

Для цитирования: Потравный И. М., Новоселов А. Л., Новоселова И. Ю. Оптимизация использования ресурсов техногенных месторождений с учетом факторов неопределенности // Экономика региона. — 2017. — Т. 13, вып. 4. — С. 1280-1290

doi 10.17059/2017-4-24

УДК 304.2 : 338.622

JEL: Q56

И. М. Потравный, А. Л. Новоселов, И. Ю. Новоселова

Российский экономический университет им. Г. В. Плеханова (Москва, Российская Федерация; e-mail: econaudit@bk.ru)

## ОПТИМИЗАЦИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕСУРСОВ ТЕХНОГЕННЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ С УЧЕТОМ ФАКТОРОВ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ<sup>1</sup>

*Предмет статьи — проблема истощения и исчерпания природных ресурсов, вовлечения отходов производства, ресурсов техногенных месторождений в хозяйственный оборот в целях сохранения природного капитала и обеспечения «зеленого» роста экономики. Это предопределяет необходимость разработки механизма оптимизации природопользования, направленного на использование техногенных месторождений в экономике, для обеспечения снижения природоемкости продукции, снижения затрат на ее производство, сокращения негативного воздействия производства на окружающую среду. Предлагается построение модели экономической целесообразности использования отходов на основе теории устойчивого развития, теории замещения первичных природных ресурсов ресурсами-заменителями, в качестве которых рассматриваются полезные продукты, ресурсы из техногенных месторождений, которые были образованы в результате прошлой хозяйственной деятельности. В статье рассмотрена проблема накопления твердых коммунальных и промышленных отходов в регионах России с позиции формирования и эксплуатации постоянно растущих техногенных месторождений. Авторами предлагается набор моделей оптимальной эксплуатации техногенных месторождений, учитывающих различные факторы внешней и внутренней среды и фактор времени. Предложенные модели позволяют обосновать и выбрать наилучшие технологии переработки накопленных отходов с учетом снижения загрязнения окружающей среды и получения «зеленых» доходов от эксплуатации техногенного месторождения. Для учета вероятностных оценок геологической структуры техногенного месторождения предложено использовать сочетание метода статистических испытаний и разработанной оптимизационной модели. Приводятся результаты практических расчетов и перспективы построения комплексной модели регионального использования техногенных месторождений. Результаты исследования позволяют сформировать оптимальный набор проектов для переработки отходов и реабилитации нарушенных территорий на уровне региона. Предлагаемый экономико-математический инструментальный будет полезен для актуализации и реализации федеральной целевой программы «Ликвидация накопленного экологического ущерба» на 2015–2026 гг.*

**Ключевые слова:** «зеленая» экономика, истощение природных ресурсов, техногенное месторождение, отходы, накопленный экологический ущерб, показатели эффективности, эксплуатация месторождений, оптимизационная модель, вероятностная оценка, метод статистических испытаний, вероятностная кривая NPV

### Введение. Постановка проблемы и актуальность для регионального развития

Как отмечается в докладе «Об экологическом развитии Российской Федерации в интересах будущих поколений» (2016 г.), для обеспечения своей жизнедеятельности человечество на протяжении сотен лет использует и производит сотни различных материалов. При этом объем суммарного потребления всех базовых материалов в 2015 г. приблизился к 90 млрд т,

что в 20 раз выше уровня 1900 г. Численность населения планеты за этот период выросла в 4,6 раз, глобальный ВВП — в 33 раза, потребление всех материалов — в 12 раз, ископаемых источников топлива — в 16 раз, металлических руд — в 43 раза, сырья для производства строительных материалов — в 59 раз. Анализ сверхдолгосрочных (за 115 лет) и современных тенденций последних 40 лет говорит о том, что в XX и XXI вв. потребление базовых материалов заметно ускорилось<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> © Потравный И. М., Новоселов А. Л., Новоселова И. Ю. Текст. 2017.

<sup>2</sup> Доклад «Об экологическом развитии Российской Федерации в интересах будущих поколений». — М. :

В значительной мере подтверждаются прогнозы Римского клуба о том, что потребление материалов растет практически по экспоненте [1] и увеличилось в 12 раз за 115 лет. Потребление минеральных (ископаемых) материалов росло значительно быстрее использования биомассы, за счет этого в структуре используемых материалов произошел фундаментальный сдвиг от доминирования биомассы к доминированию ископаемых материалов.

В то же время на добычу и переработку природных ресурсов приходится львиная доля негативного воздействия на окружающую среду: загрязнение атмосферы и воды, выбросы парниковых газов и производство отходов. Высокая материалоемкость глобальной экономики является причиной истощения и исчерпания ряда природных ресурсов. Речь идет, прежде всего, об ископаемом топливе, руде и минеральных ресурсах. В этих условиях эффективное повторное использование материалов и вовлечение отходов в хозяйственный оборот могут существенно уменьшить риски как истощения их ресурсной базы, так и негативного воздействия на окружающую среду.

В этой ситуации проблема истощения природных ресурсов, накопления отходов, загрязнения атмосферного воздуха, воды и почвы, и связанные с ними проблемы потери биоразнообразия и изменения климата, которые в значительной мере обусловлены добычей и сжиганием ископаемого топлива, относятся к числу семи основных глобальных экологических проблем современности. В процессе функционирования экономики в Российской Федерации ежегодно образуется около 5 млрд т отходов производства и потребления, что в два раза выше, чем в странах Евросоюза. Отвалы обогатительных фабрик ежегодно растут на 700 млн т. Общий объем накопленных отходов составляет около 80 млрд т отходов, в том числе более 2 млрд т золы ТЭС, ТЭЦ, ГРЭС, шлаков черной и цветной металлургии [2]. В России величина накопленных отходов составила 31,5 млрд т (по состоянию на конец 2015 г.). Только на Урале общее количество накопленных отходов достигает 10 млрд т., из них около 98 % — неопасные минеральные отходы добывающей промышленности (вскрышные и попутные породы, хвосты обогащения). В Мурманской области ежегодно складывается более 150 млн т отходов, общий объем которых к настоящему

времени достиг 8 млрд т<sup>1</sup>. Разведанные запасы меди в 67 млн т, запасы цинка — 42 млн т (при годовой добыче 0,8 млн т и 0,4 млн т соответственно), в частности, в промышленных отходах сосредоточено более 8 млн т меди, 9 млн т цинка и иных полезных компонентов [3]. При этом добыча полезных ископаемых на базе традиционных месторождений становится все более затратной. Например, Талнахское медно-никелевое месторождение, расположенное на севере Красноярского края, имеет глубину шахт более 600 м. В настоящее время нередки шахты глубиной более 1 км.

