

**Эколого-экономические модели в минерально-сырьевом секторе России:
формирование инвестиционной политики на основе
государственно-частного партнерства**

© 2022 г. И.П. Глазырина, С.М. Лавлинский, Л.Л. Яковлева

И.П. Глазырина,
ИПРЭК СО РАН, Чума; e-mail: iglazyrina@bk.ru

С.М. Лавлинский,
ИМ СО РАН, Новосибирск; e-mail: lavlin@math.nsc.ru

Л.Л. Яковлева,
Забайкальский госуниверситет, Чума; e-mail: lidia70@mail.ru

Поступила в редакцию 12.02.2022

Работа выполнена в рамках государственного контракта Института математики им. С.Л. Соболева (проект FWNF-2022-0019). Статья подготовлена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 20-010-00151).

Аннотация. В статье предложена математическая модель формирования программы освоения минерально-сырьевой базы, в которой в явном виде формализован механизм государственно-частного партнерства и учтено негативное воздействие технологий добычи полезных ископаемых на окружающую среду. Основу модели составляет игра Штакельберга и аппарат двухуровневого математического программирования. Это позволяет учесть особенности иерархии взаимодействия государства и частного инвестора в минерально-сырьевом секторе и на этой основе построить практическую методологию формирования «зеленой» программы освоения природных богатств ресурсного региона. База данных модели строится на основе специальных прогнозных моделей, детально описывающих процессы реализации проектов различных видов. Предлагаемый подход апробирован на реальных данных, описывающих фрагмент минерально-сырьевой базы Забайкальского края. В фокусе численного эксперимента — оценка зависимости эффективности сформированной в модели инвестиционной политики от уровня благоприятности инвестиционного климата, масштаба затрат на природоохранные мероприятия и стоимостной оценки ущерба от экологических нарушений, порождаемого примененными технологиями добычи полезных ископаемых. Результаты моделирования позволяют сформулировать ряд содержательных выводов, на основе которых могут быть построены реальные стратегические планы строительства производственной инфраструктуры, стимулирующие приход частного инвестора, готового работать в русле идей «зеленой» экономики.

Ключевые слова: ресурсный регион, устойчивое развитие, механизмы партнерства государства и инвестора, раздел природно-ресурсной ренты, модель Штакельберга, двухуровневые задачи математического программирования.

Классификация JEL: С6, Q32.

Для цитирования: Глазырина И. П., Лавлинский С. М., Яковлева Л. Л. (2022). Эколого-экономические модели в минерально-сырьевом секторе России: формирование инвестиционной политики на основе государственно-частного партнерства // *Экономика и математические методы*. Т. 58. № 3. С. 57–69. DOI: 10.31857/S042473880020029-0

Формирование механизмов стимулирования частных инвестиций и оценка их результативности — до сих пор не решенная российским государством задача. Устоявшаяся практика принятия таких решений в недропользовании оперирует преимущественно политическими аргументами и самыми простыми оценками эффективности принимаемых решений, основанными на анализе технологических проектов и текущих сырьевых цен.

Эту задачу невозможно решить в отрыве от общих проблем стратегического планирования, ядро которого — задача формирования программы освоения минерально-сырьевой базы (МСБ). В рамках такой программы необходимо решить, какая производственная инфраструктура нужна для развития территории и привлечения инвесторов и можно ли пойти на дополнительную трату бюджетных средств для оказания помощи инвестору в инфраструктурном и природоохранном строительстве.

Эти проблемы находятся в центре внимания настоящей работы. Цель статьи — разработка модели, которую можно было бы положить в основу практической методологии формирования «зеленой» программы освоения МСБ. Для этого мы предлагаем использовать модель Штакельберга и аппарат двухуровневого математического программирования и таким образом учесть особенности иерархии взаимодействия государства с частными инвесторами в минерально-сырьевом секторе. Такой подход позволяет найти компромисс интересов бюджета и частного инвестора и сформировать программу освоения природно-ресурсного комплекса, эффективную с точки зрения перспектив устойчивого развития (Минакир 2019; Натхов, Полищук, 2017; Рюмина, 2001; Korhonen, Snakin, 2005; Lehtonen, 2004).

1. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ

Механизм государственно-частного партнерства (ГЧП) (Варнавский, 2009; Резниченко, 2010; Слостников, 2010) широко используется в мире и является эффективным инструментом достижения компромисса интересов в различных сферах экономики. Здесь уже утвердилась классическая модель партнерства, предполагающая строительство частной компанией объекта государственной собственности и его передачу государству либо сразу после окончания строительства, либо по прошествии определенного времени эксплуатации объекта (Broadbent, Laughlin, 2003; Grimsey, Levis, 2004; Hodge, Greve, 2007). В минерально-сырьевом комплексе развитых стран такая форма государственно-частного партнерства позволяет существенно расширить источники финансирования проектов, заинтересовать недропользователей в освоении новых месторождений в труднодоступных районах (Lakshmanan, 2011; Mackie, Worsley, Eliasson, 2014).

В российском минерально-сырьевом секторе пока только идет процесс становления института ГЧП. На сегодняшний день на малоосвоенных территориях реализовано несколько проектов на основе механизма, в определенном смысле альтернативного классическому. Этот механизм предполагает, что государство помогает инвестору в создании инфраструктуры и реализации части необходимых природоохранных мероприятий.

Практический опыт реализации российских проектов ГЧП показал, что используемая форма партнерства обременительна для государства в финансовом плане. Кроме того, она требует точно выверенной методологии принятия решения. Именно поэтому все попытки Правительства РФ стимулировать использование различных форм партнерских отношений с частным бизнесом в этой сфере не сопровождались принятием экономически выверенных управленческих решений.

Настоящая статья продолжает исследования авторами проблематики сотрудничества государства и частного инвестора в минерально-сырьевом секторе (Glazyrina, Lavlinskii, 2017; Глазырина, Лавлинский, 2018). В этих работах рассматривался именно российский вариант партнерства, в котором инфраструктуру строило только государство. Здесь мы пытаемся исследовать возможные способы трансформации российской модели ГЧП, использующей средства Инвестиционного фонда РФ, в направлении классических форм партнерства. Для этого предполагается, что и в инфраструктурном, и в природоохранном строительстве могут участвовать оба партнера.

Для малоосвоенной сырьевой территории такая форма партнерства в природно-ресурсном секторе предусматривает реализацию следующего сценария. Инвестор не может запустить свои проекты освоения месторождений, поскольку нет необходимой инфраструктуры. Поэтому он согласует с государством некоторый перечень инфраструктурных проектов, которые открывают интересующие его проекты освоения, и реализует эти инфраструктурные проекты за свой счет. Государство компенсирует его затраты с некоторым лагом, например начиная с момента поступления налогов от добычи полезных ископаемых частным инвестором.

