

Stochastic Local Search for the Strategic Planning Public-Private Partnership

Alexander A. Zyryanov¹, Yury A. Kochetov^{1,2}, and Sergey M. Lavlinskii^{1,2,3}

¹Sobolev Institute of Mathematics, Novosibirsk, Russia

²Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia

³Transbaikal State University, Chita, Russia

alexander.zyryanov44@gmail.com

jkochet@math.nsc.ru

lavlin@math.nsc.ru

Abstract. We present a new bi-level linear integer programming model for the strategic planning of the public-private partnership. This model is an extension of the previously studied models where the ecological, infrastructure, and production projects have known schedules into the planning horizon if they start. A stochastic local search matheuristic is designed for this new problem according to the upper level variables. The optimal solution for the lower level is obtained by CPLEX software. To reduce the running time, we use randomized Flip and Swap neighborhoods. To evaluate the neighboring solutions, we solve the lower level problem approximately with a small fixed deviation from the optimum. Computational results for real world instances for the Transbaikal polymetal fields are discussed.

Keywords: Stackelberg game · Bilevel mathematical programming problem · Public-private partnership · Local search

Стохастический локальный поиск для перспективного планирования государственно-частного партнерства¹

Александр А. Зырянов¹, Юрий А. Кочетов^{1,2}, Сергей М. Лавлинский^{1,2,3}

¹Институт математики СО РАН, Новосибирск, Россия

²Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

³Забайкальский государственный университет, Чита, Россия

alexander.zyryanov44@gmail.com

jkochet@math.nsc.ru

lavlin@math.nsc.ru

Аннотация. Представлена новая математическая модель формирования эффективного механизма взаимодействия государства и частного инвестора. Новая модель является развитием предшествующих моделей, в которых экологические, инфраструктурные и производственные проекты имели заданные графики выполнения, если их реализация оказывалась выгодной. В настоящей работе предполагается, что графики выполнения проектов могут сдвигаться по времени. Для решения задачи разработан стохастический метод локального поиска по переменным верхнего уровня (государства). Оптимальное решение нижнего уровня (инвестора) находится пакетом CPLEX. Для сокращения трудоемкости применяется рандомизация окрестностей Flip и Swap. При оценке соседних решений задача инвестора решается приближенно с заданной точностью. Методика использования такого подхода демонстрируется на примере Забайкалья. Для него строится программа освоения месторождений полиметаллов и исследуются свойства получаемых решений.

Ключевые слова: игра Штакельберга, двухуровневая задача математического программирования, государственно-частное партнерство, локальный поиск

Введение

Значительная часть проблем, связанных с освоением природных ресурсов на малоосвоенных территориях РФ, концентрируется в области разработки механизма согласования долгосрочных интересов государства и частного инвестора. Такой механизм должен обеспечить инвестиционную привлекательность, бюд-

¹ Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект 16-06-00046, 16-07-00319), РГНФ (проекты 16-02-00049, 16-02-00102).

жетные поступления и соблюдение экологических ограничений в процессе социально-экономического развития территории.

Эта проблема лежит в основе стратегического планирования, ядро которого – формирование программы освоения минерально-сырьевой базы. В рамках программы необходимо решить, какая производственная инфраструктура нужна для развития территории и привлечения инвесторов, и можно ли пойти на трату бюджетных средств для оказания помощи инвестору в инфраструктурном и природоохранном строительстве, не нарушая основных принципов устойчивого развития, сохранения природы и получения обществом наибольшей отдачи от природных ресурсов.

Государственно-частное партнерство (ГЧП) широко используется в мире и является эффективным инструментом достижения компромисса интересов в различных сферах экономики. Мировой опыт демонстрирует успешность использования механизма ГЧП, прежде всего, для создания новой и поддержания существующей инфраструктуры общественного сектора. В минерально-сырьевом комплексе государственно-частное партнерство позволяет существенно расширить источники финансирования проектов, заинтересовать недропользователей в освоении новых месторождений в труднодоступных районах.

В России положение дел с развитием ГЧП в минерально-сырьевом комплексе следует признать неудовлетворительным. Так, характерной здесь является ситуация, когда инвестор не может реализовать инвестиционный проект, поскольку для этого нет необходимой инфраструктуры, а государство не хочет вкладывать деньги в инфраструктуру, пока нет уверенности в том, что эта инфраструктура будет загружена. Практические примеры решения этой проблемы в российских условиях немногочисленны, не очень успешны и говорят о необходимости создания специального экономико-математического инструментария для поддержки процесса разработки эффективной модели ГЧП.

Эта проблема находится в центре внимания настоящей работы. Основная цель – разработка экономико-математических моделей формирования эффективного механизма партнерства, основанных на теоретико-игровой модели Штакельберга и решении двухуровневых задач булевого программирования. Такой подход позволяет найти компромисс экономических интересов и обеспечивает эффективность в долгосрочном плане не только частным инвесторам, но и государству, ставящему перед собой задачу стратегического управления минерально-сырьевым комплексом.

Настоящая работа продолжает исследования авторов [1,2], где рассматривались стационарные модели формирования ГЧП, в которых помощь государства включала инвестиции на развитие инфраструктуры и финансирование части компенсирующих природоохранных мероприятий, а моменты запуска проектов всех видов были заданы на входе. В настоящей статье формулируется обобщенный вариант модели в нестационарной постановке, генерирующий расписание моментов запуска отдельных проектов. Модели такого вида в наибольшей степени востребованы практикой территориального планирования и могут быть использованы для решения стратегических задач управления ресурсным регионом.

1. Постановка задачи

В условиях малоосвоенной ресурсной территории главенствующую роль в партнерстве должно играть государство – именно оно должно сделать первые шаги, создающие достаточные стимулы для прихода недропользователей. Проблема разработки эффективной модели партнерства в этих условиях сводится к задаче поиска пропорций использования основных рычагов государственной помощи инвестору – прямых государственных инвестиций на развитие инфраструктуры и финансирования части компенсирующих природоохранных мероприятий. Конкретная комбинация этих инструментов воздействия государства на экономику проекта и фиксированная схема проектного финансирования во многом определяют и уровень рентабельности для инвестора, и эффективность использования природных ресурсов для общества – долю природно-ресурсной ренты, которую получает государство в виде налоговых платежей. Механизм партнерства эффективен, если достигнут компромисс интересов в паре «государство-инвестор», выражающийся в том, что инвестор в проекте достигает нужного уровня рентабельности, а государство получает возможно большую часть ренты как части стоимости, созданной природой.

