

# Поддержка принятия решений при формировании промышленно-сырьевых узлов

А.В. Пономарев

**Аннотация.** Предлагается набор упрощенных математических моделей для первичного анализа размещения минерально-сырьевых ресурсов и формирования промышленно-сырьевых узлов. Модели организованы в иерархию – от базовой модели, фиксирующей набор допущений, сделанных в ходе моделирования, к частным моделям, уточняющим методики расчета геолого-экономических параметров, входящих в базовую модель. Указаны методы решения задачи оптимального формирования промышленно-сырьевых узлов на основе разработанных моделей.

**Ключевые слова:** территориальное планирование, геолого-экономическое районирование, задачи размещения, дискретная оптимизация.

## Введение

Геолого-экономическое районирование является методом территориального анализа, позволяющим оценивать структуру и размещение минерально-сырьевых ресурсов и перерабатывающих мощностей исследуемого региона. В ходе районирования происходит выделение кластеров взаимосвязанных сырьевых, промышленных объектов и объектов инфраструктуры, кластеры именуются и наносятся на геолого-экономическую карту.

Как правило, районирование представляет собой итеративный процесс, производимый на нескольких уровнях, на каждом из которых преследуются свои цели и принимается во внимание своя информация. Итерации при этом соответствуют степени детализации территориального планирования, а уровни – характеру исходных данных, принимаемых во внимание: минерально-сырьевая база и обрабатывающая промышленность, обеспеченность трудовыми ресурсами, энергией, развитие инфраструкту-

ры, существование и характер целевых федеральных программ по развитию регионов и т.п.

В статье речь идет о моделях для осуществления начальных итераций этого процесса на низких уровнях, а именно, о моделях начальной («грубой») оценки структуры размещения минерально-сырьевых ресурсов и выработки рекомендаций по их группировке для повышения эффективности разработки месторождений за счет совместного использования мощностей перерабатывающих предприятий.

Предлагается набор упрощенных математических моделей и методов группировки минерально-сырьевых и обрабатывающих объектов на основе этих моделей. Их основное назначение – произвести предварительную обработку фактической информации и представить эксперту вариант районирования с обоснованием причин именно такого объединения объектов. Эксперт, в свою очередь, должен уточнить вариант районирования на основе известных ему критериев, не вошедших в модель автоматической группировки.

В современных работах, посвященных геолого-экономическому районированию и построению геолого-экономических карт [1-3], рассматривается следующий ряд объектов геолого-экономического районирования:

- промышленно-сырьевые узлы (ПСУ);
- геолого-экономические районы (ГЭР);
- горно-промышленные комплексы (ГПК).

Эти объекты образуют своеобразные уровни описания и пространственного представления территорий с размещенными на них объектами минерально-сырьевой базы, горно-добывающей и перерабатывающей промышленностей, причем каждый новый уровень определяется через объекты нижележащих уровней.

Под *промышленно-сырьевым узлом* понимается пространственно обособленная группа сближенных минерально-сырьевых объектов (участков недр) – эксплуатируемых или неэксплуатируемых – обладающих одинаковым набором полезных ископаемых определенного геолого-промышленного типа и, как следствие этого, единой технологией получения первого товарного продукта.

В статье рассматривается задача формирования оптимального набора ПСУ.

Важность рационального формирования промышленно-сырьевых узлов обусловлена следующими положениями.

- ПСУ являются первым уровнем агрегации при иерархическом описании территории, дальнейшие виды районирования и агрегирования строятся уже поверх ПСУ, а значит, качество этих уровней во многом зависит от качества решения задачи по формированию ПСУ.

- При рассмотрении перспектив развития государственной политики в области недропользования предлагается осуществить переход от лицензирования отдельных объектов (или этапов добычи и переработки сырья) на лицензирование промышленно-сырьевых узлов и геолого-экономических районов, включающих месторождения разных полезных ископаемых. Считается, что это должно повысить рентабельность освоения и комплексность их вовлечения в хозяйственный оборот.

- В [1, 3] рассматривается задача более высокого уровня – формирование ГПК, однако показано, что приоритетной задачей для целей

определения места формирования ГПК является решение задачи по определению точек локализации ПСУ.