Такая иерархическая схема взаимодействия государства и частного инвестора может быть описана с помощью модели Штакельберга, в которой роль лидера отведена государству. Использование аппарата двухуровневого математического программирования позволяет найти равновесные решения, на основе которых может быть сформирована эффективная программа освоения природно-ресурсного потенциала территории (Lavlinskii, Panin, Pliasunov, 2016). Такой подход позволяет предложить практически значимую методологию формирования стратегических планов развития, учитывающих особенности российского минерально-сырьевого комплекса.

В общем случае в ресурсном регионе государство имеет дело с набором месторождений и группой потенциальных инвесторов, за каждым из которых стоят конкретные технологические проекты

освоения, реализуемые при определенном перечне условий. В такой ситуации механизм ГЧП — базовый элемент программы освоения минерально-сырьевой базы территории, в рамках которой государство берет на себя обязательство восполнить недостающую производственную инфраструктуру и помочь инвесторам в реализации природоохранных проектов.

Входными данными модели формирования инвестиционной политики, определяющей детали партнерства, являются следующие данные:

- набор производственных проектов освоения месторождений, реализуемых частным инвестором;
- набор инфраструктурных проектов, которые могут быть реализованы как частным инвестором, так и государством;
- перечень природоохранных проектов, необходимых для компенсации ущерба от экологических нарушений, вызванных реализацией производственных проектов; часть природоохранных проектов может быть реализована государством.

Выход модели — ключевые параметры инвестиционной политики, определяющие график компенсаций и механизм стимулирования инвестора (разделения затрат). Формально эти параметры полностью определяют программу освоения месторождений и перечни инфраструктурных и природоохранных проектов, реализуемых государством и частным инвестором соответственно.

Учет негативного воздействия на окружающую среду формализован в модели следующим образом. Для каждого производственного проекта освоения месторождения в программе фиксируется перечень природоохранных проектов, реализация которых только частично нейтрализует негативное воздействие последствий применения технологий добычи полезных ископаемых, как правило, достаточно «грязных». Для невозмещенного экологического ущерба (нарушенных ландшафтов, загрязненных естественных водоемов и источников, и т.п.) вводится стоимостная оценка такого ущерба, построенная на основе анализа системы компенсирующих мероприятий, необходимых для нейтрализации негативного воздействия на природную среду. Эти мероприятия программой освоения не предусмотрены, хотя в целях устойчивого развития должны были бы быть проведены. Соответствующий график затрат на реализацию таких мероприятий в модели играет роль стоимостной оценки ущерба от экологических нарушений и может рассматриваться как негативный экологический след, характеризующий экологичность программы освоения (Рюмина, 2009; Blazek, 2004).

Обозначим через NP , NI и NE — число производственных, инфраструктурных и природоохранных проектов; T — горизонт планирования; $i = 1, \dots, NP$; $j = 1, \dots, NI$; $k = 1, \dots, NE$; номер года $t = 1, \dots, T$.

Производственный проект i : CFP_{it} — поток наличности; EPP_{it} — стоимостная оценка ущерба от экологических нарушений; DBP_{it} — доходы бюджета от проекта.

Инфраструктурный проект j : ZI_{jt} — график затрат; EPI_{jt} — стоимостная оценка ущерба от экологических нарушений; VDI_{jt} — внепроектные доходы бюджета от реализации проекта, связанные с общим развитием экономики территории.

Природоохранный проект k : характеризуется графиком затрат ZE_{kt} .

Взаимосвязь проектов: μ_{ij} — показатель технологической связности производственных и инфраструктурных проектов, равный 1, если для реализации производственного проекта i необходима реализация инфраструктурного проекта j , иначе — 0; ν_{ik} — показатель связности производственных и природоохранных проектов, равный 1, если реализация производственного проекта i влечет необходимость реализации природоохранного проекта k , иначе — 0.

Дисконты и бюджетные ограничения: DG — дисконт государства; DI — дисконт инвестора; $BudG_t$, $BudI_t$ — бюджетные ограничения государства и инвестора.

Введем следующие **целочисленные переменные:** $\bar{x}_j = 1$, если государство (лидер) заявляет о готовности запустить инфраструктурный проект j , иначе — $\bar{x}_j = 0$; $x_j = 1$, если государство запускает инфраструктурный проект j , иначе — $x_j = 0$; $\bar{y}_k = 1$, если государство (лидер) заявляет о своей готовности взять на себя реализацию природоохранного проекта k , иначе — $\bar{y}_k = 0$; $y_k = 1$, если государство запускает природоохранный проект k , иначе — $y_k = 0$; $z_i = 1$, если инвестор запускает производственный проект i , иначе — $z_i = 0$; $u_k = 1$, если инвестор реализует природоохранный проект k , иначе — $u_k = 0$; $v_j = 1$, если инвестор реализует инфраструктурный проект j , иначе — $v_j = 0$.

Вещественные переменные: \bar{W}_t и W_t — предлагаемый лидером (государством) и реализовавшийся график компенсации затрат инвестора на инфраструктуру.

Модель формирования инвестиционной политики может быть представлена в виде следующей задачи двухуровневого математического программирования.

Задача государства — максимизировать чистый приведенный доход государства:

$$\begin{aligned} & \sum_{t=1}^T \left(\sum_{i=1}^{NP} (DBP_{it} - EPP_{it}) z_i + \sum_{j=1}^{NI} (VDI_{jt} - EPI_{jt}) (x_j + v_j) - \right. \\ & \left. - \sum_{j=1}^{NI} ZI_{jt} x_j - \sum_{k=1}^{NE} ZE_{kt} y_k - W_t \right) / (1 + DG)^t \Rightarrow \max \end{aligned} \quad (1)$$

при условиях

$$\sum_{1 \leq t \leq \omega} \left[\sum_{j=1}^{NI} ZI_{jt} \bar{x}_j + \sum_{k=1}^{NE} ZE_{kt} \bar{y}_k + \bar{W}_t \right] \leq \sum_{1 \leq t \leq \omega} BudG_t, \quad \omega = 1, \dots, T, \quad (2)$$

$$\bar{W}_t = 0, \quad t = 1, \dots, T_0, \quad (3)$$

$$\bar{W}_t \geq 0, \quad t = T_0 + 1, \dots, T, \quad (4)$$

$$(x, y, z, u, v) \in F^*(\bar{x}, \bar{y}, \bar{W}), \quad (5)$$

$$\bar{x}_j, \bar{y}_k \in \{0; 1\}, \quad j = 1, \dots, NI, \quad k = 1, \dots, NE, \quad i = 1, \dots, NI, \quad (6)$$

где $F^*(\bar{x}, \bar{y}, \bar{W})$ — множество оптимальных решений задачи инвестора.