Такая схема концептуальной модели партнерства в минерально-сырьевом секторе России содержательно естественным образом вкладывается в философию двухуровневого программирования. Процедура взаимодействия «лидер-ведомый», положенная в основу модели Штакельберга, в наибольшей степени подходит для условий рыночной экономики и малоосвоенной ресурсной территории, где роль лидера в партнерстве отведена государству, своими действиями создающему дополнительные стимулы для прихода инвесторов. В соответствии с этим и строится задача лидера, в которой государство принимает решение, основываясь на своих бюджетных ограничениях и рациональном ответе частного инвестора, стремящегося максимизировать свой доход.

При этом необходимо учесть нестационарный характер сырьевых рынков (см. рис. 1) – практика управления минерально-сырьевым комплексом выделяет именно его в качестве ключевого фактора, определяющего результаты освоения месторождения. Волнообразный характер динамики цен и большая амплитуда создают существенные трудности в процессе принятия инвестиционного решения. Выбор момента «запуска» процесса освоения месторождения определяет, на какой фрагмент волны приходится момент выхода рудника на проектную мощность. В идеальном случае разработку месторождения следует начинать таким образом, чтобы «попасть» в среднюю часть подъема ценовой волны и максимальное время продавать продукцию по высоким ценам. Еще больше задача усложняется, если мы начинаем конструировать целую программу освоения природных богатств, в которой моменты запусков отдельных проектов должны быть гармонизированы не только с рыночной конъюнктурой, но и между собой.

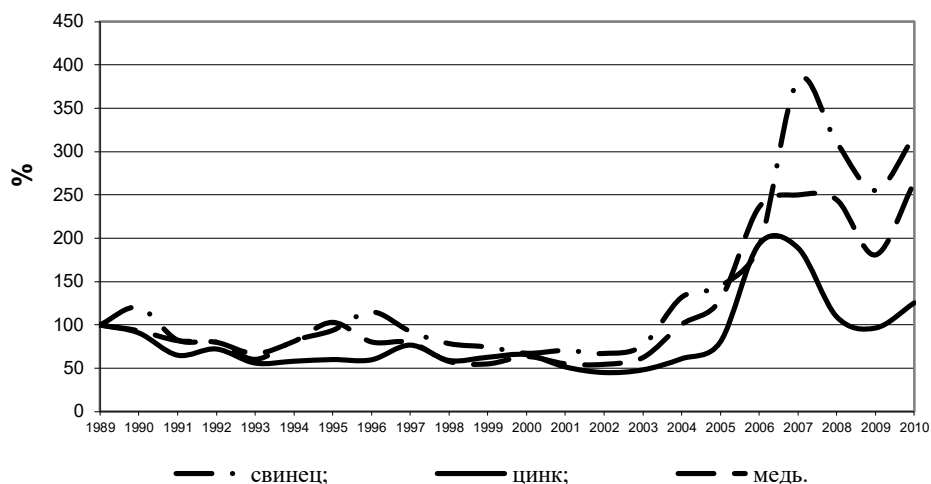


Рис. 1. Динамика относительных цен на некоторые металлы (мировой рынок, цена 1989 г. - 100 %).

Каким образом это обстоятельство может быть учтено в процессе формирования программы освоения минерально-сырьевой базы (МСБ) на основе механизма ГЧП?

Нестационарная модель ГЧП развивает подход, предложенный в [1,2] и формулируется в виде задачи двухуровневого булевого программирования, решение которой уже учитывает возможность взаимных сдвигов моментов стартов отдельных проектов и генерирует оптимальный механизм взаимодействия частного инвестора и государства.

На входе модели задаются:

- набор инвестиционных проектов, реализуемых частным инвестором, моменты запуска и конкретную конфигурацию которых инвестор выбирает в зависимости от того, что предлагает государство в области инфраструктурного строительства;
- набор инфраструктурных проектов, реализуемых государством, конкретный перечень которых и моменты запуска государство выбирает, исходя из своих оценок эффективности с точки зрения перспектив долгосрочного развития территории;
- перечень экологических проектов, необходимых для компенсации экологических потерь, вызванных реализацией инвестиционных проектов; конкретный раздел обязательств по реализации экологических проектов между частным инвестором и государством на входе не определен и должен быть получен на выходе модели.

Выход модели – расписание старта проектов всех видов и механизм раздела затрат в процессе реализации экологических проектов между государством и инвестором.

Введем следующие обозначения.

NP, NI, NE – число производственных, инфраструктурных и экологических проектов, T – временной горизонт планирования, $i = 1, \dots, NP$, $j = 1, \dots, NI$, $k = 1, \dots, NE$, $t = 1, \dots, T$, $\tau = 1, \dots, T$.

Булевы переменные:

$z_{i\tau} = 1$, если инвестор в году τ запускает производственный проект i , и $z_{i\tau} = 0$ в противном случае;

$x_{j\tau} = 1$, если государство в году τ запускает инфраструктурный проект j , $x_{j\tau} = 0$ в противном случае;

$y_{k\tau} = 1$, если государство в году τ запускает экологический проект k , и $y_{k\tau} = 0$ в противном случае;

$u_{k\tau} = 1$, если инвестор в году τ запускает экологический проект k , $u_{k\tau} = 0$ в противном случае.

Производственные проекты

$CFP_{i\tau}^t$ – кэшфло производственного проекта i , стартовавшего в году τ .

$ERP_{i\tau}^t$ – стоимостная оценка экологических потерь при реализации производственного проекта i , стартовавшего в году τ .

$DBP_{i\tau}^t$ – доходы бюджета от реализации производственного проекта i , стартовавшего в году τ .