Накопленные отходы промышленного производства распределены по территории Российской Федерации весьма неравномерно и соответствуют сложившейся схеме размещения производительных сил. На долю Свердловской области приходится до 30 % отходов. Наибольшие объемы отходов сосредоточены в Уральском федеральном округе, районе Курской магнитной аномалии, Тульской и Рязанской областях [4].

На заседании Государственного совета по вопросу об экологическом развитии Российской Федерации в интересах будущих поколений 27 декабря 2016 г. отмечалось, что по ряду направлений нагрузка на природу достигла критических значений. Согласно результатам всероссийского опроса общественного мнения, который в декабре 2016 г. проводил ВЦИОМ, почти 45 % респондентов называют отходы основной угрозой для окружающей среды. Поэтому сформулирована необходимость перехода к «зеленому», экологически устойчивому развитию в качестве национального стратегического приоритета<sup>2</sup>.

К числу приоритетных относится и задача переработки и обезвреживания отходов производства и потребления. Их общее количество составляет сейчас свыше 30 млрд т. Свалки занимают почти 48 тыс. га. В России более 90 % всех образующихся твердых коммунальных отходов (ТКО) направляется на захоронение. В настоящее время уровень утилизации ТКО — 8 %. Ожидается, что к 2025 г. этот показатель составит около 40 %. В настоящее время сред-

<sup>1</sup> Новый виток в истории освоения техногенных россыпей // Золотодобыча. — 2016. — № 209 (апр.) [Электронный ресурс]. URL: <https://zolotodb.ru/articles/docs/discuss/11441> (дата обращения 20 янв. 2017).

<sup>2</sup> Заседание Государственного совета по вопросу об экологическом развитии Российской Федерации в интересах будущих поколений 27.12.2016 // Президент России [Электронный ресурс]. URL: <http://www.kremlin.ru/events/president/news/53602>.

недушевой объем таких возрос до 393 кг/год, в то время как в других развитых странах этот показатель составляет 400–700 кг/год. В состав таких отходов входит экологически опасная продукция (аккумуляторные батареи, люминесцентные лампы, автомобильные шины, полиэтиленовая упаковка и посуда и др.). Основная масса данных отходов в России отправляется на полигоны, и лишь 7 % отправляется на мусороперерабатывающие заводы, а около 2,5 % — на мусоросжигательные заводы.

Рамочная Директива по отходам ЕС устанавливает целевой показатель утилизации твердых коммунальных отходов на уровне 50 % к 2020 г. при уровне 2016 г. около 30 % [5]. ЮНЕП поставило задачу обеспечения охвата сбора и утилизации таких отходов в полном объеме [6]. Многие страны со средним уровнем дохода, к которым относится Россия, уже решили эту задачу. В Германии, Австрии, Бельгии и Швейцарии уже сейчас перерабатывается более половины отходов. Доля захораниваемых отходов в ЕС снизилась до 33 %, а в таких странах, как Австрия, Дания, Норвегия, Нидерланды, Бельгия, Швеция и Германия, муниципальные отходы практически не отправляются на свалку. В среднем на 1 т извлеченного природного сырья приходится 2 т отходов (отвалов породы, строительного мусора и т. п.). Объемы использования и обезвреживания отходов в России составили в 2015 г. 2,7 млрд т или 53 %, что несколько выше данного показателя по странам Евросоюза (52 %). В Китае, Гонконге и других странах данная проблема в настоящее время также рассматривается как весьма актуальная [7]. В этих условиях важной задачей является разработка научного инструментария и экономико-математических моделей по оптимизации использования ресурсов техногенных месторождений и отходов с учетом факторов неопределенности.

### **1. Промышленные и коммунальные отходы как техногенные месторождения XXI в.**

На уровне администраций субъектов Федерации планируются меры по снижению отходов, в числе которых наиболее распространенная — введение дополнительного налогообложения для развития малоотходных производств и экологически безопасной утилизации отходов. Следует отметить, что этот путь является тупиковым, поскольку приводит к росту коммунальных платежей, недовольству населения, загрязнению атмосферного воздуха при сжигании отходов. В годовой массе твер-

дых коммунальных отходов потенциальным вторичным сырьем является макулатура, пищевые отходы, полимерные материалы, черные и цветные металлы, стекло. При этом лом черных и цветных металлов должен быть отсортирован с помощью магнитной сепарации, спрессован и отправлен на предприятия литейного производства для переплавки. Повторное использование полимерных остатков требует чрезмерно высоких затрат в силу их высокой степени загрязнения и не соответствия качественным требованиям. Вторичная переработка полимеров осуществляется только в случае отсутствия жестких требований к полученному материалу, например, при производстве строительных материалов (наполнителей). Остатки стекла могут быть использованы для производства технического стекла, применяющегося в строительстве. Бумажные отходы могут быть использованы для производства бумаги. Остатки электронных устройств позволяют при переработке получить золото, серебро, палладий, никель, железо, медь и стеклополимеры. Отходы нефтепродуктов дают возможность получить асфальт, битум, масла.