Задача инвестора — максимизировать суммарный чистый приведенный доход инвестора:

$$\sum_{t=1}^T \left(\sum_{i=1}^{NI} CFP_{it} z_i - \sum_{l=1}^{NE} ZE_{lt} u_l - \sum_{j=1}^{NI} ZI_{jt} v_j + W_t \right) / (1 + DI)^t \Rightarrow \max \quad (7)$$

при условиях

$$\sum_{t=1}^T \left(- \sum_{j=1}^{NI} ZI_{jt} v_j + W_t \right) / (1 + DI)^t \geq 0, \quad (8)$$

$$\sum_{1 \leq t \leq \omega} \left(- \sum_{i=1}^{NP} CFP_{it} z_i + \sum_{l=1}^{NE} ZE_{lt} u_l + \sum_{j=1}^{NI} ZI_{jt} v_j - W_t \right) \leq \sum_{1 \leq t \leq \omega} BudI_t, \quad \omega = 1, \dots, T, \quad (9)$$

$$x_j + v_j \geq z_i u_{ij}, \quad i = 1, \dots, NP, \quad j = 1, \dots, NI, \quad (10)$$

$$x_j + v_j \leq 1, \quad j = 1, \dots, NI, \quad (11)$$

$$y_k + u_k \geq z_i v_{ik}, \quad i = 1, \dots, NP, \quad j = 1, \dots, NI, \quad (12)$$

$$y_k + u_k \leq 1, \quad k = 1, \dots, NE, \quad (13)$$

$$u_k \leq \sum_{i=1}^{NP} v_{ik} z_i, \quad i = 1, \dots, NP, \quad k = 1, \dots, NE, \quad (14)$$

$$\sum_{t=1}^T \left[\sum_{i=1}^{NP} (DBP_{it} - EPP_{it}) z_i - W_t \right] / (1 + DG)^t \geq 0, \quad (15)$$

$$y_k \leq \bar{y}_k, \quad k = 1, \dots, NE, \quad (16)$$

$$x_j \leq \bar{x}_j, \quad k = 1, \dots, NE, \quad (17)$$

$$W_t \leq \bar{W}_t, \quad t = 1, \dots, T, \quad (18)$$

$$x_j, y_k, z_i, u_k, v_j \in \{0; 1\}, \quad i = 1, \dots, NP, \quad j = 1, \dots, NI, \quad k = 1, \dots, NE. \quad (19)$$

В сформулированной модели инвестор максимизирует свое NPV , а государство в качестве основной цели видит получение как можно больших доходов для бюджета с учетом затрат на инфраструктуру и охрану природы, а также стоимостной оценки ущерба от экологических нарушений в выбранной программе освоения МСБ. Компенсационные выплаты инвестору за построенную им инфраструктуру государство начинает по прошествии T_0 лет (например, с момента поступления первых налоговых платежей инвестора) (3), (4). Их график должен обеспечить государству баланс бюджетных доходов, оценок ущерба и платежей инвестору (15), а также компенсировать затраты инвестора на инфраструктуру с дисконтом (8).

Ограничения (10)–(14) формализуют взаимосвязь производственных, инфраструктурных и природоохранных проектов. Каждый инфраструктурный и природоохранный проект может быть запущен только одним из партнеров и должен быть необходим для реализации какого-либо производственного проекта. И инфраструктурный, и природоохранный проект может быть закреплен за государством только при условии, что государство включило его в свой перечень (16), (17).

На выходе модели — ключевые параметры инвестиционной политики $x_j, y_k, z_i, u_k, v_j, W_i$, определяющие механизм стимулирования инвестора (разделения затрат) и программу освоения МСБ региона, эффективную в долгосрочном плане.

В некоторых случаях важно учитывать и нейтрализацию опасных и особо опасных веществ, эмиссия которых может быть незначительной в каждый отдельный год, но в результате накопления может привести к ущербам катастрофических масштабов (Glazyrina, Chavkin, 2021). Поэтому в модели необходимо предусмотреть большие интервалы для параметра EPP . Параметр ZE зависит преимущественно от уровня экологичности используемых инвестором технологий — как производственных, так и природоохранных. Лучшие технологии требуют, как правило, больших затрат. Поэтому важно, чтобы инвестор был поставлен в регулирующие (со стороны государства) рамки, не позволяющие ему поддаваться соблазнам экономии на природоохранных мерах. Для экспертов в Европейский союз одним из таких инструментов станет, по-видимому, Carbon Border Adjustment Mechanism¹.

2. ЧИСЛЕННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

База данных модели (1)–(19) строится на основе специальных прогнозных моделей, детально описывающих процессы реализации проектов всех видов (Лавлинский, 2008). Используемые реальные данные описывают фрагмент минерально-сырьевой базы Забайкальского края, состоящий из 50 месторождений полиметаллических руд. В примере реализуется 50 экологических и 10 инфраструктурных проектов (железная дорога, ЛЭП, автомобильные дороги), построенных таким образом, чтобы при реализации полной инфраструктурной и природоохранной программы могли быть запущены все проекты освоения месторождений.

Таким способом разработанный модельный полигон позволяет учесть специфику моделируемого объекта — долгосрочный характер инвестиционных процессов, нестационарную рыночную конъюнктуру, устоявшуюся технологию управления природными ресурсами. Методика изучения свойств равновесия по Штакельбергу основана на анализе чувствительности решений соответствующей двухуровневой задачи булевого программирования к изменению основных параметров модели. Этот вопрос практически 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 таких параметров, как дисконты участников партнерства, природоохранные затраты и ущербы, могут быть оценены им только приближенно.

Именно эти «слабо определенные» параметры находятся в фокусе проблематики настоящей статьи. Ключевой вопрос — зависимость эффективности сформированной в (1)–(19) инвестиционной политики от уровня благоприятности инвестиционного климата, масштаба затрат на природоохранные мероприятия и стоимостной оценки ущерба от экологических нарушений, порождаемых примененными технологиями добычи полезных ископаемых.

В модели качество инвестиционного климата определяется дисконтами инвестора и государства. Мы будем считать, что благоприятные инвестиционные условия описываются парой $A = \{DG = 0,01; DI = 0,11\}$, а сегодняшний инвестиционный климат в ресурсных регионах с высоким уровнем транзакционных издержек и неблагоприятными макроэкономическими условиями — парой $B = \{DG = 0,05; DI = 0,15\}$ (Глазырина, Лавлинский, 2018).

