающихся кластеров месторождений полиметаллов, 20 производственных и 10 инфраструктурных проектов, прообразами которых являются инфраструктурные проекты из Программы 2030 Забайкальского края: автодороги, линии электропередач, железная дорога Нарын — Лугокан. Полигон сконструирован таким образом, что запуск всех инфраструктурных проектов открывает возможность реализации всех производственных проектов.

Для двухуровневой задачи планирования база данных описывает модельный полигон и формируется на основе прогнозных имитационных моделей реализации проектов всех видов — добычи полезных ископаемых, строительства энергетической инфраструктуры, создания транспортных коммуникаций, предусмотренных Стратегией развития 2030 Забайкальского края [9].

Свойства равновесия по Штакельбергу для построенного полигона изучаются в ходе численного эксперимента, анализирующего, каким образом меняются решения сформулированной двухуровневой задачи математического программирования при вариации основных параметров модели. При этом нас будет интересовать, прежде всего, зависимость

экономической эффективности, полученной согласно модели программы развития, от ключевых факторов процесса принятия решений частным инвестором — качества инвестиционного климата, проводимой государством инвестиционной политики (либеральной или консервативной), величины трансакционных издержек, отражающих уровень развития институциональной инфраструктуры в региональном минерально-сырьевом секторе.

Дисконт инвестора в модели является индикатором качества инвестиционного климата. В расчётах для него используется диапазон от $DI = 0,07$ (благоприятный инвестиционный климат) до $DI = 0,15$ (тяжёлые условия для инвестирования), соответствующего экспертной оценке сегодняшних инвестиционных условий в Забайкальском крае.

Дисконт DG отражает основные свойства государственной инвестиционной политики и варьируется от 0,01 (либеральная инвестиционная политика, ориентированная на долгосрочные мультипликативные эффекты) до 0,07 (консервативная инвестиционная политика собственника недр с коротким горизонтом оценки последствий принимаемых решений). Либеральное государство понимает, что отдача от инвестирования бюджетных средств в инфраструктуру (в виде компенсаций) реализуется на долгосрочном горизонте.

Параметр γ , определяющий степень учёта интересов частного инвестора в модели, оказывает заметное влияние только на функционал системы консорциумов. Прочие характеристики программы в меньшей степени зависят от γ и существенно меняются лишь в диапазоне $0,8 \leq \gamma \leq 1$, зависящем, вообще говоря, от особенностей региона.

Для проведения численных экспериментов зафиксируем четыре основных сценария выбора государством экономической политики в зависимости от уровня благоприятности инвестиционного климата в регионе. Первые два сценария предполагают благоприятный инвестиционный климат ($DI = 0,07$) и проведение государством либеральной (консервативной) бюджетной политики, формально описываемой дисконтом $DG = 0,01$ ($DG = 0,07$). Третий и четвёртый сценарии реализуют неблагоприятные инвестиционные условия ($DI = 0,15$). Государство в третьем сценарии в процессе принятия управленческого решения будет использовать либеральный $DG = 0,01$, а четвёртый сценарий фиксирует переход государства к консервативной политике с $DG = 0,07$.

Для каждого из сценариев будем изучать поведение отдельных показателей эффективности программы освоения в зависимости от уровня трансакционных издержек, предполагая, что соответствующий диапазон ограничен пятью процентами суммарных инвестиционных вложений в проекте. Такое предположение вполне соответствует практике природно-ресурсного комплекса — уровень развития институтов в этой сфере

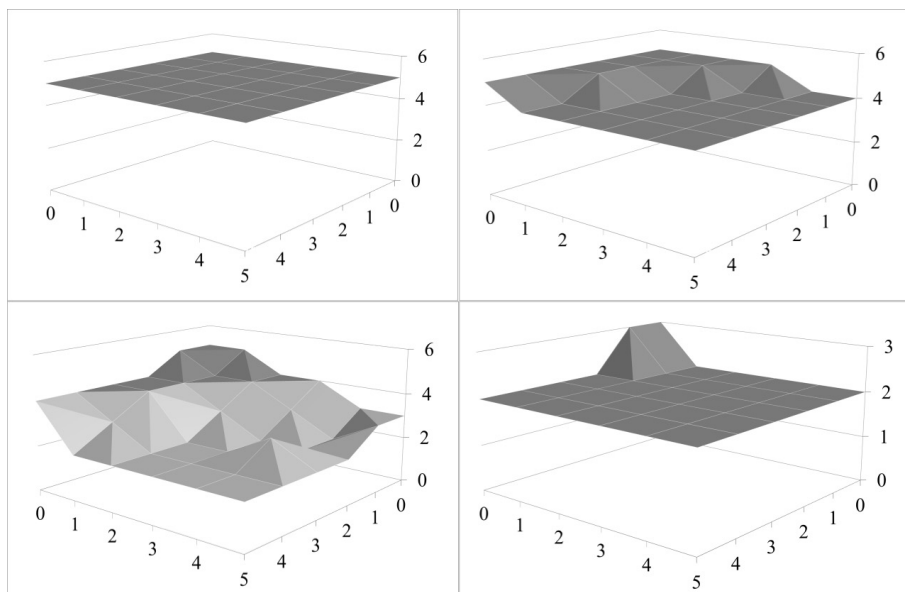


Рис. 1. Число образованных консорциумов

невысок и приводит к значительным затратам в процессе согласования интересов.