Еще более перспективны накопленные запасы горнорудного производства, ТЭЦ, предприятий первичной переработки руд [8]. Например, в Канаде из отходов меднорудных предприятий, извлекается до 40 % меди благодаря новым способам переработки. Добыча медного концентрата из природного сырья в Болгарии в три раза выше, чем из техногенных месторождений [9]. Максимальное использование полезных компонентов техногенного сырья, образованного только в горном производстве, позволит увеличить объем производимой в Российской Федерации промышленной продукции на 10 трлн руб., налоговые отчисления в бюджет может составить до 20 млрд руб. в год (в ценах 2010 г.) [10].

### **2. Теоретико-практические аспекты экономической целесообразности использования техногенных месторождений в регионе**

В настоящее время значительное число работ посвящено прогнозированию объемов образования отходов в мегаполисах [11–13]. Важнейшей причиной незначительного интереса к использованию техногенных месторождений являются, прежде всего, высокие затраты на извлечение полезной продукции, превышающие затраты на добычу традиционных полезных ископаемых. Кроме того, следует отметить нестабильный процент извлечения по-

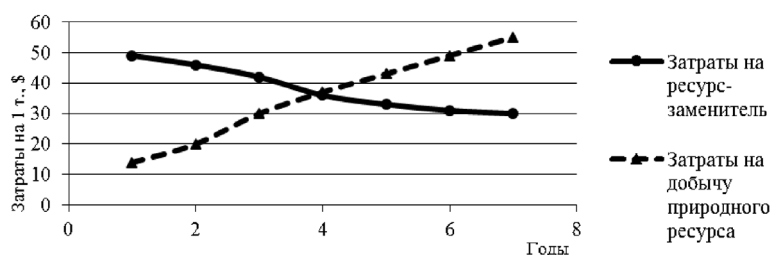


Рис. 1. Результаты расчетов на базе модели для оценки экономической целесообразности начала разработки техногенного месторождения

лезного продукта при разработке техногенного месторождения. Однако на преодоление негативного соотношения затрат на добычу полезной продукции на традиционном (природном) и техногенном месторождении оказывает влияние ряд факторов:

- снижение капитальных затрат на освоение техногенного месторождения, поскольку отвалы (отходы) производства находятся в районах с развитой промышленной и транспортной инфраструктурой;

- сокращение затрат на подземные разработки вследствие размещения техногенных месторождений преимущественно на земной поверхности;

- сокращение текущих затрат на добычу в результате раздробленного состояния горной массы в техногенном месторождении;

- сокращение затрат на добычу в результате научно-технического прогресса — развития новых, более эффективных и менее затратных технологий добычи и переработки минерального сырья;

- рост затрат на добычу полезных ископаемых на природных месторождениях вследствие обеднения природных месторождений.

Модель оценки экономической целесообразности использования отходов может быть построена на базе теории замещения природных ресурсов ресурсами-заменителями, в качестве которых выступают полезные ископаемые (продукты) из техногенного месторождения. В качестве критерия оптимальности следует воспользоваться максимизацией чистого дисконтированного дохода [14]. Экономико-математическая модель, позволяющая оценить объемы и сроки экономически выгодного извлечения ресурсов из техногенного месторождения без учета экономической оценки снижения ущерба окружающей среде, может быть записана в представленном ниже виде.

*Критерий:*

- максимизация чистого дисконтированного дохода от использования продукта на основе техногенного месторождения

$$\sum_{t=0}^T [U(C_t) - R_t(X_t) - Z_t(Y_t)](1+E)^{-t} \rightarrow \max; \quad (1)$$

— обеспечение потребности общества в продукте

$$C_t \leq X_t + Y_t, \quad t = 0, 1, \dots, T; \quad (2)$$

— предельная емкость традиционного месторождения

$$\sum_{t=0}^T X_t \leq V; \quad (3)$$

— неотрицательность переменных

$$C_t \geq 0, X_t \geq 0, Y_t \geq 0, \quad t = 0, 1, \dots, T, \quad (4)$$

где  $U(C_t)$  — доход потребителей от использования полезного продукта в объеме  $C_t$ , руб.;  $R_t(X_t)$  — затраты на добычу полезного продукта в объеме  $X_t$  на базе традиционного (природного) месторождения, руб.;  $Z_t(Y_t)$  — затраты на получение полезного продукта из техногенного месторождения  $Y_t$ , руб.;  $V$  — годовой объем добычи полезного продукта в природной среде, т;  $E$  — коэффициент дисконтирования;  $t$  — текущее время (годы).

Момент экономически целесообразного использования ресурса-заменителя определяется пересечением кривой затрат на ресурс-заменитель и кривой затрат на добычу природного ресурса (рис. 1).

С учетом экономической оценки ущерба от загрязнения окружающей среды в выше приведенной модели будет изменен критерий оптимальности:

$$\sum_{t=0}^T [U(C_t) - R_t(X_t) - Z_t(Y_t) + W(Y_t)](1+E)^{-t} \rightarrow \max, \quad (5)$$

где  $W(Y_t)$  — экономическая оценка предотвращаемого ущерба окружающей среде от сокращения объема отходов (отвалов), руб.

Таким образом, эксплуатация техногенного месторождения становится выгодной в том случае, когда затраты на единицу (1 т) получаемой продукции из техногенного месторождения будут ниже затрат на единицу (1 т) продукции, получаемой из традиционного место-



рождения, за вычетом экономической оценки предотвращаемого ущерба окружающей среде за счет сокращения объема отходов. Решение этой задачи позволит определить наступление момента экономически выгодной эксплуатации техногенного месторождения.

