

СТАТИСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ И ТЕОРИЯ ВЕРОЯТНОСТЕЙ

МНОГОМЕРНЫЙ СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ В ПРОГНОЗИРОВАНИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ НЕПРЕРЫВНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Розин Б. Б., Ягольницер М. А.

(Новосибирск)

Анализируются некоторые методические подходы к построению и применению имитационных статистических моделей показателей эффективности функционирования предприятий с последовательной физико-химической переработкой сырья.

МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К ИМИТАЦИОННОМУ ЭКОНОМИКО-СТАТИСТИЧЕСКОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ НЕПРЕРЫВНЫХ ПРОИЗВОДСТВ

В отраслях с непрерывной технологией в отличие от производства дискретного типа основные процессы носят аппаратурный физико-химический характер с высокой материало-, энерго- и фондоемкостью. От показателей функционирования небольшого числа дорогостоящих и сложных технологических агрегатов зависит экономическая эффективность работы предприятия в целом.

Важной особенностью рассматриваемого типа производств является их тесная связь с сырьевой базой.

Выделяются три уровня объектов моделирования (снизу вверх): 1) типовые процессы, протекающие в основных технологических агрегатах (доменных, сталеплавильных, цементных печах, химических реакторах, ваннах и т. п.); 2) технологические переделы или производственные цехи; 3) совокупность переделов (цехов), т. е. предприятие. Эти уровни различаются как набором переменных (технические показатели преобладают на более низких ступенях, экономические — на более высоких), так и длительностью производственных циклов и как следствие — методами моделирования.

Улучшение показателей работы агрегатов и технологических переделов не является самоцелью, так как выигрыш на одном участке может привести к потерям на остальных. Необходима ориентация на конечные результаты работы предприятия. Последнее предопределяет согласование работы различных технологических переделов и агрегатов как по объемам производства, так и по качеству продукции. Поэтому наиболее эффективен дифференцированный подход к моделированию производственного процесса предприятия, когда он во всей его сложности отражается системой взаимосвязанных частных моделей.

Выбор способа построения модели экономических показателей предприятия во многом зависит от характера его сырьевой базы. Если у него

такая база есть, то предприятие может управлять его качеством, применяя экономические и административные меры воздействия на добывающее производство. Здесь целесообразны постановка и решение задач управления всем технологическим циклом, нахождение оптимальных режимов работы технологических переделов, включая оптимизацию показателей сырья.

Методика конструирования модели зависит также от того, предназначена она для принятия «стратегических» или «оперативных» решений.

Использование традиционных статистических подходов для анализа и прогнозирования экономики непрерывных производств часто оказывается хотя и эффективным, но явно недостаточным. Для того чтобы традиционные статистические модели адекватно описывали изучаемый процесс, необходимо соблюдение ряда содержательных и формальных требований к исходной информации. Однако для реальных экономических объектов эти требования, как правило, не удовлетворяются.

Повышению адекватности и формированию новых функциональных свойств экономико-статистических моделей производственных процессов способствует создание гибридных форм моделей с заданными свойствами [1]. Один из путей решения задачи — расширение собственно статистического инструментария, переход от применения ограниченного круга моделей корреляционно-регрессионного типа к более широкому классу моделей анализа данных. Появляется возможность конструировать и использовать в исследованиях новые типы экономико-статистических моделей: классификационные, дискретно-непрерывные (кусочно-линейные), с переменной структурой и др. [2].

Однако этот математико-статистический инструментарий не решает всех проблем моделирования непрерывных производственных процессов. Здесь требуются и модели других классов (и в первую очередь оптимизационные), позволяющие в некоторой степени преодолеть известное противоречие между природой традиционной статистической модели и содержанием задачи принятия решений [3].

Остановимся более подробно на проблемах построения одного из типов гибридных моделей — с переменной структурой.

Динамичность процессов развития промышленных объектов делает актуальной проблему учета структурных изменений при их статистическом описании. В содержательном смысле под структурой производственного процесса можно понимать оператор преобразования ресурсов в готовую продукцию, а в статистическом — характер связи между факторами производства и выходными технико-экономическими показателями в модели.

Одной из наиболее разработанных форм моделей с переменной структурой служат линейные регрессионные модели с переключением, которые по существу являются кусочно-линейными.

Рассмотрим общую форму и некоторые понятия, характеризующие такие модели. Пусть объект описывается на языке значений «входных» признаков $X = \{X_1, \dots, X_n\}$. Тогда каждое конкретное описание $x = (x_1, \dots, x_n)$ есть точка в n -мерном признаковом пространстве R_x . «Выходной», результирующий показатель обозначим Y , а его конкретное значение — y . Моделью показателя y служит функционал $y^* = g(x, \theta)$, который дает возможность на основе x получать прогнозируемое значение y^* . Здесь θ — вектор параметров.

Модель с переменной структурой имеет вид

$$y^* = g(x, \theta(x)),$$

где вектор θ сам является функцией от X .