$ZPP_{i\tau}^t$ – зарплата, выплачиваемая в ходе реализации производственного проекта i , стартовавшего в году τ .

Инфраструктурные проекты

$ZI_{j\tau}^t$ – затраты на реализацию инфраструктурного проекта j , стартовавшего в году τ .

$EPI_{j\tau}^t$ – стоимостная оценка экологических потерь при реализации инфраструктурного проекта j , стартовавшего в году τ .

$VDI_{j\tau}^t$ – внепроектные доходы бюджета от реализации инфраструктурного проекта j , стартовавшего в году τ , связанные с общим развитием экономики территории.

$ZPI_{j\tau}^t$ – зарплата, выплачиваемая в ходе реализации инфраструктурного проекта j , стартовавшего в году τ .

Экологические проекты

$ZE_{k\tau}^t$ – график затрат на реализацию экологического проекта k , стартовавшего в году τ .

$EDE_{k\tau}^t$ – стоимостная оценка экологического дохода при реализации экологического проекта k , стартовавшего в году τ .

$ZPE_{k\tau}^t$ – зарплата, выплачиваемая в ходе реализации экологического проекта k , стартовавшего в году τ .

Взаимосвязь проектов

μ_{ij} – индикатор технологической связности производственных и инфраструктурных проектов, равный 1, если для реализации производственного проекта i

необходима реализация инфраструктурного проекта j , и равный 0 в противоположном случае.

v_{ik} – индикатор связности производственных и экологических проектов, равный 1, если реализация производственного проекта i влечет необходимость реализации экологического проекта k , и равный 0 в противоположном случае.

Возможные взаимные сдвиги моментов старта проектов задаются следующими параметрами:

η_{ij} – матрица взаимного временного лага производственных и инфраструктурных проектов, фиксирующая минимальное число лет, разделяющее год старта производственного и год старта задействованного инфраструктурного проекта, $i = 1, \dots, NP, j = 1, \dots, NI$;

ψ_{ik}, γ_{ik} – матрицы взаимного временного лага производственных и экологических проектов, фиксирующие, на сколько лет раньше (ψ_{ik}), и позже (γ_{ik}) экологического не может быть запущен производственный, $i = 1, \dots, NP, k = 1, \dots, NE$.

Дисконты и бюджетные ограничения

DG – дисконт государства, DI – дисконт инвестора.

b_t^G, b_t^I – бюджетные ограничения государства и инвестора в году t .

Нестационарная постановка модели взаимодействия государства и частного инвестора на основе сформулированных принципов ГЧП может быть представлена следующим образом.

Задача государства

Максимизировать дисконтированный поток наличности пары «государство-население»:

$$\begin{aligned} & \sum_{t=1}^T \left(\sum_{i=1}^{NP} \sum_{\tau=1}^T (DBP_{i\tau}^t + ZPP_{i\tau}^t - EPP_{i\tau}^t) z_{i\tau} + \right. \\ & \sum_{j=1}^{NI} \sum_{\tau=1}^T (VDI_{j\tau}^t + ZPI_{j\tau}^t - EPI_{j\tau}^t - ZI_{j\tau}^t) x_{j\tau} + \\ & \sum_{k=1}^{NE} \sum_{\tau=1}^T (EDE_{k\tau}^t + ZPE_{k\tau}^t - ZE_{k\tau}^t) y_{k\tau} + \\ & \left. \sum_{k=1}^{NE} \sum_{\tau=1}^T (EDE_{k\tau}^t + ZPE_{k\tau}^t) u_{k\tau} \right) / (1 + DG)^t \Rightarrow \max \end{aligned} \tag{1}$$

при условиях

$$\sum_{j=1}^{NI} \sum_{\tau=1}^T ZI_{j\tau}^t x_{j\tau} + \sum_{k=1}^{NE} \sum_{\tau=1}^T ZE_{k\tau}^t y_{k\tau} \leq b_t^G, \quad t = 1, \dots, T, \tag{2}$$

$$\sum_{\tau=1}^T x_{j\tau} \leq 1, \quad j = 1, \dots, NI, \tag{3}$$

$$\sum_{\tau=1}^T y_{k\tau} \leq 1, \quad k = 1, \dots, NE, \quad (4)$$

$$x_{j\tau}, y_{k\tau} \in \{0,1\}, \quad i = 1, \dots, NP, j = 1, \dots, NI, k = 1, \dots, NE, \tau = 1, \dots, T, \quad (5)$$

$$(z, u) \in F^*(x, y). \quad (6)$$

Задача инвестора

Инвестор максимизирует свой суммарный чистый приведенный доход:

$$\sum_{t=1}^T \left(\sum_{i=1}^{NP} \sum_{\tau=1}^T CFP_{i\tau}^t z_{i\tau} - \sum_{k=1}^{NE} \sum_{\tau=1}^T ZE_{k\tau}^t u_{k\tau} \right) / (1 + DI)^t \Rightarrow \max \quad (7)$$

при условиях

$$-\sum_{i=1}^{NP} \sum_{\tau=1}^T CFP_{i\tau}^t z_{i\tau} + \sum_{k=1}^{NE} \sum_{\tau=1}^T ZE_{k\tau}^t u_{k\tau} \leq b_t^0, \quad t = 1, \dots, T, \quad (8)$$

$$\sum_{\tau=1}^T x_{j\tau} \geq \mu_{ij} \sum_{\tau=1}^T z_{i\tau}, \quad i = 1, \dots, NP, \quad j = 1, \dots, NI, \quad (9)$$

$$\sum_{\tau=1}^T (y_{k\tau} + u_{k\tau}) \geq v_{ik} \sum_{\tau=1}^T z_{i\tau}, \quad i = 1, \dots, NP, \quad k = 1, \dots, NE, \quad (10)$$

$$\sum_{\tau=1}^T (y_{k\tau} + u_{k\tau}) \leq 1, \quad k = 1, \dots, NE, \quad (11)$$