Суммарные потери общества от функционирования полигонов и свалок, отказ от переработки отходов, накопленных на полигонах, приводят к потерям для общества, которые включают дополнительные затраты предприятий-загрязнителей за размещение отходов на полигонах, ущерб окружающей среде и дотации из бюджетов разных уровней. Традиционный подход в природопользовании ориентирован на частичное снижение ущерба от загрязнения окружающей среды за счет увеличения затрат предприятий-загрязнителей за размещение отходов и дотаций государства. Однако при этом растет цена на продукцию — как компенсация увеличения ее себестоимости. Если же будет реализован замкнутый цикл использования отходов, то ущерб окружающей среде будет ликвидирован, получена дополнительная прибыль предприятия от использования отходов, что позволит отказаться от дотаций государства и снизить цены на продукцию.

### 3. Модель оптимального выбора наилучшей технологии использования отходов

В случае разработки техногенного месторождения возникает вопрос полноты добычи тех полезных продуктов, которые могут быть извлечены из образовавшихся в прошлые периоды отвалов. При этом для извлечения одного и того же продукта могут быть использованы различные технологии добычи. При выборе технологии утилизации твердых отходов следует ориентироваться на снижение затрат на переработку единицы отходов, уменьшение капитальных вложений в переработку отходов, а также минимизировать величину ущерба окружающей среде. Учет перечисленных факторов должен обеспечивать рост прибыли от реализации единицы продукции. Тогда оптимизационная модель для выбора наилучшей технологии при многопродуктовой добыче из техногенного месторождения принимает вид:

— максимизация «зеленой» прибыли от эксплуатации техногенного месторождения

$$\sum_{i=1}^n P_{ij} V_{ij} - \sum_{i=1}^n Z_{ij} V_{ij} - Y_j \sum_{i=1}^n V_{ij} \rightarrow \max; \quad (6)$$

— ограничение по объему финансирования разработки техногенного месторождения

$$\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n D_j \times V_{ij} \leq B; \quad (7)$$

— предельные возможности эксплуатации природного месторождения

$$\sum_{j=1}^m V_{ij} = V_i; \quad (8)$$

— возможности получения продукта из техногенного месторождения с учетом используемой технологии

$$V_{ij} = \begin{cases} = 0, & \text{если } A_{ij} = 0, \\ \geq 0, & \text{если } A_{ij} = 1, \end{cases} \quad (9)$$

где  $i$  — вид продукта,  $i = 1, \dots, n$ ;  $j$  — технология добычи продукта,  $j = 1, \dots, m$ ;  $V_{ij}$  — объем продукта  $i$ -го вида, добываемого по  $j$ -й технологии, т;  $V_i$  — максимальный прогнозируемый объем возможности добычи  $i$ -го вида на природном месторождении, т;  $Z_{ij}$  — затраты на добычу единицы продукта  $i$  с помощью  $j$ -й технологии, руб/т;  $Y_j$  — ущерб, причиняемый окружающей среде при добыче единицы продукта по  $j$ -й технологии, руб/т;  $P_{ij}$  — цена за единицу добываемого полезного продукта  $i$  по  $j$ -й технологии, руб.;  $D_j$  — капитальные затраты на производство единицы мощности по переработке отходов по  $j$ -й технологии, руб.;  $B$  — объем инвестиций, руб.;  $A_{ij}$  — матрица, отражающая возможность переработки  $i$ -го вида отхода с помощью  $j$ -й технологии.

Данная модель позволяет определить объемы получения полезных продуктов из техногенного месторождения как более эффективных по сравнению с соответствующими продуктами из традиционного (природного) месторождения по технологиям при одновременном выборе наилучшего варианта технологий добычи с учетом снижения загрязнения окружающей среды. В этих условиях получаемую прибыль можно назвать «зеленой» прибылью от эксплуатации техногенного месторождения.

Приведенная модель имеет ряд недостатков, в том числе отсутствие учета динамики добычи полезных продуктов при эксплуатации техногенного месторождения, а также неучет факторов риска.

### 4. Оптимальное использование техногенного месторождения с учетом динамики его разработки

Для учета динамики разработки техногенного месторождения целесообразно воспользоваться общей моделью динамики добычи минерально-сырьевых ресурсов, базирующуюся на

щейся на прогнозном извлекаемом запасе полезного продукта [15]. Динамику добычи целесообразно представить изменением доли добываемого полезного продукта от суммарного объема запасов:

$$f_i(t) = \begin{cases} s \frac{t}{t_1} & | t = 1, 2, \dots, t_1 \\ s & | t = t_1 + 1, t_1 + 2, \dots, t_1 + t_2 \\ s \exp\{-\beta[t - (t_1 + t_2)]\} & | t = t_2 + 1, t_2 + 2, \dots, t_2 + t_3, \end{cases} \quad (10)$$

где  $s$  — относительная величина (доля от объема извлекаемых запасов) ежегодной добычи в период постоянной максимальной добычи;  $\beta$  — параметр падения добычи, значения которого обычно находятся в интервале 0,1–0,2;  $t_1$  — длительность периода нарастания добычи;  $t_2$  — длительность периода постоянной максимальной добычи;  $t_3$  — длительность периода сокращения добычи до ее завершения.