Зафиксированные в базе данных графики затрат на реализацию природоохранных проектов строятся на основе раздела ОВОС в ТЭО проектов и определяют единичный масштаб экологических затрат. Поскольку в проектной документации сведения об экономической оценке ущерба от экологических нарушений отсутствуют, в модели предполагается, что она пропорциональна объему капитальных вложений и дифференцируется по металлам (технологиям). Выбор диапазонов

¹ См. <https://ercst.org/border-carbon-adjustments-in-the-eu-issues-and-options/>

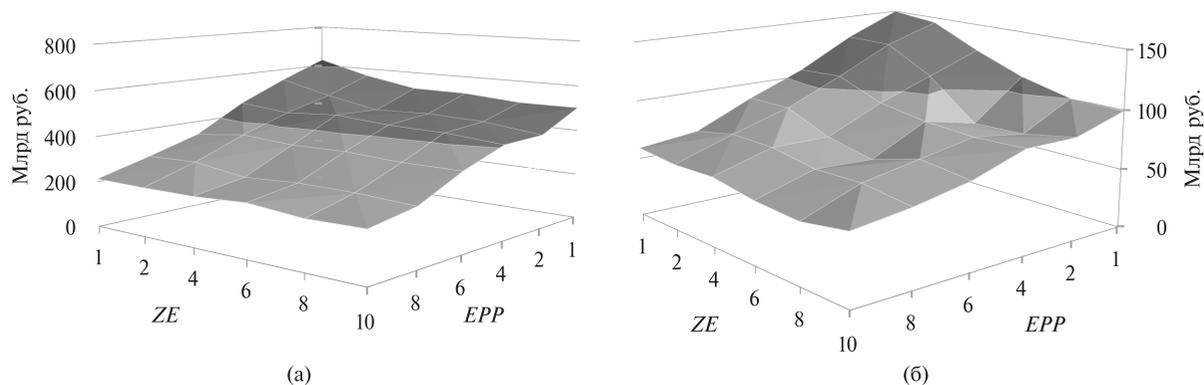


Рис. 1. Целевая функция государства

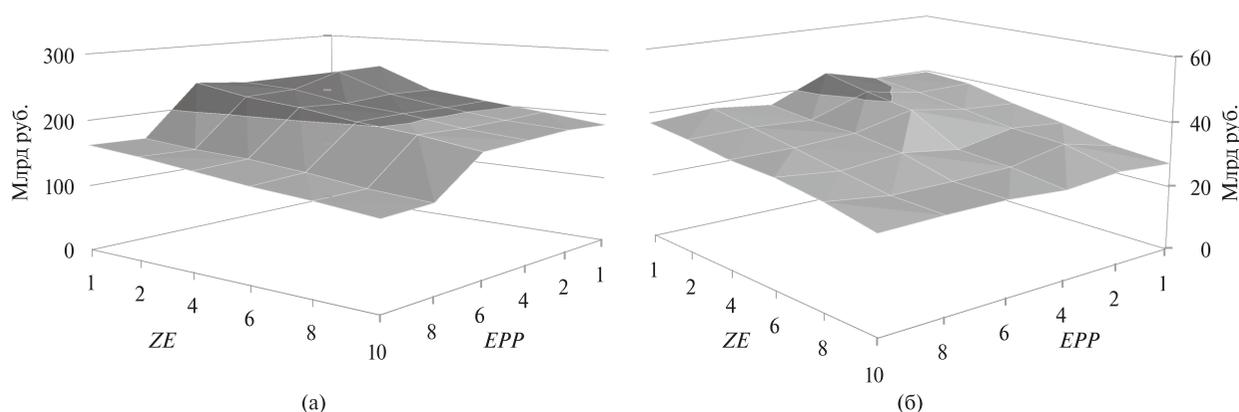


Рис. 2. Целевая функция инвестора

коэффициентов пропорциональности основан на опыте работы авторов с месторождениями Красноярского края с близкими по геологическим характеристикам свойствами (Лавлинский, 2008; Lavlinskii, 2010). Такой выбор определяет единичный масштаб ущерба от экологических нарушений и соответствующий график его стоимостной оценки.

В ходе численных экспериментов мы будем при заданном качестве инвестиционного климата (A или B)кратно увеличивать масштабы природоохранных затрат и ущерба, имитируя рост уровня затрат на охрану природы и последствия использования все более «грязных» технологий добычи. На последующих рисунках представлены результаты расчетов, в которых изучалась реакция решений задачи (1)–(19) на изменение масштаба природоохранных затрат и ущерба в рамках того или иного инвестиционного климата.

На рис. 1 и 2 представлена зависимость целевой функции государства и частного инвестора от экологических параметров модели. На рост масштаба загрязнений реагирует, в основном, государство — так устроен его функционал. Скорость такой реакции зависит от инвестиционного климата — в условиях A верхней половине диапазона значений функционала соответствует весь спектр значений масштаба затрат используемых относительно «чистых» технологий добычи. В рамках условий B с ростом затрат резко падает эффективность политики государства, и мы уже не можем использовать самые дорогие технологии с высокими природоохранными свойствами.

В условиях A с ростом природоохранных затрат инвестор теряет в эффективности с практически постоянной скоростью. С ростом масштаба ущерба значение функционала инвестора образует ступеньку (рис. 2). Для худших инвестиционных условий на целевую функцию инвестора в основном влияет уровень затрат, а зависимость от EPP становится более сложной.

Такое поведение функционалов объясняется особенностями равновесных инфраструктурных и производственных программ, реализуемых инвестором и государством при изменении EPP , ZE