$$\sum_{\tau=1}^T u_{k\tau} \leq 1, \quad k = 1, \dots, NE, \quad (12)$$

$$\sum_{\tau=1}^T z_{i\tau} \leq 1, \quad i = 1, \dots, NP, \quad (13)$$

$$\sum_{\tau=1}^T (y_{k\tau} + u_{k\tau}) \leq \sum_{i=1}^{NP} v_{ik} \sum_{\tau=1}^T z_{i\tau}, \quad i = 1, \dots, NP, \quad k = 1, \dots, NE, \quad (14)$$

$$x_{j\tau} + \mu_{ij} \sum_{\rho=\min\{T, \tau+\eta_{ij}\}}^T z_{i\rho} \leq 1, \quad i = 1, \dots, NP, \quad j = 1, \dots, NI, \quad \tau = 1, \dots, T, \quad (15)$$

$$y_{k\tau} + u_{k\tau} + v_{ik} \sum_{\rho=\max\{1, \tau-\psi_{ij}\}}^T z_{i\rho} \leq 1, \quad i = 1, \dots, NP, \quad k = 1, \dots, NE, \quad \tau = 1, \dots, T, \quad (16)$$

$$v_{ik} \sum_{\rho=1}^{\psi_{ik}} z_{i\rho} = 0, \quad i = 1, \dots, NP, \quad k = 1, \dots, NE, \quad (17)$$

$$y_{k\tau} + u_{k\tau} + v_{ik} \sum_{\rho=\min\{T,\tau+\gamma_{ik}\}}^T z_{i\rho} \leq 1, \quad \begin{matrix} i = 1, \dots, NP, k = 1, \dots, NE, \\ \tau = 1, \dots, T, \end{matrix} \quad (18)$$

$$z_{i\tau}, u_{k\tau} \in \{0,1\}, \quad i = 1, \dots, NP, k = 1, \dots, NE, \tau = 1, \dots, T. \quad (19)$$

В сформулированной модели государство максимизирует аналог чистого дисконтированного дохода от реализации всей программы освоения, при этом целевая функция строится с учетом интересов населения и учитывает экономический выигрыш от появления новых рабочих мест и сопутствующие этому экологические потери. Ограничения (9), (10) гарантируют запуск экологических и инфраструктурных проектов необходимых для старта производственных проектов. Ограничения (3),(4),(12),(13) определяют однократность запуска проектов, а (11),(14) гарантируют, что экологический проект не может быть запущен, если он не нужен ни для какого из запущенных производственных. Временная взаимосвязь проектов различного вида описывается в (15)–(18) с учетом того обстоятельства, что, в общем случае, производственный проект может быть начат ранее момента завершения инфраструктурного, а экологический – в некотором диапазоне момента завершения производственного.

Наряду со стандартными бюджетными ограничениями (2),(8) мы будем рассматривать и более «мягкую» их форму, позволяющую переход неизрасходованных в текущем году средств на следующий год.

$$\sum_{1 \leq t \leq \omega} \left(\sum_{j=1}^{NI} \sum_{\tau=1}^T ZI_{j\tau}^t x_{j\tau} + \sum_{k=1}^{NE} \sum_{\tau=1}^T ZE_{k\tau}^t y_{k\tau} \right) \leq \sum_{1 \leq t \leq \omega} b_t^G, \quad \omega = 1, \dots, T, \quad (2a)$$

$$\sum_{1 \leq t \leq \omega} \left(- \sum_{i=1}^{NP} \sum_{\tau=1}^T CFP_{i\tau}^t z_{i\tau} + \sum_{k=1}^{NE} \sum_{\tau=1}^T ZE_{k\tau}^t u_{k\tau} \right) \leq \sum_{1 \leq t \leq \omega} b_t^O, \quad \omega = 1, \dots, T, \quad (8a)$$

Отметим, что задачи двухуровневого программирования такой структуры, когда внутренняя задача является NP-трудной, часто оказываются более сложными с вычислительной точки зрения, чем широко известные NP-полные задачи [5–8]. В связи с этим для их решения применяются метаэвристики, способные быстро находить решения с небольшой погрешностью [9–12].

2. Стохастический локальный поиск с запретами

Для решения задачи (1)–(19) разработан стохастический метод локального поиска с запретами по переменным $s = (x_{j\tau}, y_{k\tau})$ верхнего уровня (государства). Соответствующее решение нижнего уровня (инвестора) находится методом ветвей и границ с помощью пакета CPLEX. Такой подход показал свою эффективность при решении многих задач двухуровневого программирования [13–14].

В качестве окрестности $N(s)$ решения s используются все решения, получаемые из данного применением одной из следующих операций:

- открытием нового проекта;
 - закрытием одного из уже открытых проектов;
 - сдвигом старта одного из проектов на более раннее или более позднее время.
- Для диверсификации поиска и сокращения трудоемкости одной итерации применяется процедура рандомизации окрестности [10–11]: каждое соседнее решение включается в рандомизированную окрестность $N_p(s)$ с заданной вероятностью p независимо от других решений. Общая схема алгоритма поиска с запретами для максимизации целевой функции (1) – дисконтированного потока наличности $f(s)$ пары «государство–население» – может быть представлена следующим образом.

Алгоритм STS

1. Выбрать начальное решение s и положить $f^* := f(s)$, $s^* := s$, $Tabu_l(s) := \emptyset$.
2. Повторять, пока не выполнен критерий остановки:
 - 2.1. Сформировать окрестность $N_p(s)$.
 - 2.2. Если $N_p(s) \neq \emptyset$, то найти такое решение s' , что

$$f(s') = \max\{f(j) \mid j \in N_p(s) \setminus Tabu_l(s)\}.$$
 - 2.3. Если $f^* < f(s')$, то $f^* := f(s')$ и $s^* := s'$.
 - 2.4. Положить $s := s'$ и обновить список запретов.
3. Предъявить наилучшее найденное решение s^* .