Какие показатели эффективности интересуют нас в первую очередь? Ключевой показатель для государства — бюджетный поток, включающий прямые налоговые доходы от освоения недр и ожидаемые мультипликативные эффекты от построенной в программе производственной инфраструктуры. В нём учтены понесённые затраты на формирование и содержание консорциумов, а также компенсации инфраструктурных затрат недропользователей. Именно таким образом построен целевой функционал задачи верхнего уровня, позволяющий ранжировать генерируемые моделью программы освоения недр в зависимости от выбранной бюджетной политики, особенностей сложившегося инвестиционного климата в регионе и уровня развития институтов.

Кроме бюджетного потока, нас интересует величина и структура затрат государства — в условиях бюджетного дефицита такая характеристика программы развития решающим образом влияет на процесс принятия решения. Помимо прямых характеристик затрат государства особую роль здесь играют оценки эффективности политики с точки зрения баланса стоимости новых инфраструктурных фондов и произведённых бюджетных расходов. Естественно ожидать положительности такого баланса, поскольку в противном случае государству проще построить ту же инфраструктуру за свой счёт.

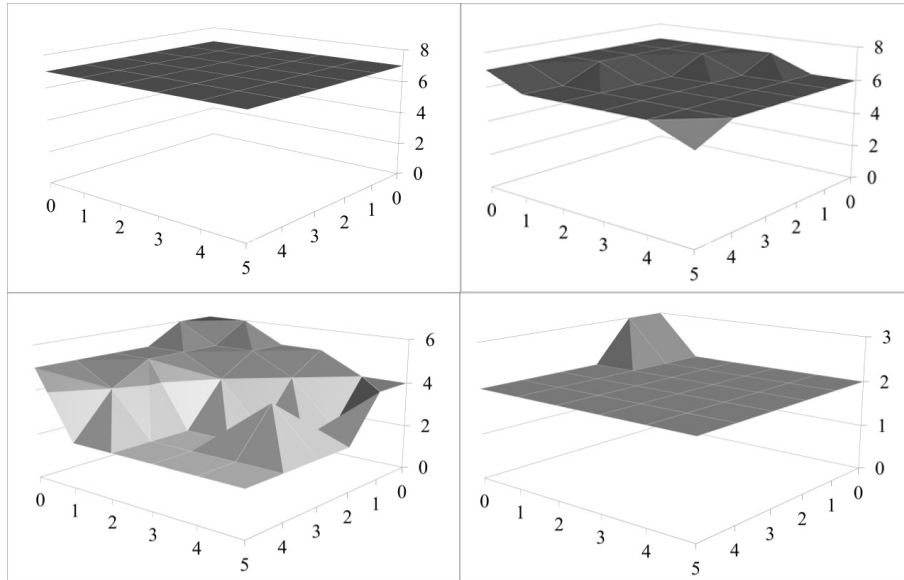


Рис. 2. Число реализованных инфраструктурных проектов

И наконец, привлекательность программы для частных инвесторов — полученный ими чистый дисконтированный доход — определяет степень достижения компромисса интересов партнёров и возможность практической реализации сгенерированной программы. Выбор месторождений для освоения и инфраструктурных проектов для реализации в сгенерированной модели программы позволяет сформировать перечисленные показатели эффективности партнёрства. Количественные характеристики производственной и инфраструктурной частей программы определяются тем набором консорциумов, для которых государство посчитало целесообразным образовать управляющие компании.

Каким образом интенсивность процесса формирования консорциумов зависит от инвестиционного климата, политики государства и уровня транзакционных издержек?

Результаты экспериментов представлены на рис. 1–8. Каждый из них состоит из четырёх фрагментов и устроен следующим образом: левый верхний квадрант содержит данные для сценария 1, правый верхний — для сценария 2, информация по третьему и четвёртому сценариям расположена в левом и правом нижних квадрантах соответственно. По осям отложены значения ТИ-до (левая на рис. 1–5, правая на рис. 6–8) и ТИ-после (правая на рис. 1–5, левая на рис. 6–8), выраженные в процентах от объёма капвложений.