Использование зависимостей, отражающих динамику добычи (производства) продукции из техногенного месторождения, позволит определять годовой объем добычи (производства)  $X_{it}$  для каждого года  $t$ , исходя из максимального значения  $X_i^{\max}$  по формуле

$$X_{it} = X_i^{\max} f_i(t). \quad (11)$$

Тогда оптимизационная модель с критерием максимизации чистого дисконтированного дохода ( $NPV$ ) для техногенного месторождения должна позволять найти оптимальные значения  $X_i^{\max}$  в рамках ограничений по финансированию освоения техногенного месторождения  $V$  и предельному объему добываемого полезного ресурса  $\bar{Q}_i$ . Для этого можно воспользоваться следующим вариантом модели:

*Критерий:*

— максимизация чистого дисконтированного дохода

$$\sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^T [(P_i - S_i - I_{it} + \Delta Y_i) X_i^{\max} f_i(t)] (1+r)^{-t} \rightarrow \max; \quad (12)$$

— ограничение по пределу добычи полезного продукта

$$\sum_{t=1}^T X_i^{\max} f_i(t) \leq \bar{Q}_i, \quad i = 1, 2, \dots, n; \quad (13)$$

— ограничение по затратам на освоение месторождения

$$\sum_{i=1}^n I_i X_i^{\max} \leq B, \quad (14)$$

где  $P_i$  — цена полезного продукта  $i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ), руб.;  $S_i$  — себестоимость производства полезного продукта  $i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) из техногенного месторождения, руб.;  $I_{it}$  — удельные капитальные затраты на строительство предприятия по производству полезного продукта  $i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) из техногенного месторождения в год  $t$ , руб/т;  $Z_i$  — себестоимость производства полезного продукта  $i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) на основе традиционного сырья, руб.;  $\Delta Y_i$  — годовая величина предотвращаемого ущерба при добыче  $i$ -го полезного продукта из техногенного месторождения (отвала, полигона отходов и т. д.), руб/т.

Поскольку величина  $\bar{Q}_i$  достоверно неизвестна, затраты на освоение месторождения также зависят от его горно-геологических особенностей, а прогнозные значения  $f_i(t)$ , полученные с помощью модели (10), также не могут быть найдены достоверно, следует скорректировать модель (12–14) с учетом неопределенности указанных выше параметров. В модели (15–17) эти параметры представлены с учетом фактора неопределенности  $\omega$ .

*Критерий:*

— максимизация чистого дисконтированного дохода

$$\sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^T [(P_i - S_i - I_i + \Delta Y_i) X_i^{\max} f_i(t)] (1+r)^{-t} \rightarrow \max; \quad (15)$$

— ограничение по пределу добычи полезного продукта

$$\sum_{t=1}^T X_i^{\max} f_i(t, \omega) \leq \bar{Q}_i(\omega), \quad i = 1, 2, \dots, n; \quad (16)$$

— ограничение по затратам на освоение месторождения

$$\sum_{i=1}^n I_i(\omega) X_i^{\max} \leq B. \quad (17)$$

Для проведения расчетов была разработана вычислительная процедура, интегрирующая метод статистических испытаний с приведенной выше оптимизационной моделью. Параметры модели (15–17), зависящие от случайных факторов, задаются с помощью минимальной и максимальной границы, а также промежуточного (ожидаемого) значения, то есть в общем случае  $c = (c^{left}; c^{exp}; c^{right})$ . Тогда можно воспользоваться треугольным законом распределения [16].

$$c(\omega) = \begin{cases} c^{left} + \sqrt{\omega(c^{exp} - c^{left})(c^{right} - c^{left})}, \\ \text{при } \omega \leq \frac{c^{exp} - c^{left}}{c^{right} - c^{left}}, \\ c^{right} - \sqrt{(1-\omega)(c^{right} - c^{exp})(c^{right} - c^{left})}, \\ \text{при } \omega > \frac{c^{exp} - c^{left}}{c^{right} - c^{left}}, \end{cases} \quad (18)$$

где  $\omega \in (0, 1)$  случайное число, полученное с помощью генератора случайных чисел.

В соответствии с методом статистических испытаний, следует провести большое число расчетов параметров модели (15–17), например,  $N = 1000$ . Это позволит для каждого из полученных вариантов сформировать различные численные значения рассматриваемой модели и для них провести оптимизационные расчеты. Это даст возможность получить вероятностную оценку  $NPV$  от эксплуатации техногенного месторождения, а для каждого из узлов, используемых при построении вероятностной кривой найти интервал оптимальных значений добычи полезных продуктов из техногенного месторождения.

Такой подход позволяет обеспечить реализацию принципа ресурсосбережения и создать условия для взаимодействия заинтересованных сторон при осуществлении экологически ориентированных проектов [17]. Кроме того, создаются экономические условия для реабилитации нарушенных земель в зоне добычи полезных ископаемых, для ликвидации накопленного экологического ущерба [18].

### 5. Пример расчета вероятностной оценки $NPV$ при эксплуатации техногенного месторождения на основе предложенного инструментария

В качестве объекта было использовано техногенное месторождение, образованное в результате работы ТЭЦ. На основе геологического изыскания были определены полезные продукты, которые можно добыть на этом месторождении: вяжущие материалы для цементной промышленности, аглопорит (искусственный пористый заполнитель легкого бетона), компоненты для производства шлакоблоков, шлаковата и шлаковая пемза, сырье для производства глинозема и синтетических цеолитов [19]. На рассматриваемом месторождении было рекомендовано добывать три вида продукции:  $x_1$  — вяжущие материалы для цементной промышленности;  $x_2$  — компоненты для производства шлакоблоков;  $x_3$  — сырье для производства синтетических цеолитов. Решение задачи про-

водилось с помощью модели (10–18), которая позволила определить вероятностную оценку экономической целесообразности разработки техногенного месторождения.

В таблице приведены результаты применения метода статистических испытаний, позволившие определить для каждого из вариантов расчетов (число расчетов  $N = 1000$ ) оптимальное значение  $NPV$  при эксплуатации техногенного месторождения.

Таблица

Результаты обработки данных, полученных на основе синтеза метода статистических испытаний и оптимизационной модели

Номер	Границы значений $NPV$ , млн руб.	Частоты	
1	7759,53	8343,56	10,0
2	8343,56	8927,59	30,8
3	8927,59	9511,62	43,0
4	9511,62	10095,65	14,2
5	10095,65	10679,68	2,0

На основе данных, приведенных в таблице, были определены вероятностные оценки достижения граничных значений  $NPV$ . С использованием этих вероятностей построена вероятностная кривая оценки эффективности эксплуатации техногенного месторождения (рис. 2).