Параметр p рандомизации окрестности $N_p(s)$ и длина списка запретов l для множества $Tabu_l(s)$ являются управляющими для данного алгоритма. Выбор их значений зависит от размерности задачи и мощности окрестности. В численных экспериментах значение параметра p выбиралось из интервала [0.01–0.05]. Длина списка запретов l полагалась равной 10. Список запретов включает в себя номера проектов, открытие, закрытие или сдвиг которых по времени производился на последних l итерациях. В качестве стартового решения используется точное решение задачи без учета интересов инвестора [12]. Критерием остановки алгоритма выступает общее число итераций, которое в экспериментах не превышало 1000. Если существует несколько оптимальных решений нижнего уровня при заданном решении s , то принято выделять различать оптимистические и пессимистические решения исходной задачи (1)–(19) [9, 10, 12]. Ниже будут рассматриваться только оптимистические решения.

3. Численный эксперимент

Для демонстрации методики использования описанного инструментария в работе строится специальный модельный полигон, прообразом которого является набор из 50 месторождений полиметаллических руд Забайкальского края. Для него строится набор из 10 инфраструктурных проектов, часть из которых уже

реализуется (железная дорога, ЛЭП), а другие восполняют отсутствующую на сегодня, но необходимую с учетом проектов освоения месторождений инфраструктуру (ЛЭП, автомобильные дороги). Для каждого из месторождений набор компенсирующих природоохранных мероприятий интегрировался в соответствующий комплексный экологический проект.

Таким способом разработанный модельный полигон позволяет учесть специфику моделируемого объекта и создает информационную базу для изучения свойств равновесия по Штакельбергу. Методика такого исследования основана на анализе чувствительности решений соответствующей двухуровневой задачи булевого программирования к изменению основных параметров модели. Этот вопрос принципиально важен, прежде всего, потому, что для многих параметров модели известны лишь рабочие диапазоны значений. Так, в процессе формирования программы освоения недр эксперт располагает лишь данными проектов, а значительная часть параметров, таких как дисконты участников партнерства, экологические затраты и потери, могут быть оценены им лишь приближенно.

При некоторых предположениях относительно возможностей государства исходная двухуровневая постановка задачи планирования может быть существенно упрощена и сведена к одноуровневой задаче математического программирования. Это возможно, если государство полностью информировано о технологических проектах освоения месторождений и бюджетных ограничениях инвестора. Тогда исходная двухуровневая модель трансформируется в задачу булева программирования с переменными $z_{it}, u_{kt}, y_{kt}, x_{jt} \in \{0,1\}$, целевой функцией государства (1) и ограничениями (2)–(5), (8)–(19). Такая одноуровневая постановка в большей степени описывает экономику с доминирующей ролью государства в минерально-сырьевом секторе, но оказывается удобной для понимания того, что дает переход от одноуровневой к двухуровневой постановке.

На последующих рисунках приведены результаты расчетов, в которых анализировалась чувствительность решения задачи к изменению ключевых параметров модели – дисконтов инвестора и государства. В расчетах сравнивались четыре модели – двухуровневая и одноуровневая с бюджетными ограничениями в «жесткой» ((2), (8)) и «мягкой» ((2а), (8а)) форме.

Во всех постановках для малых дисконтов партнеров государство реализует полную инфраструктурную программу, открывая инвестору возможность освоения всего комплекса месторождений (рис. 2). При росте дисконтов государство, начиная с некоторого уровня, сворачивает инфраструктурную программу со скоростью, зависящей от постановки.

Наибольшую устойчивость объему инфраструктурного и производственного строительства обеспечивает одноуровневая постановка с мягкими бюджетными ограничениями (см. рис. 3). В общем случае по числу реализованных проектов освоения месторождений двухуровневые модели уступают одноуровневым, а мягкие бюджетные ограничения создают дополнительные возможности расширения фронта работ.