## 1. Базовая модель

В соответствии с определением, моносырьевой ПСУ – это группа сближенных минерально-сырьевых объектов и/или промышленно-сырьевых объектов, с единой технологией получения первого товарного продукта. Предполагается, что в составе моносырьевого ПСУ функционирует одно горно-обогатительное предприятие (ГОП), источником сырья для которого являются все минерально-сырьевые объекты, входящие в состав этого узла.

Комплексный ПСУ может рассматриваться как совокупность нескольких моносырьевых ПСУ, в значительной мере пересекающихся по своему пространственному положению, поэтому разрабатываемые методы и алгоритмы будут направлены на формирование исключительно моносырьевых узлов, а комплексные узлы могут быть получены из моносырьевых исходя из взаимного расположения последних.

Важным элементом модели является критерий, на основании которого можно судить о превосходстве того или иного набора ПСУ. Этот критерий является отправной точкой и для формальной постановки задачи, и, конечно, для разработки методов и алгоритмов ее решения.

На этом этапе возможны различные установки, так или иначе учитывающие цели и стратегию недропользования в регионе. Предложенные модели основываются на экономической интерпретации задачи формирования ПСУ, изложенной в работах [1, 3], где варианты формирования ПСУ оцениваются по рентабельности (или интегральному доходу), получаемой при реализации соответствующего варианта. Дополнительно может ставиться задача полного распределения всех объектов минерально-сырьевой базы по создаваемым ПСУ для вовлечения их в активное хозяйствование.

Интегральный доход от формирования набора ПСУ вычисляется по формуле:

$$F=I - C,$$

где  $I$  – суммарная потенциальная стоимость запасов и ресурсов по всем минерально-

сырьевым объектам, входящим в состав каждого узла, а  $C$  – суммарные затраты на получение первого товарного продукта.

Обозначим множество формируемых ПСУ через  $U$ . Каждый элемент  $u$  этого множества (формируемый узел) представляет собой пару:  $(q, M)$ . Здесь  $q$  – центр переработки (например, порядковый номер центра в исходном перечне), а  $M$  – множество месторождений, входящих в узел. Если  $u \in U$ , то обозначения  $q(u)$  и  $M(u)$  соответствуют первому и второму элементам описанной пары. Тогда формулу для расчета  $I$  можно записать следующим образом:

$$I(U) = \sum_{u \in U} \sum_{s \in M(u)} v(s),$$

где  $v(s)$  – потенциальная стоимость запасов месторождения.

Структура расходной части ( $C$ ) определяется множеством возможных состояний добываемого ресурса и затратами, связанными с переходом из одного состояния в другое. Рассматриваются следующие состояния добываемого ресурса (есть и другие состояния, но они не учитываются при формировании ПСУ):

1. руда в недрах;
2. извлеченная необогащенная руда;
3. обогащенная руда (первый товарный продукт).

Переход между состояниями (1) и (2) называется *добыча*, переход между состояниями (2) и (3) называется *обогащение* или *переработка*. Каждый переход ресурса из одного состояния в другое связан с проведением каких-то работ и, соответственно, с затратами на их проведение, причем затраты эти делятся на капитальные и эксплуатационные.

Капитальные затраты производятся однократно – это может быть строительство, закупка оборудования и т.п. Эксплуатационные – в течение всего времени существования процесса (учитываются, как правило, по периодам – месяцам, годам), к ним относятся оплата труда, расходные материалы, оплата электроэнергии и т.п.

Добыча и обогащение могут быть разнесены территориально, следовательно, извлеченную из недр руду необходимо доставить с места добычи на обогатительное предприятие, что порождает дополнительные транспортные затраты.

Обозначим капитальные затраты  $c$ , эксплуатационные  $o$ , а общие – определяемые как сумма капитальных и эксплуатационных –  $a$ . Будем также указывать источник этих затрат: добыча ( $e$ ), переработка ( $p$ ) и транспорт ( $t$ ). Например, эксплуатационные затраты на добычу будут записываться как  $o^{(e)}$ .

Суммарные затраты на формирование ПСУ можно записать следующим образом:

$$C(u) = c^{(p)}(u) + o^{(p)}(u) + \sum_{m \in M(u)} (a^{(e)}(m) + a^{(t)}(m, q(u))). \quad (1)$$

Здесь первая часть выражает затраты на обогащение, а вторая – затраты на добычу и транспортировку до ГОП по каждому минерально-сырьевому объекту (МСО), входящему в состав ПСУ.