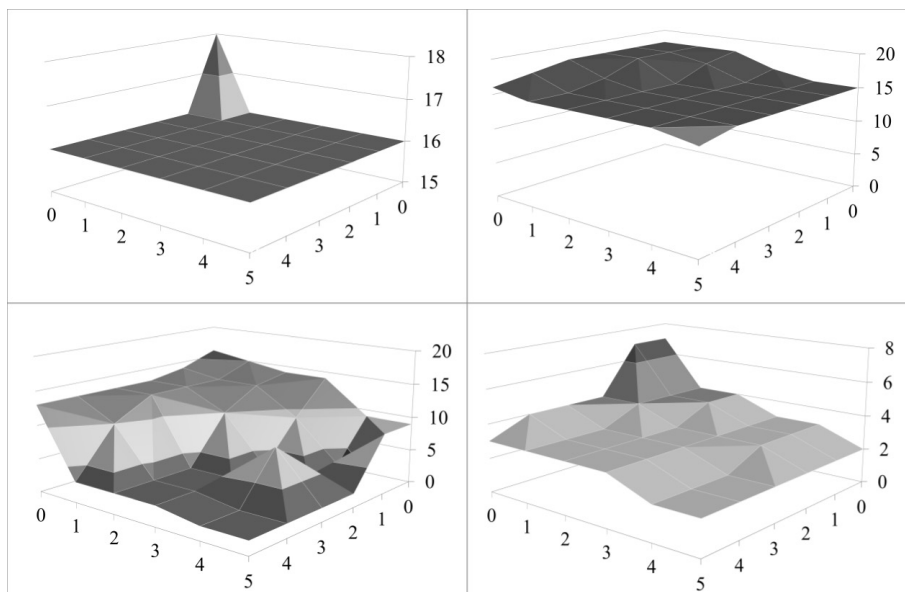


Рис. 3. Число реализованных проектов освоения месторождений

На рис. 1 видим, что в условиях первого сценария при любом уровне ТИ государство запускает все пять консорциумов, которые строят семь из десяти объектов производственной инфраструктуры (рис. 2). Это открывает возможность реализации, как минимум, шестнадцати из двадцати проектов освоения, а для нулевых ТИ их число доходит до 18 (рис. 3). Переход государства к консервативной политике в тех же благоприятных инвестиционных условиях влечёт за собой сокращение числа запускаемых консорциумов, производственных проектов и фронта инфраструктурного строительства при росте ТИ.

В неблагоприятном инвестиционном климате (сценарии 3, 4) все пять консорциумов формируются лишь при самых малых ТИ. Их рост приводит к существенному сокращению числа образованных УК в сценарии 3 и минимальному уровню программы освоения, сформированной консервативным государством на основе двух консорциумов практически при любом уровне ТИ (рис. 1). Число реализованных инфраструктурных и производственных проектов ведёт себя примерно так же (рис. 2, 3).

Зависящий от дисконтов партнёров и уровня ТИ выбор конкретного перечня осваиваемых месторождений и проектов транспортной и энергетической инфраструктуры для реализации в программе развития определяет поведение показателей эффективности программы в условиях разных сценариев. Функционал государства в благоприятном инвестиционном климате линейным образом зависит от ТИ, большую устойчивость

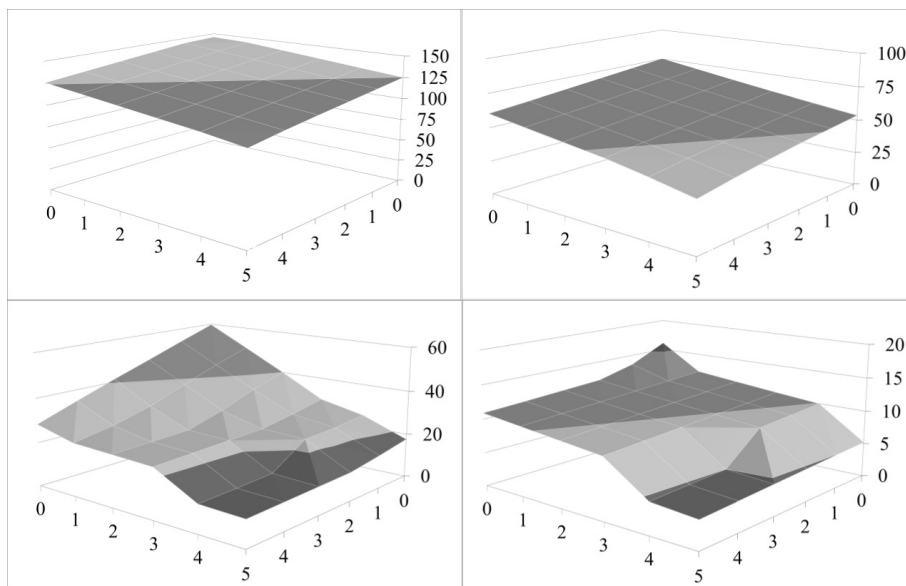


Рис. 4. Значение целевой функции государства (млрд руб.)