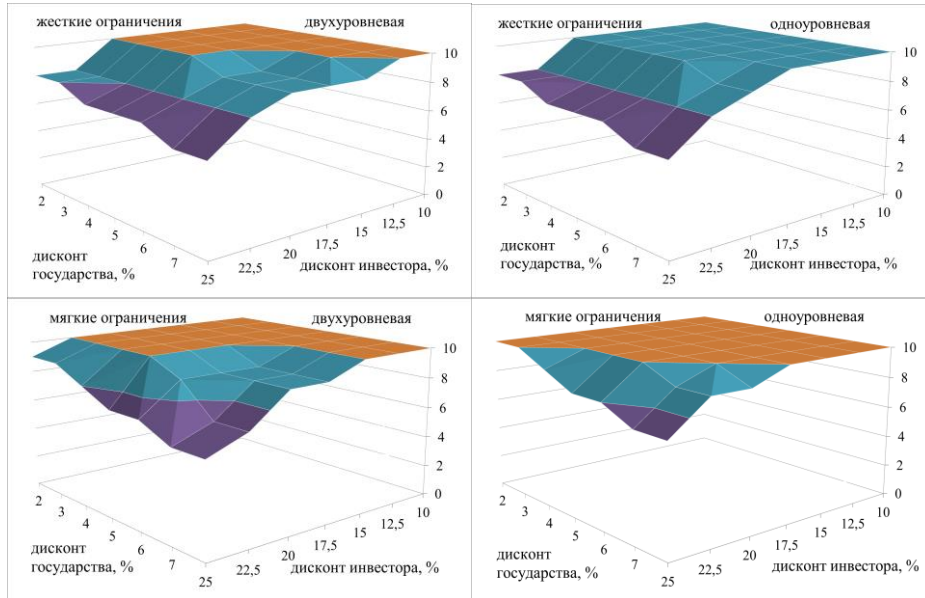


Рис. 2. Число реализованных инфраструктурных проектов

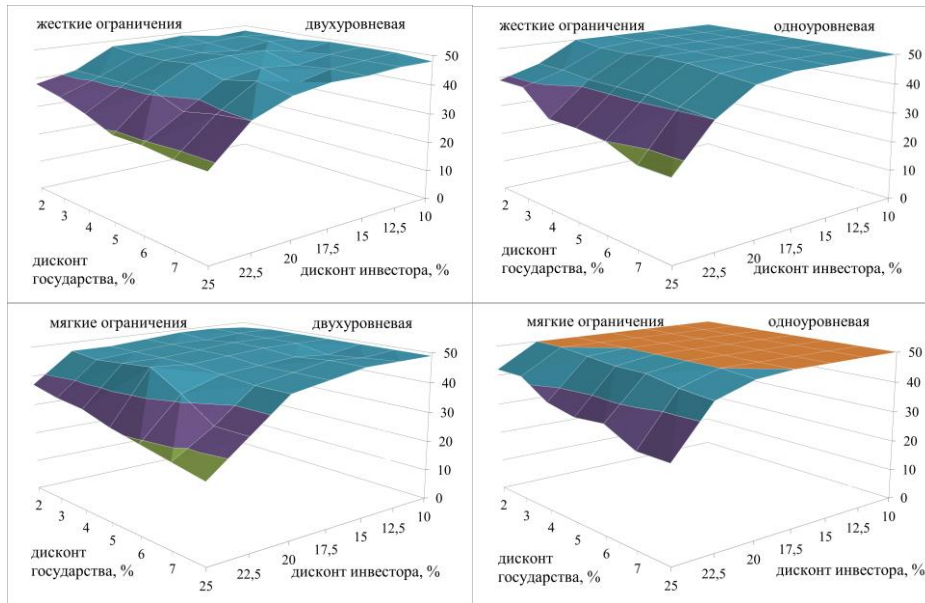


Рис. 3. Число реализованных производственных проектов

Различен также и характер помощи государства инвестору в реализации экологических проектов (см. рис. 4). В одноуровневых моделях государство, располагая полной информацией об инвесторе, минимизирует свои затраты на природоохранные мероприятия для инвестора с малым дисконтом. При росте дисконта инвестора государство начинает с некоторого уровня наращивать помощь в реализации экологических проектов, доводя его до 80-процентного уровня природоохранных затрат.

В двухуровневой модели государство начинает помогать рационально действующему инвестору уже с минимального уровня дисконта инвестора. Оно последовательно наращивает интенсивность помощи до уровня 100 % для максимального дисконта инвестора и минимального у государства.

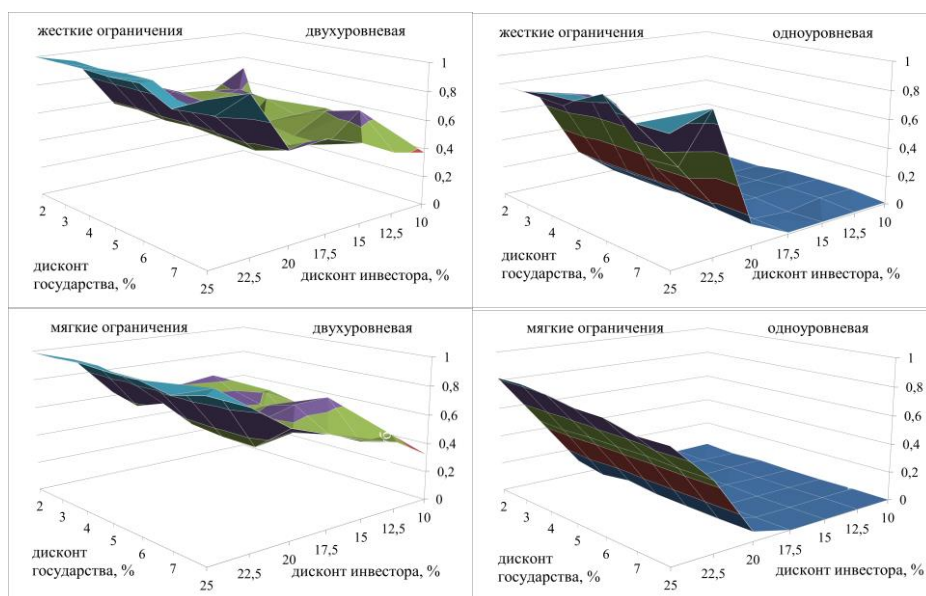


Рис. 4. Доля государства в экологических затратах

Такая сложная зависимость от дисконтов партнеров объемов помощи инвестору в инфраструктурном и природоохранном строительстве в значительной степени объясняет характер поверхностей, представленных на рисунке 5. Мы видим, что в некотором диапазоне дисконта инвестора целевая функция государства определяется только его дисконтом. Это вполне соответствует виду целевой функции государства, напрямую не зависящей от дисконта инвестора. По мере дальнейшего роста дисконта инвестора, сокращается инфраструктурная, но растет экологическая помощь государства. Сложным образом взаимодействуя, эти факторы в различных постановках порождают поверхности для значения целевой функции государства разного уровня регулярности.

Как это следует из рисунка 5, одноуровневая постановка обеспечивает наибольшую устойчивость уровня результативности программы освоения к по-

ведению «рентоориентированного» инвестора. Здесь и наибольшие значения функционала государства, и минимальный уровень его реакции на рост дисконта инвестора в области его высоких значений, особенно в постановке с мягкими бюджетными ограничениями.

Соответствующие модели Штакельберга поверхности на рисунке 5 имеют изломы и впадины. Это говорит о том, что двухуровневая постановка даже в варианте с мягкими бюджетными ограничениями порождает решение, для которого в некоторых случаях нарушается устойчивость функционала государства к изменению дисконтов участников партнерства². В определенной степени это компенсируется функционалом инвестора, для которого не так важна устойчивость, а более приоритетным является