Такая модель должна строиться на основе анализа выборочной информации V , представляющей собой совокупность m реализаций (y, x)

$$V = \{(y_i, x_i), i = 1, \dots, m\}.$$

Конкретная форма регрессионной модели с переключениями, а также способ оценивания неизвестных параметров (структурный вектор, точки переключения режимов) определяются свойствами ее элементов и спецификой выборки.

Для пространственно-временных выборок, в которых, как правило, имеется множество объектов, группирующихся по типам, отличающимся друг от друга некоторым набором признаков, и изменение зависимости выходного показателя от факторов производства не носит непрерывного характера, необходима разработка специальных методов построения многомерного переключателя режимов. Эта задача сводится к разбиению выборочной совокупности на такие классы, в которых зависимость моделируемого показателя от факторов производства стабильна и линейна.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КАЧЕСТВА РУД И ТЕХНОЛОГИИ ОБОГАЩЕНИЯ НА ЭКОНОМИКУ ГОРНОМЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

В качестве примера, иллюстрирующего предлагаемые методические подходы применения многомерного статистического анализа в прогнозировании и управлении производственными процессами, рассмотрим проблему управления качеством сырья на Норильском горнометаллургическом комбинате.

Результаты работы, а также технология в цветной и черной металлургии, цементной промышленности и других отраслях в значительной мере зависят от качества используемого минерального сырья. Поэтому в рамках общей проблемы оптимизации режимов функционирования горнометаллургических предприятий важна оценка влияния качества руд на эффективность хозяйственной деятельности и выбор оптимальной стратегии управления процессами добычи и обогащения сырья с позиций конечных результатов производства. Это и обуславливает выделение задачи управления качеством руд как предмета самостоятельного исследования, присущего всем производствам, связанным с переработкой минерального сырья.

Экономическая эффективность является совокупным показателем, отражающим качество продукта, степень извлечения полезного компонента, производительность и затраты на переработку сырья. Эффективность каждой последующей операции зависит от параметров поступающего сырья, которые формируются на предыдущей стадии. Например, извлечение в металлургическом переделе и себестоимость его — от качества концентрата обогащения; извлечение на обогатительной фабрике, качество концентрата, себестоимость переработки руды и себестоимость получаемого на фабрике продукта — от качества исходной руды, в частности вредных для обогащения примесей, степени усреднения, очередности поступления на фабрику различных сортов руды и т. д., а качество руды, в свою очередь, — от параметров горного передела.

Увеличение значений факторов, улучшающих технико-экономические характеристики последующей стадии, как правило, снижает эти показатели для данной. Так, чем качественнее концентрат обогащения, тем выше экономические показатели металлургического передела, но при этом снижается эффективность обогатительного. Если рассматривать горнометаллургический комплекс как единую экономическую систему с

общим критерием эффективности, можно воздействовать на параметры работы каждой стадии для достижения максимального эффекта.

Опыт проведения исследований на ряде предприятий цветной металлургии свидетельствует, что основным технологическим параметром экономической эффективности всего производственного процесса является показатель сквозного извлечения полезного компонента из руды. Это обусловлено чрезвычайно низким содержанием металлов в перерабатываемых рудах.

Так, для получения 1 т ртути требуется переработать более 1000 т руды.

В свою очередь, это определяет и структуру затрат на таких предприятиях: подавляющая их часть — добыча и обогащение этих руд.

Поскольку $\frac{3}{4}$ расходов непосредственно связаны с добычей и обогащением руды, то повышение сквозного извлечения означает почти пропорциональное снижение затрат на единицу готовой продукции. При производстве никеля при себестоимости 1 т руды порядка 4000 руб. расходы на металлургический передел составляют от 8 до 40 руб., все остальные идут на добычу и обогащение. Следовательно, увеличение сквозного извлечения на 1% означает, например, в ртутном производстве снижение себестоимости 1 т готовой продукции примерно на 300—500 руб., в производстве никеля — около 40—80 руб., меди — 15—30 руб. и т. д.

Анализ схем обогащения медно-никелевых руд позволяет конкретизировать общую постановку задачи управления качеством руд в виде трех подзадач.

1. Выделение и прогнозирование природных и технологических типов руд. Технологическая оценка руд базируется в основном на результатах лабораторных и полупромышленных испытаний отдельных проб, что не дает нужной информации о качестве руд, увеличивает объем и стоимость опробования и не избавляет обогатительные фабрики от недостатков и срывов в работе.

Такая оценка недостоверна для труднообогатимых руд, а также и для определения необходимости и очередности разведки рудопроявлений на ранних стадиях геологоразведочных работ, когда отбор представительных проб невозможен. Чтобы выделить природные типы руд с устойчивыми показателями качества (а следовательно, и технологическими характеристиками), можно использовать методы многомерной классификации по химическому составу. Применяя их для изучения и прогнозирования типологии руд, поступающих на обогащение, целесообразно организовать их раздельную переработку, ориентированную на учет особенностей каждого типа. Это позволит повысить качественные показатели обогатительного передела за счет более полного извлечения полезных компонентов.