Следует заметить, что  $c^{(p)}$  и  $o^{(p)}$  зависят от точки размещения горно-обогатительного предприятия (ГОП) и состава узла,  $a^{(e)}$  зависит от параметров месторождения (объема запасов, условий залегания),  $a^{(t)}$  – от взаимного расположения месторождения и горно-обогатительного предприятия и объема запасов месторождения.

С учетом критерия максимизации интегрального дохода предлагаемую базовую модель формирования ПСУ на заданной территории можно записать следующим образом. Найти такой набор ПСУ ( $U$ ), что:

$$\sum_{u \in U} (I(u) - C(u)) \rightarrow \max$$

$$I(u) = \sum_{s \in M(u)} v(s)$$

$$C(u) = c^{(p)}(u) + o^{(p)}(u) + \sum_{m \in M(u)} (a^{(e)}(m) + a^{(t)}(m, q(u))).$$

Эта модель названа базовой, поскольку она задает общую идею поиска, но она не может быть применена непосредственно без уточнения того, как именно вычисляются параметры, в нее входящие. Для вычисления некоторых параметров могут применяться существенно различные методы и стратегии.

## 2. Конкретизации базовой модели

Дальнейший анализ основывается на том, как именно оцениваются затраты каждого вида.

Задав методы вычисления каждого из параметров базовой модели, получим конкретную модель, которая может быть использована в ходе автоматизированного формирования промышленно-сырьевых узлов. Некоторая свобода в вопросе выбора методик расчета означает и то, что необходимый для решения задачи формирования ПСУ набор исходных данных может варьироваться в некоторых пределах за счет того, что различные методики определения  $c^{(e)}$  используют различные исходные данные.

**Учет затрат на добычу.** Модель допускает расчет  $c^{(e)}$  и  $o^{(e)}$  по любой методике, по которой для оценки этих затрат используются только «собственные» данные о месторождении и его окружении (условия рельефа и т.п.) и не используются данные о возможном составе узла, в который месторождение входит. В частности, в качестве  $c^{(e)}$  и  $o^{(e)}$  могут быть использованы результаты детального анализа и сметных работ, если такие проводились на месторождении, метод аналогий или метод корреляционных зависимостей, часто применяемый на начальных этапах оценки минерально-сырьевой базы.

Для эксплуатируемых месторождений следует положить  $c^{(e)}$  равным нулю, поскольку из того, что месторождение эксплуатируется, следует, что горнодобывающее предприятие на нем уже функционирует.

**Учет затрат на переработку (обогащение).** Особенностью этого вида затрат является их зависимость от состава узла. Это не дает большой свободы в выборе методики их расчета. В частности, подобные затраты не могут быть оценены экспертно, поскольку пришлось бы давать такую оценку для всех возможных вариантов состава узлов, количество которых очень велико. Поэтому для оценки данного вида затрат применяется метод корреляционных зависимостей, устанавливающий связь между объемными или стоимостными характеристиками запасов и затратами на их переработку.

Пусть базой для этих коэффициентов является потенциальная стоимость запасов (добываемых или перерабатываемых). Тогда, приняв за  $k_c$  и  $k_o$  коэффициенты, устанавливающие связь между  $v$  и  $c^{(p)}$  и  $o^{(p)}$  соответственно, выражение для суммарных затрат на создание узла (1) можно переписать следующим образом:

$$\begin{aligned} C(u) &= k_c \sum_{m \in M(u)} v(u) + k_o \sum_{m \in M(u)} v(u) + \\ &+ \sum_{m \in M(u)} (a^{(e)}(m) + a^{(t)}(m, q(u))) = \\ &= \sum_{m \in M(u)} (k_c v(m) + k_o v(m) + a^{(e)}(m) + a^{(t)}(m, q(u))). \end{aligned}$$

Следует заметить, что  $k_c$  и  $k_o$  могут существенно различаться для разных полезных ископаемых и даже разных геолого-промышленных типов месторождений одного ископаемого и, следовательно, не для любого набора месторождений подобное выражение будет корректным. В нашем же случае все требуемые условия соблюдаются, так как в ПСУ входят только месторождения с одинаковыми полезными ископаемыми и единым геолого-промышленным типом.