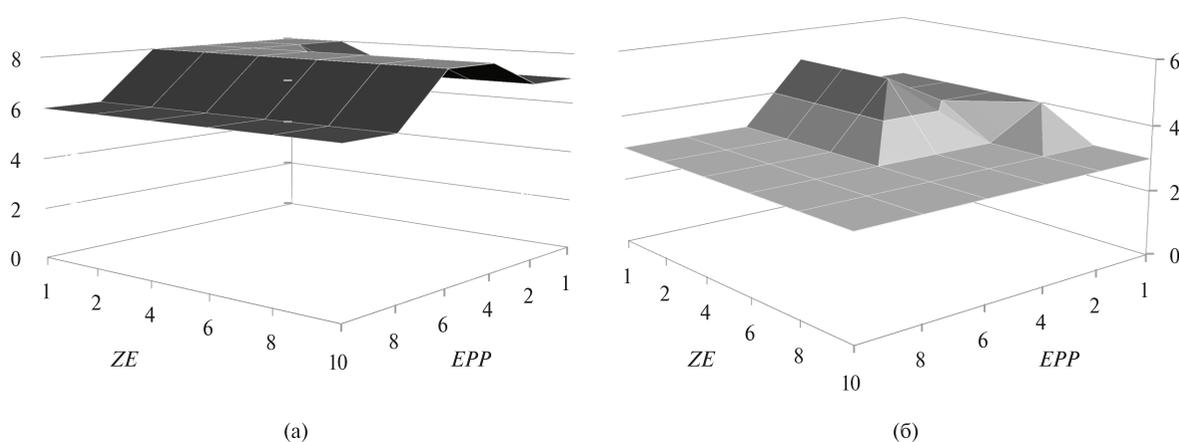


Рис. 3. Общее число реализованных инфраструктурных проектов

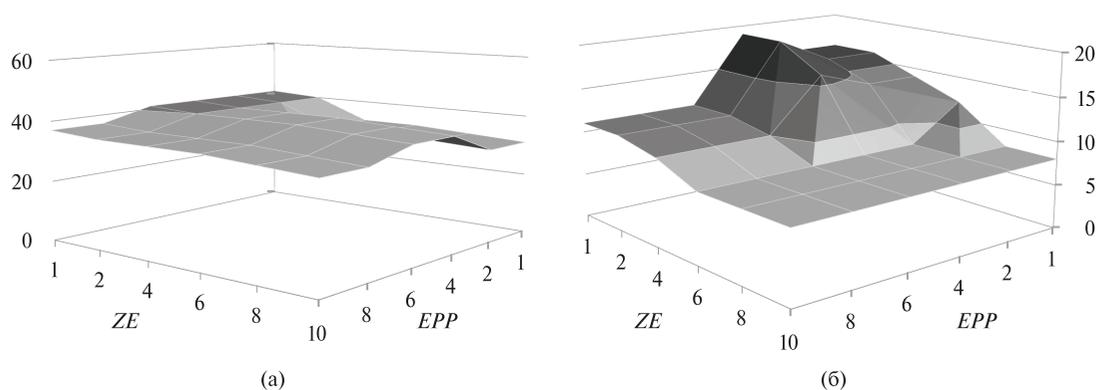


Рис. 4. Число производственных проектов, реализованных инвестором

и параметров инвестиционного климата. Сравнивая рис. 3 и 4, можно утверждать, что интенсивность производственной программы (число реализованных проектов освоения) в значительной степени определяется интенсивностью совместно реализованной программы инфраструктурного строительства, которая, в свою очередь, весьма чувствительна к уровню благоприятности инвестиционного климата.

Так, в условиях *A* партнеры для относительно «чистых» технологий реализуют 7–8 проектов из 10 возможных. При этом рост масштаба затрат в большей степени воздействует на производственный фронт, заставляя инвестора сокращать число запускаемых проектов добычи. При увеличении масштаба ущерба партнеры снижают активность инфраструктурного строительства, сокращая объем возможного фронта добычи полезных ископаемых и порождая спад функционала инвестора (рис. 4).

При неблагоприятном инвестиционном климате число запускаемых инфраструктурных проектов резко сокращается, и вся активность локализуется в секторе невысоких природоохранных затрат и ущерба. При дальнейшем росте *ZE* и *EPP* реализуется минимальная инфраструктурная программа с 8–10 производственными проектами из 50 возможных.

Кроме того, расчеты показывают, какую существенную роль, как для инвестора, так и для государства, играет качество инвестиционного климата. Причем не только регионального, но и в стране в целом: в минерально-сырьевом сегменте дисконты инвесторов во многом зависят от волатильности национальной валюты, поскольку они часто связаны с импортом технологий, а реализация продукции ориентирована на внешние рынки. Дисконт государства также связан с устойчивостью рубля: значительная доля импорта в потреблении косвенно влияет на внутреннюю инфляцию. При любых комбинациях природоохранных затрат и ущерба значение целевой функции в условиях *A* в разы выше, чем в условиях *B*. Это соотношение сигнализирует

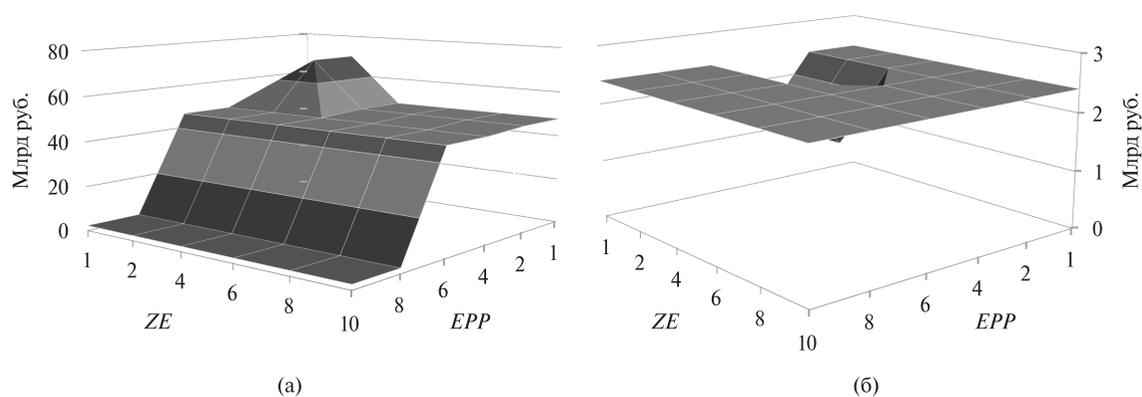


Рис. 5. Затраты инвестора на инфраструктуру

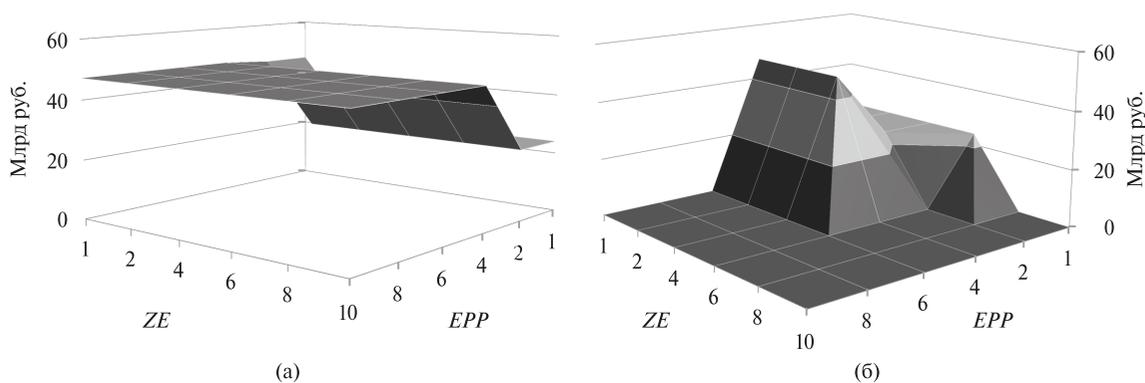


Рис. 6. Затраты государства на инфраструктуру

о том, что усилия, направленные, в частности, на снижение волатильности курса национальной валюты и предсказуемости внутренней и внешней политики (в том числе уменьшение зависимости курса от мировых сырьевых рынков, предотвращение геополитической напряженности и др.), могут дать гораздо более высокий экономический результат, чем формирование новых институтов развития, нацеленных на привлечение инвестиций. Дальневосточный опыт применения таких институтов демонстрирует противоречивые результаты (Минакир, 2019; Минакир, Найден, 2020).