этому показателю придаёт либеральный характер государственной политики (рис. 4). Ухудшение инвестиционных условий для бизнеса в сценариях 3 и 4 существенно усугубляет негативное воздействие высоких ТИ,

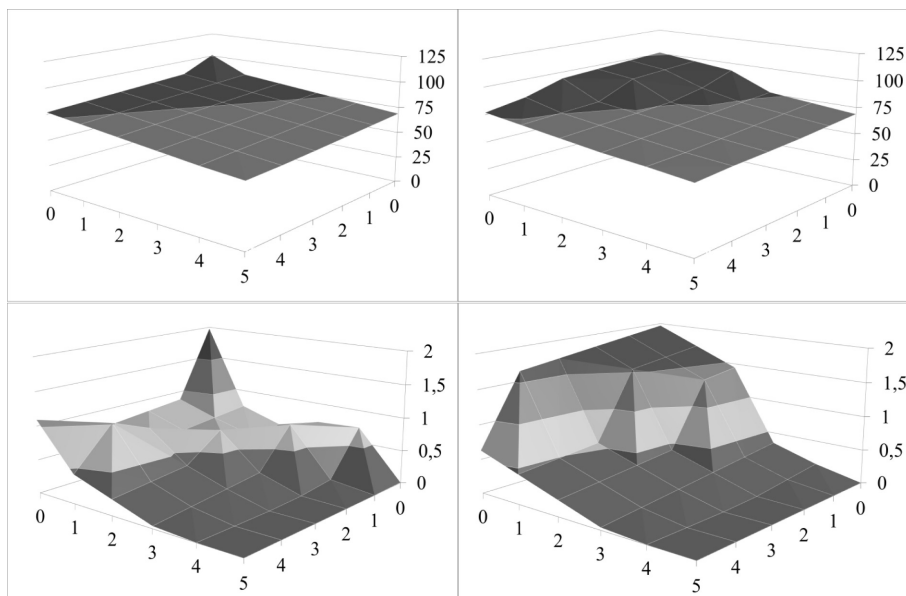


Рис. 5. Чистый дисконтированный доход инвесторов (млрд руб.)

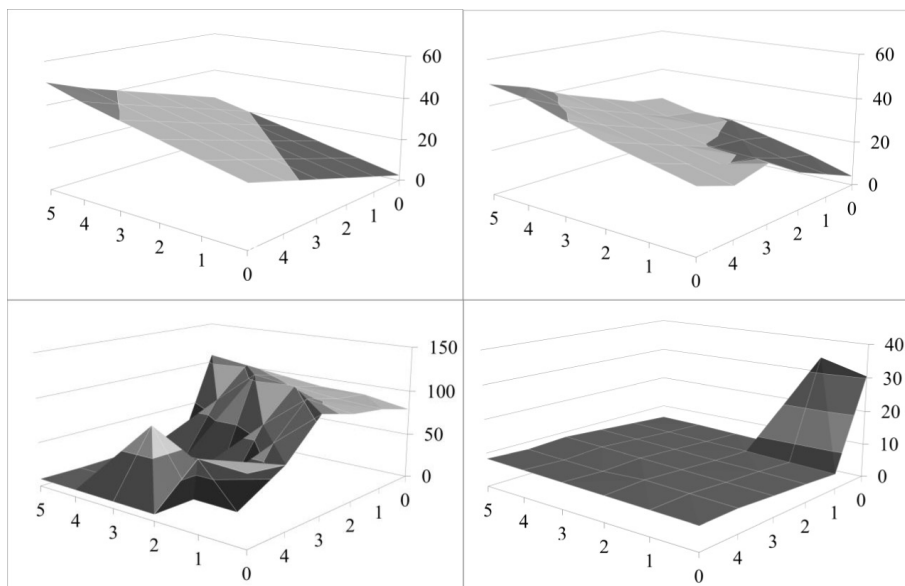


Рис. 6. Общие затраты государства на консорциумы и компенсации (млрд руб.)

особенно осязаемое при консервативной политике государства. Примерно так же рост ТИ влияет на чистый дисконтированный доход инвесторов: бизнесу нужен благоприятный инвестиционный климат, либеральное государство и развитые институты в недропользовании (рис. 5).

На рис. 6–7 представлена зависимость величины и структуры затрат государства от сценарных условий и уровня ТИ. В условиях благоприятного инвестиционного климата общие затраты государства практически линейно растут с ростом ТИ, при этом всё больше расходов требует функционирование УК, а удельный вес компенсационных выплат в государственных тратах стремительно падает (рис. 7).

Ухудшение общих инвестиционных условий для бизнеса в сценариях 3 и 4 приводит к существенно более сложной картине зависимости общих затрат государства от параметров модели. Общий вид соответствующих поверхностей на рис. 6 вполне соответствует характеру изменений интенсивности инфраструктурного строительства на рис. 2, но, в отличие от сценариев с благоприятным инвестиционным климатом, удельный вес расходов государства на компенсации превышает отметку в 70% для всех значений ТИ.

Как соотносятся стоимость новых, построенных в консорциумах инфраструктурных фондов и произведённые государством бюджетные расходы?