Существующее ГОП учитывается в модели различными способами – это одна из стратегий, расширяющих базовую модель. Предлагаются следующие реализации этой стратегии.

**Линейное уменьшение  $c^{(p)}$  узла на величину  $c^{(p)'}$ ,** для оценки которой тоже могут применяться различные методы. Например, это может быть стоимость основных средств ГОП, то есть затраты на создание узла с центром в существующем ГОП будут вычисляться по формуле:

$$\begin{aligned} C(u) &= -c^{(p)'} + \\ &+ \sum_{m \in M(u)} (k_c v(m) + k_o v(m) + a^{(e)}(m) + a^{(t)}(m, q(u))). \end{aligned}$$

Недостаток данного способа учета существующих ГОП состоит в том, что в оптимальном плане формирования узлов часть прибыли от такого плана может осуществляться за счет слагаемых  $c^{(p)'}$ . С точки зрения интерпретации модели это означает учет прибыли от частичной или полной реализации основных фондов ГОП, что не всегда приемлемо. Данный эффект в дальнейшем будем называть «псевдоприбыль».

**Уменьшение  $c^{(p)}$  узла без «псевдоприбыли».** В рамках этого способа тоже предполагается уменьшать  $c^{(p)}$  на некоторую величину  $c^{(p)'}$ , но при этом не допускать так называемой «псевдоприбыли», получаемой за счет превышения  $c^{(p)'}$  над расчетной величиной капитальных затрат. То есть:

$$C(u) = \max(0, -c^{(p)} + \sum_{m \in M(u)} k_c v(m)) + \sum_{m \in M(u)} (k_o v(m) + a^{(e)}(m) + a^{(t)}(m, q(u)));$$

$c^{(p)}$  узла может быть равно нулю, если расчетные капитальные затраты не превышают величину  $c^{(p)}$ , либо равны разнице расчетных затрат и  $c^{(p)}$ , если эта разница положительна.

**Учет затрат на транспортировку.** Другой важной стратегией, расширяющей базовую модель, является способ оценки  $a^{(t)}$  (затрат на транспортировку руды от места добычи к месту переработки). В основу оценки транспортных затрат положено выражение:

$$o^{(t)}(u, q) = p_{tr} \times v^{(ore)}(u) \times L(u, q),$$

где:  $p_{tr}$  – стоимость транспортировки тонны руды на 1 км (руб.),  $v^{(ore)}$  – количество руды в тоннах,  $L$  – расстояние транспортировки, км.

Главной проблемой здесь является наличие или отсутствие необходимых данных об  $L$ . Например, при наличии подробной карты дорожной сети затраты на транспортировку вычисляются в зависимости от расстояния между источником сырья и центром переработки в этой сети, при отсутствии таких данных можно использовать практические подходы, основанные на оцениваемых экспертами обобщенных характеристиках развития дорожной сети. Конечно, составление таких обобщенных характеристик является отдельной задачей, а степень

достоверности получаемых результатов требует серьезной оценки, но в ряде случаев этот способ оказывается единственным возможным. Допустимо и сочетание этих двух подходов, например, если для региона есть данные только о самых крупных дорогах. Таким образом, удастся проанализировать три стратегии учета затрат на транспортировку:

- расстояние, определенное с учетом сети дорог;
- расстояние на сфере с учетом эмпирических коэффициентов развития дорожной сети;
- комбинированная стратегия.

На Рис. 1 схематично отображена взаимосвязь фрагментов предлагаемой модели формирования ПСУ.