Каким образом инфраструктурный фронт делится между партнерами?

В условиях *A* инвестор проявляет максимальную активность в строительстве инфраструктуры для проектов добычи, использующих «чистые» технологии с небольшими затратами. Для всех прочих технологий затраты инвестора на инфраструктуру не зависят от масштаба *ZE* и определяются масштабом ущерба. Зависимость имеет вид ступени и фиксирует резкое — в десятки раз — падение инфраструктурных затрат инвестора при существенном увеличении масштаба ущерба. Примерно такую же реакцию инвестора вызывает ухудшение инвестиционного климата — для условий *B* фронт инфраструктурного строительства инвестора минимален на всем спектре изменения экологических параметров технологий добычи (рис. 5–6).

Государство в неблагоприятных условиях сценария *B* не берет на себя никаких инфраструктурных проектов, как только инвестор начинает использовать технологии с уровнем затрат и ущерба выше среднего. В условиях *A* государство меняет инвестиционную политику, строя инфраструктуру для всех технологий и регулируя уровень затрат только в зависимости от *EPP*.

В результате в благоприятном инвестиционном климате с ростом масштаба ущерба государству приходится наращивать свою долю в общем объеме инфраструктурных затрат, стартуя от уровня

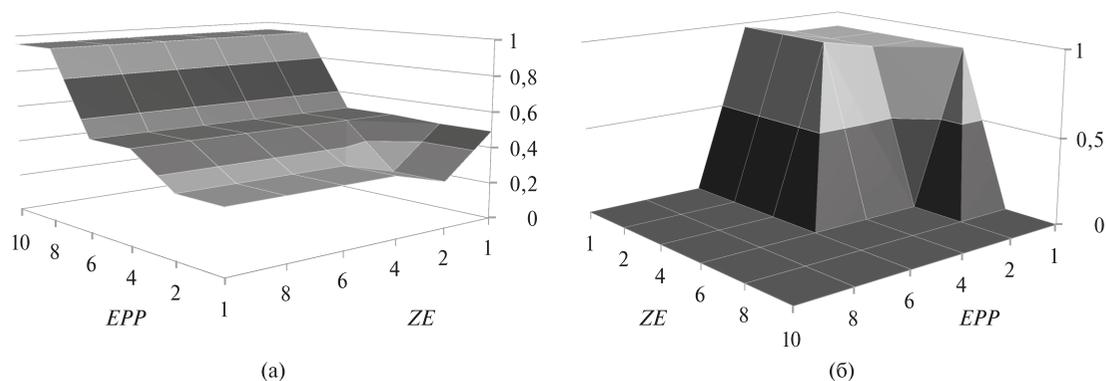


Рис. 7. Доля государства в затратах на инфраструктурное строительство

35–40% до уровня 90–95%. В условиях *B* государство берет на себя практически все инфраструктурные затраты для технологий с уровнем затрат и ущерба ниже среднего (рис. 7).

Такая стратегия определяет результаты раздела природно-ресурсной ренты в зависимости от экологических параметров используемых технологий. На рис. 8 представлен объем ренты², полученной государством в виде налоговых платежей. Анализ поверхностей позволяет утверждать, что в благоприятных инвестиционных условиях государство практически не теряет ренты при использовании дорогих «зеленых» технологий. Переход к более «грязным» проектам добычи резко увеличивает долю затрат государства и снижает объем ренты, получаемой государством. При переходе к инвестиционным условиям *B* уровень рентных доходов государства падает кратно, и для повышения эффективности это обстоятельство должно заставить выбирать технологии с малым уровнем экологических затрат и ущерба. На практике государство далеко не всегда действует рационально, поскольку лица, принимающие решение, часто имеют другую доминирующую мотивацию — например улучшить показатели привлечения инвестиций. Поэтому не исключено, что будут реализованы проекты с худшими экологическими последствиями, что иногда провоцирует местные экологические конфликты.

Каким образом между партнерами делится фронт природоохранного строительства?

В работе (Глазырина, Лавлинский, 2018; Glazyrina, Lavlinskii, 2017) показано, что для российской модели ГЧП, в которой инфраструктуру строит только государство, в некоторых случаях эффективной оказывается стратегия дополнительной помощи государства и в реализации части природоохранных проектов. В модели (1)–(19), в которой фронт как инфраструктурного, так и природоохранного строительства теоретически делится между партнерами, такого не происходит — как показывают расчеты, государство не берет на себя ни одного природоохранного проекта ($y_k = 0, k = 1, \dots, NE$). Это связано с наличием механизма компенсаций с фиксированным лагом (3).

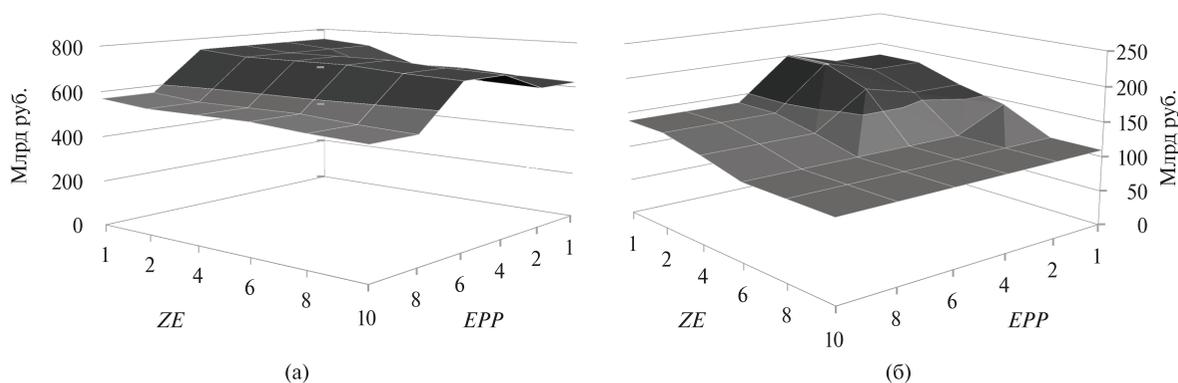


Рис. 8. Объем ренты, получаемой государством

² Рентной оценки совокупности месторождений, включенных в программу (Глазырина, Лавлинский, 2018).