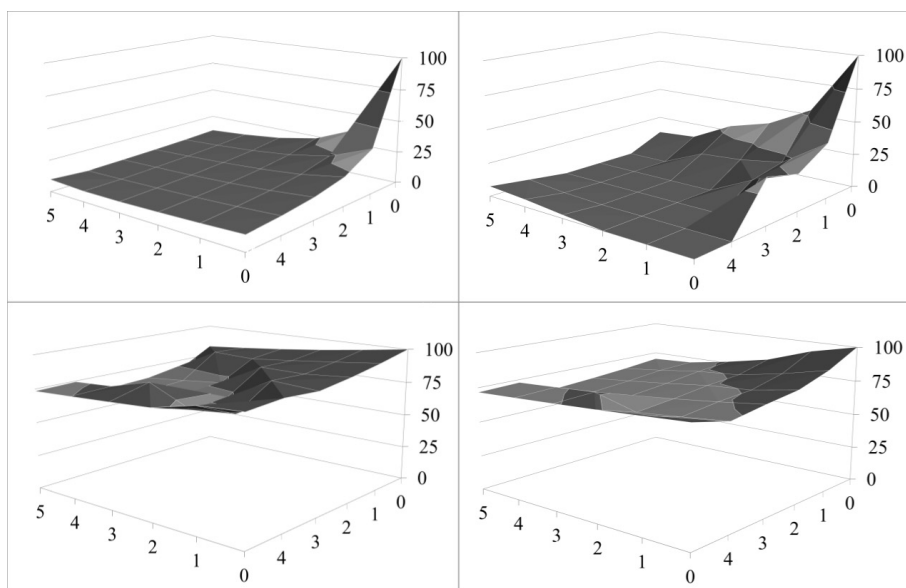


Рис. 7. Удельный вес затрат на компенсации в общих затратах государства (%)

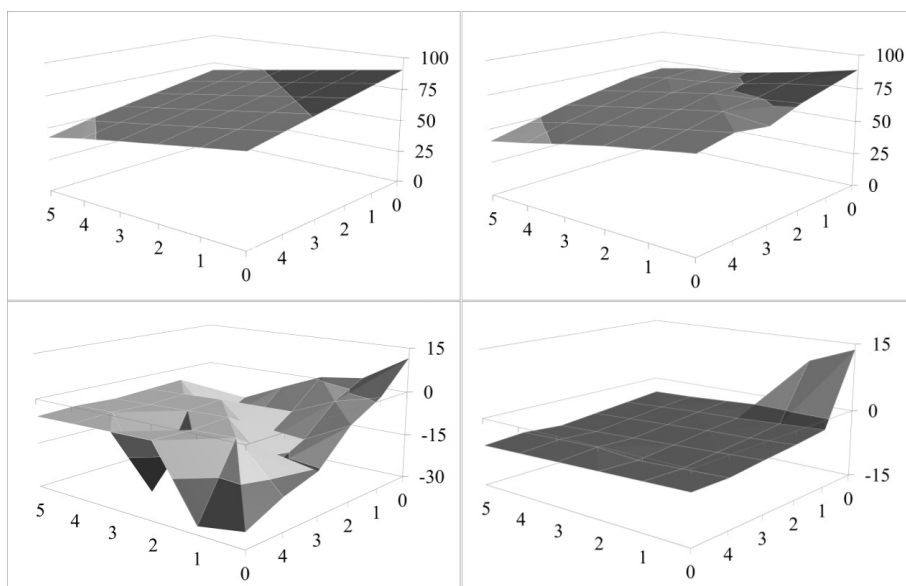


Рис. 8. Баланс стоимости новых инфраструктурных фондов и затрат государства (млрд руб.)

На рис. 8 представлена зависимость баланса стоимости созданных в программе инфраструктурных фондов и затрат государства при различных уровнях ТИ. Первые два сценария обеспечивают существенный выигрыш государства, сформировавшего программу освоения на основе консорциумов недропользователей, по сравнению с вариантом прямого финансирования строительства той же инфраструктуры за счёт бюджета. В регионе с неблагоприятным инвестиционным климатом картина существенно меняется: положительный баланс формируется только для самого малого уровня ТИ и не зависит от уровня либеральности политики государства. В этих условиях государству проще напрямую построить ту же инфраструктуру за свой счёт.

Сегодняшняя ситуация в минерально-сырьевом комплексе соответствует сценарию 4, а уровень ТИ в силу слабой договороспособности партнёров и отсутствия инструментов балансировки механизма долевого строительства чрезвычайно высок.

4. Обсуждение полученных результатов

Представленная модель (1)–(17) может служить основой для разработки инструментария, позволяющего поддерживать процесс формирования программы освоения минерально-сырьевой базы в региональных администрациях на основе описанного механизма ГЧП с консорциумом.