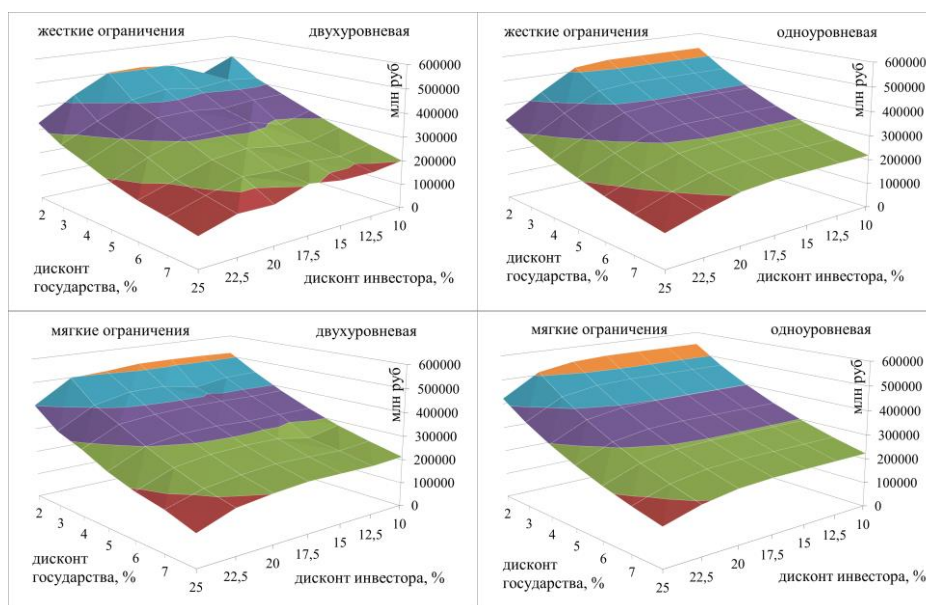


Рис. 5. Целевая функция государства.

абсолютное значение целевой функции. Здесь для инвестора модель Штакельберга обеспечивает существенный выигрыш по сравнению с одноуровневыми постановками даже для больших дисконтов (см. рис. 6).

² А значит, и к изменению внешних условий реализации проектов освоения месторождений. Учитывая переходной характер экономики России и нестационарный характер сырьевых рынков, это приводит к тому, что даже малые изменения внешних условий приводят к существенному падению функционала государства и снижению уровня эффективности стратегии освоения минерально-сырьевой базы, построенной на основе решения задачи.

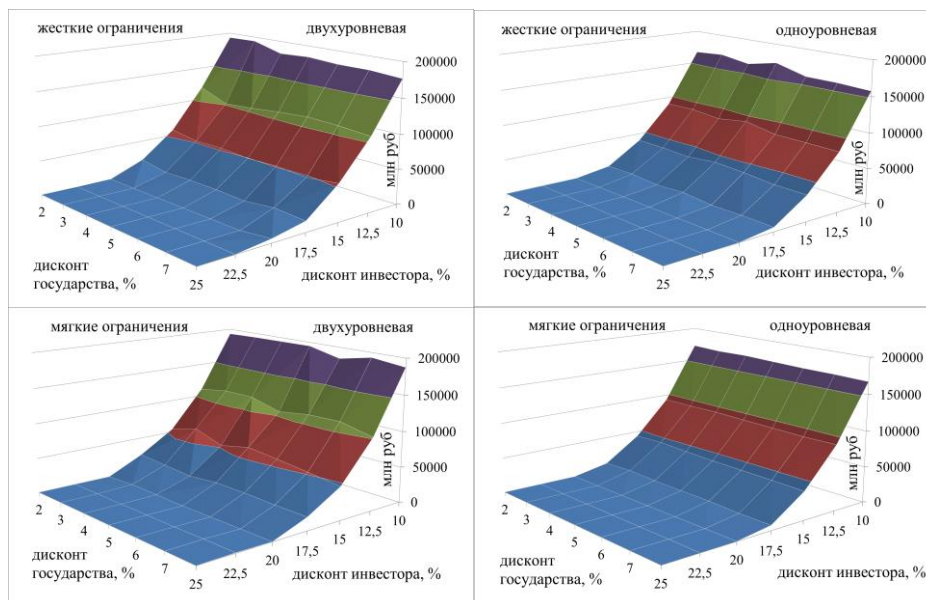


Рис. 6. Целевая функция инвестора.

4. Обсуждение полученных результатов

Результаты численных экспериментов иллюстрируют возможности предлагаемого подхода к формированию механизма взаимодействия государства и инвестора на принципах партнерства. Предлагаемый инструментальный стратегического планирования предназначен для малоосвоенной сырьевой территории и строит программу освоения минерально-сырьевой базы на основе арсенала рычагов партнерства, включающего не только помощь инвестору в создании необходимой инфраструктуры, но и реализацию части необходимых природоохранных мероприятий. Мы видим, что в рамках построенных моделей формирования механизма взаимодействия в некоторых случаях государство берет на себя не только инфраструктуру, но и фиксированный перечень экологических проектов. Такое поведение рационально, но требует выверенного подхода к определению конкретного размера помощи.

Результаты моделирования позволяют оценить воздействие дисконтов партнеров на эффективность программ освоения недр, генерируемых в разных моделях. Хотя механизм взаимодействия государства и частного инвестора во всех рассмотренных моделях основан на помощи государства в инфраструктурном и природоохранном строительстве, исходные предположения об уровне информированности и возможностях государства в существенной степени различны. При прочих равных условиях для государства предпочтительна одноуровневая модель. В ее рамках государство может эффективно работать с инвестором,

дисконт которого укладывается в традиционный диапазон, характерный для минерально-сырьевого комплекса, не теряя значения своей целевой функции – ренты, полученной в виде налогов. Более адекватной здесь оказывается и реакция на рост дисконтов – сокращение объема инфраструктурного строительства и помощи в реализации экологических проектов и, как следствие, минимально возможный уровень рентабельности инвестора.

Двухуровневая постановка модели Штакельберга, напротив, дает определенные преимущества инвестору, обеспечивая ему, как правило, больший, чем в одноуровневой постановке, функционал. Расчеты показывают, что значение его целевой функции здесь мало зависит от дисконта государства и определяется в основном дисконтом инвестора.

Какая из моделей – двухуровневая или одноуровневая – обеспечивает наилучший компромисс долгосрочных интересов государства и частного инвестора и в большей степени соответствует сегодняшнему положению дел в российском минерально-сырьевом комплексе?