Государству невыгодно брать на себя реализацию части природоохранных проектов, финансирование которых начинается достаточно рано и в жестком графике. Ему проще предоставить помощь такого рода в виде расширенных компенсаций, компенсирующих не только расходы инвестора на инфраструктуру (8), но и часть его природоохранных затрат.

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В регионах Сибири и Дальнего Востока при реализации минерально-сырьевых проектов возникают новые экологические риски, связанные с многократным усилением негативного воздействия на окружающую среду. Увеличение постоянно и временно проживающего на данной территории населения также приводит к дополнительным экологическим издержкам, росту объемов коммунальных отходов и стоков и общей деградации локальных экосистем. Это обстоятельство необходимо учитывать при формировании программы освоения минерально-сырьевой базы. Во многих случаях необходимо создавать средозащитную инфраструктуру практически с нуля. В рамках такой программы необходимо решить, какая производственная инфраструктура нужна для развития территории и привлечения инвесторов и можно ли пойти на дополнительное расходование бюджетных средств для оказания помощи инвестору в инфраструктурном и природоохранном строительстве.

Такая постановка вопроса иногда встречает возражения сторонников применения принципа «загрязнитель платит» (*polluter pays principle*³). Однако бенефициаром реализуемых проектов является не только производственная компания, но и общество в целом, получающее оплачиваемые рабочие места и поступления в бюджеты всех уровней и, таким образом, — часть рентных доходов. Использование их для природоохранных целей согласуется с идеей экологического предназначения природно-ресурсной ренты, которую авторы разделяют и считают убедительно обоснованной в рамках экономической теории (Рюмина, 2001, 2009) Похожий механизм используется при планировании ГЧП в некоторых развивающихся странах (Lall, 1999).

Результаты имитационного моделирования позволили выявить скрытые риски снижения доходов, количественно оценить различия в эффективности проектов как для инвестора, так и для государства при различных инвестиционных условиях и широком спектре необходимых природоохранных расходов. Вышеописанная двухуровневая модель математического программирования (1)–(19) может служить основой практической методологии формирования инвестиционной политики государства в малоосвоенном ресурсном регионе. Учет в модели экологических факторов и особенностей иерархии взаимодействия государства и частного инвестора в минерально-сырьевом секторе позволяет найти компромисс интересов бюджета и частного инвестора, основанный на идеях «зеленой» экономики. Генерируемая в модели программа освоения природно-ресурсного комплекса может послужить основой формирования реальных стратегических планов строительства производственной инфраструктуры, стимулирующих приход частного инвестора на территорию.

Полученные нами данные дают возможность определить количественные параметры расходов публичных финансовых ресурсов, при которых участие государства может принести наилучшие результаты. Проведенные численные эксперименты на реальной информации позволяют говорить о практической значимости предлагаемого инструментария. По результатам экспериментов могут быть сформулированы следующие основные выводы, позволяющие поддержать процесс управления минерально-сырьевым сектором.

В условиях регионов с благоприятным инвестиционным климатом и развитыми институтами, совокупно обеспечивающими невысокий дисконт потенциального инвестора, эффективной для государства является стратегия привлечения инвестора с «чистыми» технологиями добычи, обеспечиваемыми достаточным уровнем природоохранных затрат. Механизм партнерства в этих условиях дестимулирует инвестора использовать проекты добычи со значительным воздействием на окружающую среду.

Ухудшение инвестиционного климата приводит к сокращению объемов инфраструктурного строительства и снижению темпов освоения минерально-сырьевой базы. В этих условиях эффективно использовать проекты добычи только с минимальным уровнем природоохранных затрат и ущерба от экологических нарушений.

³ OECD: Better policies for better lives (<https://www.oecd.org/env/>).

«Зеленые» технологии и благоприятный инвестиционный климат вместе стимулируют активность инвестора в инфраструктурном строительстве. Пропорции разделения затрат на реализацию таких проектов смещаются в сторону государства при росте неблагоприятного воздействия технологий на окружающую среду и ухудшении условий работы инвестора в регионе.

Государству, заинтересованному в получении рентных доходов, целесообразно в рамках бюджетных ограничений участвовать в инфраструктурном строительстве и стимулировать использование «зеленых» природоохранных технологий добычи полезных ископаемых. При прочих равных условиях улучшение инвестиционного климата приводит к значительному росту ренты, получаемой государством в виде налоговых платежей.

Механизм компенсаций, заложенный в основу классической модели ГЧП, позволяет эффективно помогать инвестору и в реализации части природоохранных проектов. Для государства предпочтительнее механизм расширенных компенсаций, покрывающих не только расходы инвестора на инфраструктуру, но и часть его природоохранных затрат.

Стратегия выбора более высоких текущих затрат на реализацию природоохранных проектов и вследствие этого более низкого постпроектного ущерба от экологических нарушений является предпочтительной как для государства, так и для инвестора, независимо от качества инвестиционного климата.

Таким образом, основной задачей государства на малоосвоенной ресурсной территории в процессе формирования инвестиционной политики является выбор согласованных стратегических планов создания инфраструктуры и реализации природоохранных мероприятий. Сложившийся на территории инвестиционный климат определяет институциональные особенности такого выбора. В его основе — взаимосвязанные процедуры распределения затрат и взаиморасчетов, эффективность которых определяется уровнем взаимного доверия государства и инвестора. Если такой уровень доверия достигнут, то предлагаемый математический инструментальный позволяет сформировать инвестиционную политику, эффективную в долгосрочном плане.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- Варнавский В.Г.** (2009). Государственно-частное партнерство. Т. 1. М.: ИМЭМО РАН. [Varnavskiy V.G. (2009). *Public private partnership*. Vol. 1. Moscow: IMEMO RAN (in Russian).]
- Глазырина И.П., Лавлинский С.М.** (2018). Транзакционные издержки и проблемы освоения минерально-сырьевой базы ресурсного региона // *Журнал Новой экономической ассоциации*. № 2 (38). С. 121–143. [Glazyrina I.P., Lavlinskii S.M. (2018). Transaction costs and problems in the development of the mineral and raw-material base of the resource region. *Journal of the New Economic Association*, 2 (38), 121–143 (in Russian).]
- Лавлинский С.М.** (2008). Модели индикативного планирования социально-экономического развития ресурсного региона. Новосибирск: Издательство СО РАН. [Lavlinskii S.M. (2008). *Models of indicative planning of socio-economic development of a resource region*. Novosibirsk: Publishing House of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (in Russian).]
- Минакир П.А.** (2019). Дальневосточные институциональные новации: имитация нового этапа // *Пространственная экономика*. Т. 15. № 1. С. 7–17. [Minakir P.A. (2019). Far Eastern institutional innovations: Imitation of a new stage. *Spatial Economics*, 15, 1, 7–17 (in Russian).]
- Минакир П.А., Найден С.Н.** (2020). Социальная динамика на Дальнем Востоке: дефект идей или провал институтов? // *Регион: Экономика и Социология*. № 3 (107). С. 30–61. [Minakir P.A., Naiden S.N. (2020). Social dynamics in the Far East: Defective ideas or failure of institutions? *Region: Economics and Sociology*, 3 (107), 30–61 (in Russian).]
- Натхов Т.В., Полищук Л.И.** (2017). Политэкономика институтов: как важно быть инклюзивным. Размышления над книгой Д. Асемоглу, Дж. Робинсона “Why Nations Fail”. Ч. 1: Институты и экономическое развитие. Институциональный выбор // *Журнал Новой экономической ассоциации*. № 2. С. 12–38. [Natkhov T.V., Polishchuk L.I. (2017). The political economy of institutions: The importance of being inclusive. Reflections on the book by D. Acemoglu, J. Robinson “Why Nations Fail”. Part 1: Institutions and economic development. Institutional Choice. *Journal of the New Economic Association*, 2, 12–38 (in Russian).]
- Резниченко Н.В.** (2010). Модели государственно-частного партнерства // *Вестник Санкт-Петербургского университета. Сер. 8, Менеджмент*. № 4. С. 58–83. [Reznichenko N.V. (2010). Models of public-private partnership. *Bulletin of St. Petersburg University. Ser. 8, Management*, 4, 58–83 (in Russian).]