В работе получены оценки сложности исходной задачи и установлено:

1) задача государства Σ_2^P -трудна и принадлежит классу Σ_2^PO , если переменные $\bar{W}_k^t$ и W_k^t , определяющие компенсацию инфраструктурных затрат недропользователей и накладные расходы управляющих компаний консорциумов, принимают только целые значения;

2) если $NPO \neq \Sigma_2^PO$, то задача государства не может лежать в классах PO , $FPTAS$, $PTAS$, APX , $Log-APX$, $Poly-APX$, $Exp-APX$.

Из этих результатов следует, что для задачи государства не существует детерминированных точных и приближённых с относительными оценками уклонения от оптимума алгоритмов, имеющих трудоёмкость, ограниченную полиномом от длины исходных данных. Эти факты стали причиной разработки метода решения задачи, использующего стохастический приближённый гибридный алгоритм, основанный на идеях покоординатного спуска. Продемонстрированная применимость метода для случая большой размерности позволяет использовать его в реальном инструментарии решения исходной задачи — задачи формирования программы освоения минерально-сырьевой базы ресурсного региона на основе консорциума недропользователей.

Апробация созданного модельного инструментария на примере Забайкальского края показала возможность решения задач, возникающих

в практике управления ресурсным регионом с недостаточно развитой производственной инфраструктурой. Заложенный в технологию численного эксперимента процесс изучения свойств равновесия по Штакельбергу позволил связать эффективность сформированной в модели программы освоения с качеством инвестиционного климата, либеральностью проводимой государством инвестиционной политики и уровнем развития институциональной инфраструктуры. Такого рода содержательный анализ представляет собой наиболее сложный раздел долгосрочного стратегического планирования и чрезвычайно востребован практикой.

Полученные в работе содержательные результаты представляют существенный интерес для экономистов-практиков и могут быть распространены на целый ряд сибирских и дальневосточных регионов. Предложенный инструментарий в виде модели Штакельберга, методов решения соответствующей двухуровневой задачи и технологии изучения свойств равновесных решений образует основу для создания практической методологии формирования инвестиционной политики государства, стимулирующей приход частного инвестора на основе гармонизации целей и объединения ресурсов отдельных недропользователей.

Финансирование работы

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда (проект № 23–28–00849). Дополнительных грантов на проведение или руководство этим исследованием получено не было.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Литература

1. **Dao N. H., Marisetty V. B., Shi J., Tan M.** Institutional quality, investment efficiency, and the choice of public-private partnerships // Account. Finance. 2020. V. 60. P. 1801–1834. DOI: 10.1111/acfi.12514.
2. **Grimsey D., Lewis M. K.** Are public private partnerships value for money? // Account. Forum. 2005. V. 29, No. 4. P. 345–378.
3. **Karnes Y.** Are there optimal forms of public-private partnerships? // J. Behav. Appl. Manag. 2020. V. 20, No. 2. P. 51–68. DOI: 10.21818/001c.14178.
4. **Малов В. Ю., Тарасова О. В., Ионова В. Д.** Нижнее Приангарье как «связующее звено» между севером и югом Сибири // ЭКО. 2018. № 6. С. 50–74. DOI: 10.30680/EC00131-7652-2018-6-50-74.
5. **Glazyrina I. P., Faleychik L. M., Faleychik A. A.** Investments and the growth potential of the quality of life in the Russian Far East // Журн. Сиб. фед. ун-та. Сер. Гуманитар. науки. 2022. Т. 15, № 7. С. 921–929.