### 3. Методы решения задачи формирования ПСУ

В общем случае, задача поиска такого набора ПСУ, для которого значение целевой функции (соответствующей интегральному доходу) будет максимальным, представляет собой задачу булева программирования вида:

$$F^*(x, y) \rightarrow \max$$

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} \leq 1 \quad i = \overline{1, n} \quad (2)$$

$$x_{ij} \leq y_j \quad i = \overline{1, n} \quad j = \overline{1, m} \quad (3)$$

$$x_{ij}, y_j \in \{0, 1\} \quad i = \overline{1, n} \quad j = \overline{1, m}$$

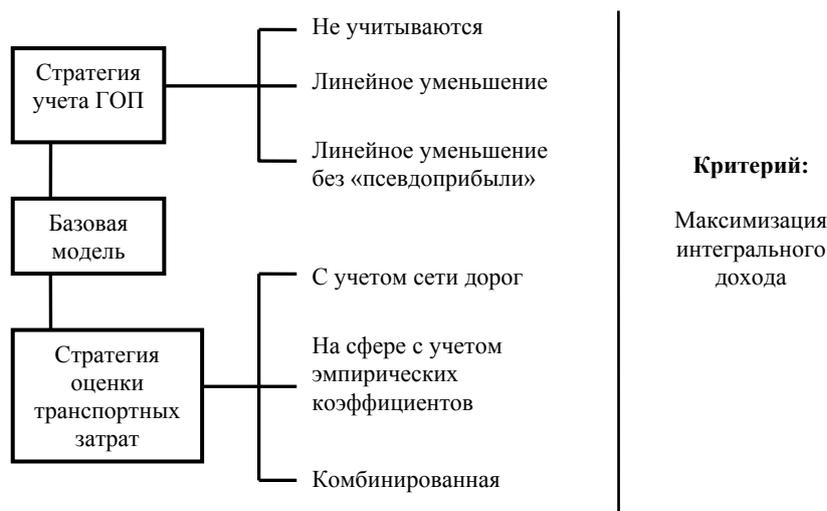


Рис. 1. Структура базовой модели формирования ПСУ

Здесь переменные вида  $x_{ij}$  – признак вхождения месторождения  $i$  в ПСУ с центром в  $j$ ,  $y_j$  – признак образования ПСУ с центром в  $j$ .  $F^*$  соответствует функции интегрального дохода  $F$ , переписанной с учетом переменных  $x$  и  $y$  и используемых вариантов конкретизации базовой модели.  $n$  – количество месторождений,  $m$  – количество потенциальных центров узлов.

Ограничения вида (2) выражают отношение принадлежности месторождений к множеству ПСУ, поэтому назовем их ограничениями покрытия. От вида знака в этом ограничении будет зависеть полнота распределения месторождений по узлам.

Ограничения вида (3) назовем ограничениями целостности, поскольку они выражают требование внутренней согласованности и непротиворечивости значений переменных  $x_{ij}$  и  $y_j$ .

Вместе с тем определенные конкретизации этой модели могут вносить в общую модель упрощения, давая возможность использовать более эффективные методы.

Так, при отсутствии действующих ГОП данная задача сводится к задаче группировки с простейшей системой показателей, рассмотренной детально в [4]. В зависимости от наличия или отсутствия требования об образовании узла в каждой возможной точке, данная задача решается либо как задача поиска потока минимальной стоимости в специальном образом построенной сети (при наличии такого требования), либо жадным алгоритмом (при его отсутствии).

При наличии действующих ГОП и использовании стратегии их учета, названной выше «линейное уменьшение  $c^{(p)}$  узла», задача сво-

дится к хорошо известной задаче дискретной оптимизации – простейшей задаче размещения.

Наконец, при использовании стратегии уменьшения  $c^{(p)}$  без «псевдоприбыли», задача остается задачей линейного булева программирования в общем виде, для точного решения которой могут использоваться промышленные специализированные решатели (IBM ILOG CPLEX, GUROBI Optimizer и т.д.), а для приближенного – различные эвристики и метаэвристики.

#### 4. Выбор конкретизации модели

Выбор той или иной стратегии осуществляется в зависимости от характеристик исследуемой территории и доступных данных. Например, для неосвоенных районов наилучшим выбором будет стратегия, не учитывающая существующие ГОП (и ее применение будет оправданно, поскольку там их нет), применение которой позволит получить более эффективные с вычислительной точки зрения математические постановки, не жертвуя важной информацией.

На Рис. 2 изображена матрица выбора метода решения задачи формирования промышленно-сырьевых узлов в зависимости от условий этой задачи; в частности, от степени освоения территории и полноты использования минерально-сырьевой базы.