- Рюмина Е. В.** (2001). Экологическая версия предназначения природной ренты // *Экономическая наука современной России*. № 2. С. 11–22. [Ryumina E.V. (2001). Ecological version of the destination of natural rent. *Economics of Contemporary Russia*, 2, 11–22 (in Russian).]
- Рюмина Е. В.** (2009). Экономический анализ ущерба от экологических правонарушений. М.: Наука. [Ryumina E.V. (2009). *Economic analysis of damage from environmental offenses*. Moscow: Nauka (in Russian).]
- Сластников А. Д.** (2010). Оптимизация участия государства в софинансировании проектов в условиях государственно-частного партнерства // *Экономика и математические методы*. Т. 46. № 4. С. 69–81. [Slastnikov A.D. (2010). Optimization of state participation in project co-financing in the conditions of public-private partnership. *Economics and Mathematical Methods*, 46, 4, 69–81 (in Russian).]
- Blazek M.** (2004). Analytical tools for environmental design and management. *Ecological Economics*, 49, 4, 446–462.
- Broadbent J., Laughlin R.** (2003). Public private partnerships: An introduction. *Accounting, Auditing and Accountability Journal*, 16, 3, 332–341.
- Glazyrina I., Chavkin A.** (2021). New estimates of eco-intensity considering the hazardous industrial pollution accumulation. In: *E3S Web of Conferences*, 258, 08003. DOI: 10.1051/e3sconf/202125808003
- Glazyrina I., Lavlinskii S.** (2017). Economic and ecological models in Russia's mining sector. *Regional Research of Russia*, 7, 2, 180–187.
- Grimsey D., Levis M.** (2004). *Public private partnerships: The worldwide revolution in infrastructure provision and project finance*. Cheltenham, UK, Northampton, MA: Edward Elgar.
- Hodge G., Greve C.** (2007). Public-private partnerships: An international performance review. *Public Administration Review*, 6, 37–49.
- Korhonen J., Snakin J.** (2005). Analyzing the evolution of industrial ecosystems: Concepts and application. *Ecological Economics*, 52, 2, 112–119.
- Lakshmanan T.R.** (2011). The broader economic consequences of transport infrastructure investments. *Journal of Transport Geography*, 19, 1, 1–12.
- Lall S.V.** (1999). The role of public infrastructure investments in regional development: Experience of Indian states. *Economic and Political Weekly*, 34, 12, 717–725.
- Lavlinskii S.M.** (2010). Public-private partnership in a natural resource region: Ecological problems, models, and prospects. *Studies on Russian Economic Development*, 21, 1, 71–79.
- Lavlinskii S., Panin A., Pliashunov A.** (2016). Comparison of models of planning the public-private partnership. *Journal of Applied and Industrial Mathematics*, 10 (3), 1–17.
- Lehtonen M.** (2004). The environmental-social interface of sustainable development: Capabilities, social capital, institutions. *Ecological Economics*, 49, 2, 156–177.
- Mackie P., Worsley T., Eliasson J.** (2014). Transport appraisal revisited. *Research in Transportation Economics*, 47, 3–18.

Ecological and economic models in the mineral and resource sector of Russia: Formation of investment policy based on public-private partnership

© 2022 I.P. Glazyrina, S.M. Lavlinskii, L.L. Yakovleva

I.P. Glazyrina,

Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology, Siberian Branch of RAS, Chita, Russia; e-mail: iglazyrina@bk.ru

S.M. Lavlinskii,

Sobolev Institute of Mathematics, Siberian Branch of RAS, Novosibirsk, Russia; e-mail: lavlin@math.nsc.ru

L.L. Yakovleva,

Transbaikal State University, Chita, Russia; e-mail: lidia70@mail.ru

Received 12.02.2022

The study was carried out within the framework of the state contract of the Sobolev Institute of Mathematics (project no. FWNF-2022-0019). This work was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research (project no. 20-010-00151).

Abstract. The article proposes a mathematical model for the elaboration of a program for the development of the mineral resource industries. It explicitly formalizes the mechanism of public-private partnership and takes into account the negative impact of mining technologies on the environment. The model is based on the Stackelberg game and the tools of bi-level mathematical programming. This makes it possible to take into account the peculiarities of the hierarchy of interaction between the government bodies and the private investor in the mineral resource sector and to build a practical methodology for the formation of a “green” program for the natural resources’ use. The model database is built on the basis of special predictive models that describe in detail the processes of implementing various types of projects. The proposed approach has been tested on real data describing a fragment of the mineral resource base of the Trans-Baikal Territory. The goal of the numerical experiment is to assess the correlation of the investment policy effectiveness formed in the model on the quality of the investment climate, the scale of costs for environmental protection measures and the cost assessment of the environmental damage generated by the applied mining technologies. The simulation results allow us to formulate a number of conclusions for the development of strategic plans for the construction of industrial infrastructure, attracting a private investor who is ready to work in line with the ideas of “green” economy.

Keywords: resource region, sustainable development, state-investor partnership mechanisms, natural resource rent section, Stackelberg model, bilevel mathematical programming problem.

JEL Classification: C6, Q32.

For reference: **Glazyrina I.P., Lavlinskii S.M., Yakovleva L.L.** (2022). Ecological and economic models in the mineral and resource sector of Russia: Formation of investment policy based on public-private partnership. *Economics and Mathematical Methods*, 58, 3, 57–69. DOI: 10.31857/S042473880020029-0