6. Самаруха В. И., Краснова Т. Г., Трусова С. В. Модель создания и реализации межрегионального проекта «Енисейская Сибирь» // Изв. Байкал. гос. ун-та. 2019. Т. 29, № 2. С. 324–331.
7. Bryukhanova E. A., Efimov V. S., Shishatsky N. G. Research on the issues of economic growth centres' establishment in the south of the Angara and Yenisei macroregion // Журн. Сиб. фед. ун-та. Сер. Гуманитар. науки. 2020. Т. 13, № 11. С. 1736–1745. DOI: 10.17516/1997-1370-0679.
8. Лавлинский С. М., Панин А. А., Плясунов А. В. Двухуровневая модель планирования государственно-частного партнёрства // Автоматика и телемеханика. 2015. № 11. С. 89–103. DOI: 10.1134/S0005117915110077.
9. Лавлинский С. М., Панин А. А., Плясунов А. В. Сравнение моделей планирования государственно-частного партнёрства // Дискрет. анализ и исслед. операций. 2016. Т. 23, № 3. С. 35–60. DOI: 10.17377/daio.2016.23.527.
10. Lavlinskii S. M., Panin A. A., Plyasunov A. V. Public-private partnership model with a consortium // Commun. Comput. Inf. Sci. 2023. V. 1881. P. 231–242. DOI: 10.1007/978-3-031-43257-6-18.
11. Marshall G. R. Transaction costs, collective action and adaptation in managing complex social-ecological systems // Ecol. Econ. 2013. V. 88. P. 185–194. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2012.12.030.
12. McCann L., Colby B., Easter K. W., Kasterine A., Kuperan K. V. Transaction cost measurement for evaluating environmental policies // Ecol. Econ. 2005. V. 52, No. 4. P. 527–542. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2004.08.002.
13. Ostrom E. A general framework for analyzing sustainability of social-ecological systems // Science. 2009. V. 325, No. 5939. P. 419–422. DOI: 10.1126/science.1172133.
14. Kochetov Yu. A., Plyasunov A. V., Panin A. A. Bilevel discrete optimisation: Computational complexity and applications // The Palgrave handbook of operations research. Cham: Palgrave Macmillan, 2022. P. 3–42. DOI: 10.1007/978-3-030-96935-6_1.
15. Caprara A., Carvalho M., Lodi A., Woeginger G. J. A study on the computational complexity of the bilevel knapsack problem // SIAM J. Optim. 2014. V. 24, No. 2. P. 823–838.
16. Панин А. А., Пащенко М. Г., Плясунов А. В. Двухуровневые модели конкурентного размещения производства и ценообразования // Автоматика и телемеханика. 2014. № 4. С. 153–169.
17. Васильев Ф. П. Численные методы решения экстремальных задач. М.: Глав. ред. физ.-мат. лит-ры, 1988. 552 с.
18. Alekseeva E. V., Kochetov Yu. A., Talbi E. G. A matheuristic for the discrete bilevel problem with multiple objectives at the lower level // Int. Trans. Oper. Res. 2017. V. 24, No. 5. P. 959–998. DOI: 10.1111/itor.12268.
19. Dempe S., Khamisov O., Kochetov Yu. A. A special three-level optimization problem // J. Global Optim. 2020. V. 76, No. 3. P. 519–531. DOI: 10.1007/s10898-019-00822-w.

- 20. Davydov I. A., Kochetov Yu. A., Dempe S.** Local search approach for the competitive facility location problem in mobile networks // Int. J. Artif. Intel. 2018. V. 16, No. 1. P. 130–143.

*Зырянов Александр Олегович
Лавлинский Сергей Михайлович
Панин Артём Александрович
Плясунов Александр Владимирович*

Статья поступила
22 августа 2024 г.
После доработки —
15 сентября 2024 г.
Принята к публикации
22 сентября 2024 г.

PUBLIC-PRIVATE PARTNERSHIP CONCERNING
INFRASTRUCTURE PROJECTS IN A RESOURCE REGION:
A MODEL BASED ON A CONSORTIUM OF SUBSOIL USERS

A. O. Zyryanov^a, S. M. Lavlinskii^b,
A. A. Panin^c, and A. V. Plyasunov^d

Sobolev Institute of Mathematics,
4 Acad. Koptug Avenue, 630090 Novosibirsk, Russia
E-mail: ^aalexander.zyryanov44@gmail.com, ^blavlin@math.nsc.ru,
^caapanin1988@gmail.com, ^dapljas@math.nsc.ru

Abstract. We propose a model for the formation of a resource region development program using a special mechanism of public-private partnership. It is based on the clustering of fields and the creation of a system of consortia of private investors jointly implementing projects for the construction of the necessary production infrastructure. The mechanism for achieving a compromise between the interests of the government and private investors uses the Stackelberg model, in which the government is the leader. It determines quotas of compensation of consortia's costs for the implementation of infrastructure projects. The role of the follower is assigned to the system of consortia, which forms the program of infrastructure construction. The solution of the corresponding bilevel mathematical programming problem allows us to form a targeted development plan. Its components are lists of infrastructure projects to be implemented in consortia, as well as schedules of costs for shared construction of infrastructure and their compensation from the budget for private investors. It is shown that the government problem is Σ_2^P -hard and belongs to the class $\Sigma_2^P\text{O}$ if the variables defining the transfer schedule take only integer values. A new stochastic approximate hybrid algorithm is developed to solve the two-level problem based on metaheuristics using the ideas of coordinate descent. The results of calculations on real data for the Zabaikalsky Krai allow us to formulate a set of practical recommendations on the formation of the mechanism of

shared construction and the policy of compensation payments. Illustr. 8, bibliogr. 20.

Keywords: bilevel problem of mathematical programming, Stackelberg model, metaheuristic, coordinate descent, polynomial hierarchy, approximation hierarchy, public-private partnership, production and infrastructure project, consortium of subsoil users.