Предположение о полной информированности государства о технологиях и возможностях инвестора, лежащее в основе одноуровневой модели, представляется не вполне корректным в условиях современной России. Двухуровневая постановка модели более адекватно отражает сегодняшние реалии и особенности процесса нахождения компромисса интересов государства и инвестора. Практические примеры реализации проектов ГЧП в России подтверждают, что такая постановка содержательно близка к реальной процедуре разработки плана освоения минерально-сырьевой базы ресурсного региона.

Это говорит о том, что для повышения общественной эффективности сегодняшнего механизма сотрудничества с рентоориентированным инвестором и справедливого раздела природно-ресурсной ренты необходимо всемерно снижать дисконты. Высокие ставки дисконта в современной России — это не специфическая для минерально-сырьевого сектора проблема, они в значительной степени определяются общими макроэкономическими условиями и качеством управления в стране. Поэтому меры, повышающие эффективность производственных процессов на микроэкономическом уровне, могут оказаться мало полезными, если эти условия не будут меняться к лучшему.

Таким образом, эффективность сотрудничества в процессе разработки комплекса месторождений на малоосвоенных территориях зависит не только от общих макроэкономических условий, но и от обстоятельств, непосредственно с содержанием сотрудничества не связанных, таких, как качество государственного управления в природоохранной сфере. И здесь необходимы шаги, позволяющие существенно улучшить работу государственных институтов и на этой основе снизить дисконты как государства, так и частного инвестора.

Сравнительный анализ свойств решений, полученных в разных моделях, позволяет сделать ряд практических выводов. Решение одноуровневой модели информированного государства определяет верхнюю грань для значения функционала двухуровневой модели, содержательно максимально близко описываю-

щей сегодняшней стиль управления в минерально-сырьевом комплексе³. Это говорит о том, что государство в процессе принятия решения должно стремиться получить более детальное представление об объектах природопользования и проектах освоения. Только так можно эффективно строить отношения с инвестором на позициях собственника ресурсов, получающего возможно большую часть природно-ресурсной ренты, как стоимости, созданной природой.

Для этого государству необходимо провести инвентаризацию основных месторождений с учетом сегодняшних условий и организовать постоянный мониторинг их рентной оценки. Это позволит создать не только необходимую для внешнего инвестора инфраструктуру процесса принятия решения, но и базу знаний для государства, стремящегося наиболее рационально распорядиться имеющимися природными ресурсами.

На такой основе уже можно подойти и к решению центральной проблемы сырьевых регионов – разработке комплексного сценария освоения минерально-сырьевой базы, включающего планы развития производственной инфраструктуры и формирование пакетов инвестиционных предложений, реализующих различные этапы развития территории. И здесь необходимо сообразности интересы не только частного бизнеса, но и общества в целом. Поиск вариантов согласования этих интересов – непростая задача, на решение которой и нацелен инструментарий, предложенный в настоящей работе.

Список литературы

1. Lavlinskii, S.M., Panin, A.A., Plyasunov, A.V.: Comparison of models of planning public-private partnership. *Journal of Applied and Industrial Mathematics*. 10(3), 356–369 (2016)
2. Лавлинский С.М., Панин А.А., Плясунов А.В.: Двухуровневая модель планирования государственно-частного партнерства. *Автоматика и телемеханика*. 11, 89–103 (2015)
3. Лавлинский С.М.: Государственно-частное партнерство на сырьевой территории – экологические проблемы, модели и перспективы. *Проблемы прогнозирования*. 1, 99–111 (2010)
4. Ерешко Ф.И.: Моделирование рефлексивных стратегий в управляемых системах. М., ВЦ РАН. (2001)
5. Iellamo, S., Alekseeva, E., Chen, L., Coupechoux, M., Kochetov, Yu.: Competitive location in cognitive radio networks. *4OR*. 13(1), 81–110 (2015)

³ Анализ документации ряда проектов ГЧП в минерально-сырьевом секторе показывает, что основной акцент в экспертизе делается на доказательство рентабельности проекта для инвестора. Вопросы о том, какая часть ренты будет получена государством, как правило, даже не ставится. Это вполне соответствует исходным посылам модели Штакельберга, в которой государство решает задачу верхнего уровня, ничего не зная о тонкостях технологии и рыночной конъюнктуры, а рентоориентированный инвестор стремится получить максимальную рентабельность в сотрудничестве с государством. При этом интересы общества, как правило, отступают на второй план.

6. Davydov, I., Kochetov, Yu., Plyasunov, A.: On the complexity of the (r|p)-centroid problem in the plane. *TOP*. 22(2), 614–623 (2014)
7. Panin, A.A., Plyasunov, A.V.: On complexity of the bilevel location and pricing problems. *Journal of Applied and Industrial Mathematics*. 8(4), 574–581 (2014)
8. Plyasunov, A.V.; Panin, A.A.: The pricing problem. II: Computational complexity. *Journal of Applied and Industrial Mathematics* 7(3), 420–430 (2013)
9. Alekseeva, E., Kochetov, Yu., Plyasunov, A.: An exact method for the discrete (r|p)centroid problem. *Journal of Global Optimization* 63(3), 445–460 (2015)
10. Alekseeva, E., Kochetov, Yu.: Matheuristics and exact methods for the discrete (r|p)centroid problem In: El-G. Talbi (Ed.) *Metaheuristics for Bi-level Optimization (Studies in Computational Intelligence)*. vol. 482, pp. 189–219. Springer (2013)
11. Davydov, I.A., Kochetov, Y.A., Carrizosa, E.: A local search heuristic for the (r|p)centroid problem in the plane. *Computers & Operations Research* 52, 334–340 (2014)
12. Beresnev, V.L., Melnikov, A.A.: A capacitated competitive facility location problem. *Journal of Applied and Industrial Mathematics* 10(1), 61–68 (2016)
13. Diakova, Z., Kochetov, Yu.: A double VNS heuristic for the facility location and pricing problem. *Electronic Notes in Discrete Mathematics* 39, 29–34 (2012)
14. Plyasunov, A.V.; Panin, A.A.: The pricing problem. I: Exact and approximate algorithms. *Journal of Applied and Industrial Mathematics* 7(2), 241–251 (2013)