На рисунке 2 для нескольких выделенных интервалов приведены границы добычи каждого из полезных продуктов. Результаты расчетов показывают, что рост  $NPV$  обеспечивается достаточно равномерным увеличением добычи всех трех видов полезной продукции. Минимальное значение  $NPV$ , равное 7759,53 млн руб., оказывается положительным, а срок окупаемости при этом оказался на уровне 3,5 года, что подтверждает экономическую целесообразность эксплуатации месторождения.

С 60 % вероятностью  $NPV$  возрастет до 8927,59 млн руб. при снижении срока окупаемости до 3,2 года. Выход на такие значения показателей эффективности может быть достигнут при благоприятных геологических условиях рассматриваемого техногенного месторождения.

### Заключение

Применение разработанного инструментария позволяет использовать для реализации подобных проектов как бюджетные источники финансирования, так и внебюджетные средства, сделать привлекательной данную сферу экономической деятельности по переработке отходов для бизнеса [20]. Разработанное авторами ме-

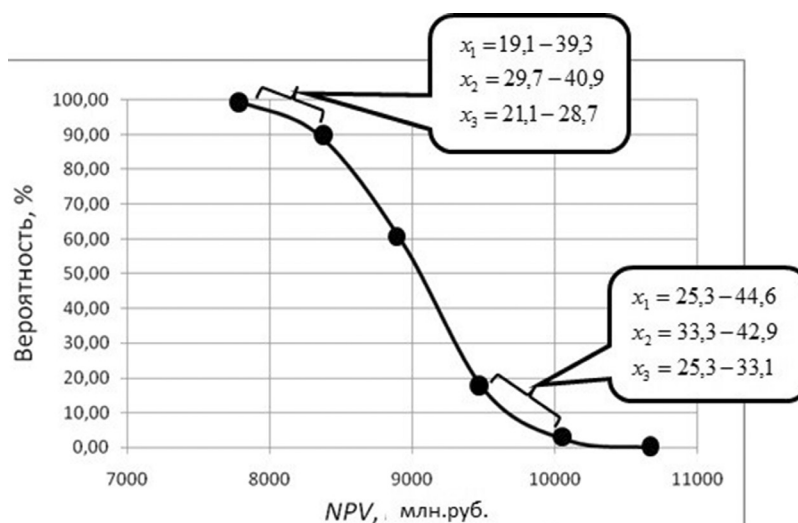


Рис. 2. Вероятностная кривая с отражением границ добычи полезных продуктов для двух выделенных интервалов

тодическое обеспечение позволяет найти оптимальный вариант эффективной эксплуатации техногенного месторождения в условиях неопределенности, что дает уверенность в отказе от практики накопления на полигонах твердых коммунальных отходов, а также инструментарий вовлечения накопленных отходов горнодобывающих предприятий в хозяйственный оборот. Таким образом, возможность рассмотрения твердых коммунальных отходов и отходов производства не как отходов, а как вторичных, техногенных ресурсов или техногенных месторождений полезных продуктов, добыча которых яв-

ляется менее затратной, чем добыча природных ископаемых. Следующий этап развития данного аппарата моделирования — создание региональной модели, увязывающей техногенные месторождения, источники отходов производства и ТКО, предприятия — потребители полезных продуктов. Модель будет являться завершающим звеном в системе оценочных, плановых и прогнозных моделей, позволяющих избавиться от полигонов отходов, отчуждающих значительные земельные ресурсы и являющиеся источником загрязнения окружающей среды на региональном уровне.

### Благодарность

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) — Отделение гуманитарных и общественных наук, проект № 15-02-00141а.

### Список источников

1. Donella H. Meadows, Dennis L. Meadows, Jorgen Randers, William W. Behrens III. The Limits to Growth. New York: Univers Books. — 1972. — 203 p.
2. Gassiy V., Gengut I. Innovative approaches to the formation of industrial clusters in the mining industry// Proceedings of International conference on Innovation and entrepreneurship development. — Ulaanbaatar, Mongolia, 2015. — Pp. 16-18.
3. Davaakhuu N., Alynkina E., Gengut I., Potravnyy I. Management of Environmental Costs in the Project // Baltic Journal of Real Estate Economics and Construction Management. — Riga Technical University, Latvia. — 2015. — № 3. — Pp. 140-150.
4. Макаров А. Б. Главные типы техногенно-минеральных месторождений Урала. Условия формирования, особенности состава и направления использования // Известия Уральского государственного горного университета. — 2007. — № 22. — С. 61-68.
5. Ahmed S.A., Ali S.M. People as partners: Facilitating people's participation in public-private partnerships for solid waste management. Habitat International. — 2006. — Vol. 30(4). — Pp. 781-796.
6. The Use of Economic Instruments in Environmental Policy: Opportunities and Challenges. UNEP, 2004. — 117 p.
7. Chung S.S. Projection of trends in solid waste generation: the case of domestic waste in Hong Kong special administrative region. Environ. Eng. Sci., — 2010. — Vol. 27(1). — Pp. 13-20.
8. Новиков Н. И., Салихов В. А. Некоторые аспекты экономической оценки техногенных месторождений как перспективного сырья для металлургической промышленности// Вестник Томского государственного университета. — 2016. — № 1 (33). — С. 38-53. — (Экономика).
9. Packey D. J. Multiproduct mine output and the case of mining waste utilization//Resour. Policy. — 2012. — Vol. 37. — No. 1. — P. 104-108.