References

1. N. H. Dao, V. B. Marisetty, J. Shi, and M. Tan, Institutional quality, investment efficiency, and the choice of public-private partnerships, *Account. Finance* **60**, 1801–1834 (2020), DOI: 10.1111/acfi.12514.
2. D. Grimsey and M. K. Lewis, Are public private partnerships value for money?, *Account. Forum* **29** (4), 345–378 (2005).
3. Y. Karnes, Are there optimal forms of public-private partnerships?, *J. Behav. Appl. Manag.* **20** (2), 51–68 (2020), DOI: 10.21818/001c.14178.
4. V. Yu. Malov, O. V. Tarasova, and V. D. Ionova, Lower Angara region as a link between the north and south of Siberia, *EKO*, No. 6, 50–74 (2018), DOI: 10.30680/EC00131-7652-2018-6-50-74 [Russian].
5. I. P. Glazyrina, L. M. Faleychik, and A. A. Faleychik, Investments and the growth potential of the quality of life in the Russian Far East, *Zh. Sib. Fed. Univ., Ser. Gumanit. Nauki* **15** (7), 921–929 (2022), DOI: 10.17516/1997-1370-0897.
6. V. I. Samarukha, T. G. Krasnova, and S. V. Trusova, The model for creation and implementation of the interregional project “Yenisei Siberia”, *Izv. Baikal. Gos. Univ.* **29** (2), 324–331 (2019) [Russian].
7. E. A. Bryukhanova, V. S. Efimov, and N. G. Shishatsky, Research on the issues of economic growth centres’ establishment in the south of the Angara and Yenisei macro-region, *Zh. Sib. Fed. Univ., Ser. Gumanit. Nauki* **13** (11), 1736–1745 (2020), DOI: 10.17516/1997-1370-0679.
8. S. M. Lavlinskii, A. A. Panin, and A. V. Plyasunov, A bilevel planning model for public-private partnership, *Avtom. Telemekh.*, No. 11, 89–103 (2015) [Russian] [*Autom. Remote Control* **76** (11), 1976–1987 (2015), DOI: 10.1134/S0005117915110077].
9. S. M. Lavlinskii, A. A. Panin, and A. V. Plyasunov, Comparison of models of planning public-private partnership, *Diskretn. Anal. Issled. Oper.* **23** (3), 35–60 (2016) [Russian], DOI: 10.17377/daio.2016.23.527 [*J. Appl. Ind. Math.* **10** (3), 356–369 (2016)].
10. S. M. Lavlinskii, A. A. Panin, and A. V. Plyasunov, Public-private partnership model with a consortium, *Commun. Comput. Inf. Sci.* **1881**, 231–242 (2023), DOI: 10.1007/978-3-031-43257-6-18.
11. G. R. Marshall, Transaction costs, collective action and adaptation in managing complex social–ecological systems, *Ecol. Econ.* **88**, 185–194 (2013), DOI: 10.1016/j.ecolecon.2012.12.030.

12. **L. McCann, B. Colby, K. W. Easter, A. Kasterine, and K. V. Kupe-
ran**, Transaction cost measurement for evaluating environmental policies, *Ecol.
Econ.* **52** (4), 527–542 (2005), DOI: 10.1016/j.ecolecon.2004.08.002.
13. **E. Ostrom**, A general framework for analyzing sustainability of social-
ecological systems, *Science* **325** (5939), 419–422 (2009), DOI: 10.1126/
science.1172133.
14. **Yu. A. Kochetov, A. V. Plyasunov, and A. A. Panin**, Bilevel discrete op-
timisation: Computational complexity and applications, in *The Palgrave Hand-
book of Operations Research* (Palgrave Macmillan, Cham, 2022), pp. 3–42, DOI:
10.1007/978-3-030-96935-6_1.
15. **A. Caprara, M. Carvalho, A. Lodi, and G. J. Woeginger**, A study on the
computational complexity of the bilevel knapsack problem, *SIAM J. Optim.*
24 (2), 823–838 (2014).
16. **A. A. Panin, M. G. Pashchenko, and A. V. Plyasunov**, Bilevel competi-
tive facility location and pricing problems, *Avtom. Telemekh.*, No. 4, 153–169
(2014) [Russian] [*Autom. Remote Control* **75** (4), 715–727 (2014)].
17. **F. P. Vasilyev**, *Numerical Methods for Solving Extremal Problems* (Glav. Red.
Fiz.-Mat. Lit., Moscow, 1988) [Russian].
18. **E. V. Alekseeva, Yu. A. Kochetov, and E. G. Talbi**, A matheuristic for
the discrete bilevel problem with multiple objectives at the lower level, *Int.
Trans. Oper. Res.* **24** (5), 959–998 (2017), DOI: 10.1111/itor.12268.
19. **S. Dempe, O. Khamisov, and Yu. A. Kochetov**, A special three-level op-
timization problem, *J. Global Optim.* **76** (3), 519–531 (2020), DOI: 10.1007/
s10898-019-00822-w.
20. **I. A. Davydov, Yu. A. Kochetov, and S. Dempe**, Local search approach
for the competitive facility location problem in mobile networks, *Int. J. Artif.
Intel.* **16** (1), 130–143 (2018).

Aleksandr O. Zyryanov
Sergey M. Lavlinskii
Artyom A. Panin
Aleksandr V. Plyasunov

Received August 22, 2024
Revised September 15, 2024
Accepted September 22, 2024