#### 5. Программная реализация

Для решения задачи формирования ПСУ создана библиотека программных модулей. Каждый модуль этой библиотеки предназначен для

Использовать все месторождения		Да		Нет	
Использовать все точки возможного размещения ГОП		Да	Нет	Да	Нет
Степень промышленного развития территории	Есть действующие ГОП	<b>Точное решение:</b> CPLEX или другой решатель задач целочисленного линейного программирования  <b>Быстрое решение:</b> эвристики и метаэвристики (генетический алгоритм, имитация отжига, GRASP)			
	Нет действующих ГОП	Поиск потока минимальной стоимости	Жадный алгоритм	Множественный поиск потока минимальной стоимости	Жадный алгоритм

Рис. 2. Выбор метода формирования ПСУ

решения некоторого вида задачи группировки минерально-сырьевых объектов определенным алгоритмом. Некоторые модули реализуют авторские алгоритмы, другие содержат лишь постановку задачи на языке какого-либо универсального решателя и процедуры согласования форматов исходных и выходных данных.

Разработанные модули использованы в ГИС-ориентированной системе «Геолого-экономическая карта региона» (Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского), фрагмент архитектуры которой изображен на Рис. 3.

Брокер на этом рисунке представляет собой программный компонент, в задачи которого входит выбор модуля формирования ПСУ на основе запроса пользователя и содержимого базы первичных данных.

Информационный адаптер необходим для согласования формата исходных и выходных данных модуля оптимизации с базой данных системы.

Обведенный пунктиром прямоугольник IBM ILOG CPLEX соответствует внешнему пакету оптимизации, выполняющему решение задачи при определенных условиях.

## Заключение

Предложен набор упрощенных математических моделей для первичного анализа размещения минерально-сырьевых ресурсов и формирования промышленно-сырьевых узлов. Модели организованы в иерархию – от базовой модели, фиксирующей набор допущений, сделанных в ходе моделирования, к частным моделям, уточняющим методики расчета геолого-экономических параметров, входящих в базовую модель. Предложены методы решения за-

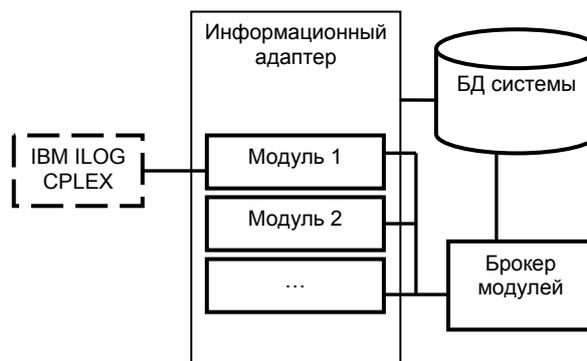


Рис. 3. Фрагмент архитектуры системы «Геолого-экономическая карта региона»

дачи формирования промышленно-сырьевых узлов. Методы реализованы в виде программных компонент. Автоматизация первичной обработки данных на основе предложенных моделей является одним из инструментов, способствующих повышению эффективности территориального планирования.

## Литература

1. Куклина Е.А. Методологический подход к локализации промышленно-сырьевых узлов как центров формирования горнопромышленных комплексов // Современные проблемы экономики и организации промышленных предприятий под. ред. Краюхина Г.А., СПб.: СПГИЭУ, 2007, 112-119
2. Хаустов И., Кимельман С., Беспалов Е. и др. Геолого-экономические карты Федеральных округов, Субъектов Федерации России и объектов геолого-экономического районирования // ArcReview, 2008, 4-5
3. Куклина Е.А. Природно-промышленные комплексы как основа устойчивого развития природно-ресурсных регионов России // Образование, Экономика, Общество, 2007, 4, 44-51
4. Мустафин Н.Г., Пономарев А.В., Савосин С.В. Метод оптимальной группировки векторных объектов относительно центров // Труды СПИИРАН. 2012. Вып. 20. 216-230.

**Пономарев Андрей Васильевич.** Научный сотрудник Санкт-Петербургского Института информатики и автоматизации Российской академии наук. Окончил Тюменский государственный нефтегазовый университет в 2003 году. Кандидат технических наук с 2012 г. Автор 10 научных публикаций. Область научных интересов: дискретная оптимизация, технологии баз данных. E-mail: [ponomarev.a.v@gmail.com](mailto:ponomarev.a.v@gmail.com)