10. Техногенные минерально-сырьевые ресурсы / Под ред. Б. К. Михайлова. — М. : Научный мир, 2012. — 236 с.
11. Jiang P, Liu X. Hiddenmarkov model for municipal waste generation forecasting under uncertainties // *European Journal of Operational Research*. — 2016. — V. 250. № 2. — P. 639–651.
12. Song J, He J. A multistep chaotic model for municipal solid waste generation prediction // *Environmental Engineering Science*. — 2014. — V. 31, № 8. — P. 461–468.
13. Ali Abdoli M., FalahNezhad M., SalehiSede R., Behboudian S. Longterm forecasting of solid waste generation by the artificial neural network// *Environmental Progress & Sustainable Energy*. — 2012. — Vol. 31. — No 4. — P. 628–636.
14. Arrow K.J., Dasgupta P., Maler K.-G. Evaluating Projects and Assessing Sustainable Development in Imperfect Economies // *Environmental and Resource Economics*. — 2003. — Vol. 26. — Pp. 647–685.
15. Амфилов Ю. П., Герп А. А. Экономическая геология. — М. : ГеоИнформМарк, 2006. — 330 с.
16. Новоселова И. Ю. Моделирование влияния внешних факторов на использование минерально-сырьевых ресурсов региона // *Проблемы региональной экологии*. — 2015. — № 3. — С. 66–70.
17. Novoselov A., Potravny I., Novoselova I., Gassiy V. Conflicts Management in Natural Resources Use and Environment Protection on the Regional Level // *Journal of Environmental Management and Tourism: ASERS Publishing*. — 2016. — Vol. 7. — No 3 (15) — Pp. 407–415. — DOI: 10.14505/jemt.v7.3(15).06.
18. Экономическое регулирование землепользования в зоне добычи железорудного сырья / Носов С. И., Бондарев Б. Е., Генгут И. Б., Черняховский О. И. // *Горный журнал*. — 2016. — № 2. — С. 54–55.
19. Переработка и утилизация золоотходов и снижение выбросов оксидов азота на угольных ТЭС — основа создания экологически чистой угольной тепловой электрической станции / Швердяев О. Н., Гвоздев В. М. и др. — Дзержинский М. О. : ДМУП «Информационный центр», 2010. — 70 с.
20. Яшалова Н. Н. Источники финансирования экологических проектов // *Финансы и кредит*. — 2012. — № 17. — С. 55–61.

### Информация об авторах

**Потравный Иван Михайлович** — доктор экономических наук, профессор кафедры управления проектами и программами, Российский экономический университет им. Г. В. Плеханова; Scopus Author ID:56512250800 (Российская Федерация, 117997, г. Москва, Стремянный пер., 36; e-mail: ecoaudit@bk.ru).

**Новоселов Андрей Леонидович** — доктор экономических наук, профессор кафедры математических методов в экономике, Российский экономический университет им. Г. В. Плеханова; Scopus Author ID: 57190430945 (Российская Федерация, 117997, г. Москва, Стремянный пер., 36; e-mail: alnov2004@yandex.ru).

**Новоселова Ирина Юрьевна** — доктор экономических наук, доцент, профессор кафедры математических методов в экономике, Российский экономический университет им. Г. В. Плеханова; Scopus Author ID: 57194756254 (Российская Федерация, 117997, г. Москва, Стремянный пер., 36; e-mail: iunov2010@yandex.ru).

For citation: Potravny, I. M. Novoselov, A. L. & Novoselova, I. Yu. (2017). Optimizing the Use of Resources of Technogenic Deposits Taking into Account Uncertainties. *Ekonomika regiona [Economy of Region]*, 13(4), 1280-1290

**I. M. Potravny, A. L. Novoselov, I. Yu. Novoselova**  
Plekhanov Russian University of Economics (Moscow, Russian Federation; e-mail: econaudit@bk.ru)

### Optimizing the Use of Resources of Technogenic Deposits Taking into Account Uncertainties

*The article discusses the problem of resource deterioration and the exhaustion of natural resources as well as the involvement in economic circulation of waste production, resources of technogenic deposits in order to maintain natural capital and support “green” economic growth. This necessitates the development of the mechanism for the environmental management optimization. This mechanism aims at using technogenic deposits in the economy to decrease of both the nature intensity of production and the cost of production. Furthermore, the environmental management optimization should reduce the negative impact of production on the environment. The authors propose to construct a model of economic relevance for the use of waste based on the theory of sustainable development and the theory of substitution of primary natural resources. Under substitutes, we consider useful products, resources from technogenic deposits, resulting from past economic activities. The article considers the problem of accumulation of municipal solid waste and industrial wastes in the regions of Russia in terms of forming and operating the ever-growing technogenic deposits. The authors propose a set of models for the optimum exploitation of technogenic deposits taking into account various factors of the external and internal environment as well as the time factor. The proposed models allow to substantiate and choose the best technologies for the processing of accumulated waste in terms of the reduction of pollution and “green” revenues from the exploitation of technogenic deposits. To account the probabilistic assessments of the geological structure of the technogenic deposits, we propose to use a combination of Monte-Carlo method and of developed optimization models. The authors describe the calculation results and the prospects for the development of a comprehensive model using regional technogenic deposits. The results of the research allow forming an optimal set of projects for waste processing and rehabilitation of disturbed territories at the regional level. The proposed economic and mathematical tools will be useful for updating the federal target program “Elimination of accumulated environmental damage” for 2015–2026.*

**Keywords:** green economy, depletion of natural resources, technogenic deposits, waste, accumulated environmental damage, performance indicators, field development, optimization model, probabilistic assessment, Monte-Carlo method, probability curve of NPV

### Acknowledgments

*The article has been supported by the Russian Foundation for Basic Research — Department of Humanities and Social Sciences, project No. 15–02–00141a.*

### References

1. Meadows, D. H., Meadows, D. L., Randers, J. & Behrens, W. W. (1972). *Behrens III. The Limits to Growth*. New York: Univers Books, 203.
2. Gassiy, V. & Gengut, I. (2015). Innovative approaches to the formation of industrial clusters in the mining industry. *Proceedings of International conference on Innovation and entrepreneurship development*. Ulaanbaatar, Mongolia, 16–18.
3. Davaakhuu, N., Alnykina, E., Gengut, I. & Potravny, I. (2015). Management of Environmental Costs in the Project. *Baltic Journal of Real Estate Economics and Construction Management*. Riga Technical University, Latvia, 3, 140–150.
4. Makarov, A. B. (2007). Glavnyye tipy tekhnogenno-mineralnykh mestorozhdeniy Urala. Usloviya formirovaniya, osobennosti sostava i napravleniya ispolzovaniya [Main types of technogenous-mineral deposits of the Urals: formation conditions, peculiarities of composition and directions of usage]. *Izvestiya Uralskogo gosudarstvennogo gornogo universiteta [News of the Ural State Mining University]*, 22, 61–68. (In Russ.)
5. Ahmed, S. A. & Ali, S. M. (2006). People as partners: Facilitating people's participation in public-private partnerships for solid waste management. *Habitat International*, 30(4), 781–796.
6. *The Use of Economic Instruments in Environmental Policy: Opportunities and Challenges*. (2004). UNEP, 117.
7. Chung, S. S. (2010). Projection of trends in solid waste generation: the case of domestic waste in Hong Kong special administrative region. *Environmental Engineering Science*, 27(1), 13–20.
8. Novikov, N. I. & Salikhov, V. A. (2016). Nekotoryye aspekty ekonomicheskoy otsenki tekhnogennykh mestorozhdeniy kak perspektivnogo syrya dlya metallurgicheskoy promyshlennosti [Some aspects of the economic evaluation of technogenic deposits as a promising raw material in the steel industry]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta [Tomsk State University Journal]*, 1(33), 38–53. (Series: Economics). (In Russ.)
9. Packey, D. J. (2012). Multiproduct mine output and the case of mining waste utilization. *Resources Policy*, 37(1), 104–108.
10. Mikhaylov, B. K. (Ed.). (2012). *Tekhnogennyye mineralno-syryevye resursy [Man-made mineral resources]*. Moscow: Nauchnyy mir Publ., 236. (In Russ.)
11. Jiang, P. & Liu, X. (2016). Hiddenmarkov model for municipal waste generation forecasting under uncertainties. *European Journal of Operational Research*, 250(2), 639–651.
12. Song, J. & He, J. (2014). A multistep chaotic model for municipal solid waste generation prediction. *Environmental Engineering Science*, 31(8), 461–468.
13. Ali Abdoli, M., Falah Nezhad, M., Salehi Sede, R. & Behboudian, S. (2012). Longterm forecasting of solid waste generation by the artificial neural network. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 31(4), 628–636.
14. Arrow, K. J., Dasguptam P. & Maler, K.-G. (2003). Evaluating Projects and Assessing Sustainable Development in Imperfect Economies. *Environmental and Resource Economics*, 26, 647–685.
15. Ampilov, Yu. P. & Gert, A. A. (2006). *Ekonomicheskaya geologiya [Economic geology]*. Moscow: GeoInformMark Publ., 330. (In Russ.)
16. Новоселова, И. Ю. (2015). Modelirovanie vliyaniya vneshnikh faktorov na ispolzovanie mineralno-syryevykh resursov regiona [Simulation of the influence of external factors on the use of mineral-raw resources of the region]. *Problemy regionalnoy ekologii [Regional Environmental Issues]*, 3, 66–70. (In Russ.)
17. Новоселов, А., Потравний, И., Новоселова, И. & Гассий, В. (2016). Conflicts Management in Natural Resources Use and Environment Protection on the Regional Level. *Journal of Environmental Management and Tourism: ASERS Publishing*, 7; 3(15), 407–415. DOI: 10.14505/jemt.v7.3(15).06.
18. Nosov, S. I., Bondarev, B. E., Gengut, I. B. & Chernyakhovskiy, O. I. (2016). Ekonomicheskoye regulirovanie zemlepolzovaniya v zone dobychi zhelezorudnogo syrya [Economic land-use regulation in the area of mining iron ore]. *Gornyy zhurnal [Mining Journal]*, 2, 54–55. (In Russ.)
19. Sheverdyayev, O. N., Gvozdev, V. M. et al. (2010). *Pererabotka i utilizatsiya zolootkhodov i snizhenie vybrosov oksidov azota na ugolnykh TES — osnova sozdaniya ekologicheskii chistoy ugolnoy teplovoy elektricheskoy stantsii [Processing and recycling of waste ash and reduction of nitrogen oxide emissions from coal-fired thermal power plants is the basis of the creation of environmentally friendly coal-fired power station. Monograph]*. Dzerzhinskiy M. O.: DMUP Informatsionnyy tsentr Publ., 70. (In Russ.)
20. Yashalova, N. N. (2012). Istochniki finansirovaniya ekologicheskikh proektov [Sources of funding for environmental projects]. *Finansy i kredit [Finance and credit]*, 17, 55–61. (In Russ.)

### Authors

**Ivan Mikhailovich Potravny** — Doctor of Economics, Professor, Department of Management of Projects and Programs, Plekhanov Russian University of Economics; ScopusAuthorID: 56512250800 (36, Stremyanny Lane, Moscow, 117997, Russian Federation; e-mail: ecoaudit@bk.ru).

**Andrey Leonidovich Novoselov** — Doctor of Economics, Professor, Department of Mathematical Methods in Economics, Plekhanov Russian University of Economics; ScopusAuthorID: 57190430945 (36, Stremyanny Lane, Moscow, 117997, Russian Federation; e-mail: alnov2004@yandex.ru).

**Irina Yuryevna Novoselova** — Doctor of Economics, Associate Professor, Professor, Department of Mathematical Methods in Economics, Plekhanov Russian University of Economics; ScopusAuthorID: 57194756254 (36, Stremyanny Lane, Moscow, 117997, Russian Federation; e-mail: iunov2010@yandex.ru).