2. Прогнозирование технико-экономических показателей процессов обогащения природных типов руд. Для определения оптимальной глубины обогащения на отдельных стадиях переработки и решения проблемы управления процессами рудоподготовки и флотации необходимо исследование взаимосвязей характеристик качества руд с технико-экономическими показателями обогащения.

Вследствие того, что руда, поступающая на обогатительную фабрику, не является однородной, зависимость показателей обогащения от ее качества может быть достаточно сложной. Один из путей построения моделей в таких структурно-неоднородных совокупностях — аппроксимация реальной зависимости некоторой кусочно-линейной поверхностью.

3. Выбор оптимальных режимов обогащения с позиции конечных результатов горнометаллургического предприятия. При переработке руды

данного качества можно получать существенно разные технологические показатели обогащения. Выбор наилучшего режима обогащения должен, очевидно, осуществляться по определенному критерию оптимальности. Разумно предположить, что на практике встречаются различные ситуации, требующие выбора соответствующих критериев оптимальности. Так, при складывающемся дефиците мощностей по выпуску меди следует выбрать режим, дающий наиболее богатый медный концентрат при ограничениях на качество никелевого концентрата. При осложнении ситуации с производством никеля можно идти на получение наиболее богатого никелевого концентрата, накладывая ограничения на качество медного и пирротинового концентратов.

В общем случае возможно, что критерием оптимальности станет максимизация прибыли предприятия.

Для выбора оптимального режима удобны модели ситуационного анализа, особенно имитационные статистические. При их конструировании используются результаты решения задач 1 и 2, различного рода соотношения баланса металлов и концентратов, а также основные затратные и ценностные характеристики горнометаллургического передела.

Рассмотрим методику решения указанных задач на конкретном примере. Объектом исследования в задаче 1 выступали данные химических анализов 200 проб основных типов руд месторождения. Обучающая выборка по типам руд имела следующее распределение: 70 проб составляли кубанитовые руды (35%); 52 пробы — пирротиновые (26%); 46 проб — халькопиритовые (23%); 32 пробы — кубанит-пирротиновые (16%).

Каждая проба характеризовалась 8 признаками, отражающими содержание в руде химических элементов (%): x_1 — никеля; x_2 — меди; x_3 — кобальта; x_4 — суммы платиноидов; x_5 — платины; x_6 — палладия; x_7 — золота; x_8 — серы — и 5 признаками, характеризующими отношение содержания одного элемента к содержанию другого: x_9 — меди к никелю; x_{10} — кобальта к палладию; x_{11} — платины к палладию; x_{12} — меди к сере; x_{13} — меди и никеля к сере.

Выделение типов руд по результатам химического анализа осуществлено методом многомерной классификации «Рельеф» [4]. Его суть сводится к непараметрической оценке плотности многомерного распределения выборочных значений и нахождению локальных экстремумов этой функции. Использование непараметрического подхода позволяет применить алгоритм в условиях нарушения требований классического аппарата математической статистики (нормальность, независимость, достаточность объема выборки и др.).

Полученная типология руд является довольно устойчивой (табл. 1). Помимо этого следует отметить и четкое выделение пирротиновых руд. Халькопиритовые руды делятся на два стабильных подтипа, различающихся между собой содержаниями суммы платиноидов, палладия и золота. Кубанитовые и кубанит-пирротиновые руды близки по химическому составу и объединяются в один тип.

В классах наблюдается существенное уменьшение вариации не только этих признаков, но и других параметров, не участвовавших в классификации.

Для проверки устойчивости типизации руд и получения объективных выводов относительно их петрохимической близости (различия) был использован также метод главных компонент по другому набору легко определяемых признаков.

Классификация руд проводилась с учетом количественного соотношения основных рудных минералов: пирротина, пентландита, халькопири-

Результаты многомерной классификации руд медно-никелевого месторождения *

Распределение объектов по классам и типам руд для вариантов классификации **				
Класс	I		II	
	число объектов в классе	тип руд	число объектов в классе	тип руд
1	19	Халькопиритовые (100%)	24	Халькопиритовые (100%)
2	13	Халькопиритовые (84%), кубанитовые (16%)	15	Халькопиритовые (86%), кубанитовые (14%)
3	29	Кубанитовые (76%), халькопиритовые (20%), кубанит-пирротиновые (4%)	108	Кубанитовые (60%), пирротиновые (9%) пирритовые (6%)
4	81	Кубанитовые (53%), кубанит-пирротиновые (33%), пирротиновые (14%)	44	Пирротиновые (95%), кубанит-пирротиновые (5%)
5	41	Пирротиновые (98%), кубанит-пирротиновые (2%)		

* Здесь не приведены единичные и малочисленные классы.

** Варианты I и II получены изменением внутренних параметров алгоритма классификации «Рельеф».

та, кубанита и магнетита. При этом четко выделились пирротиновые, кубанитовые и халькопиритовые руды. Кубанитсодержащие пирротиновые руды не отличаются резко от пирротиновых и отделяются от них достаточно условно. Результаты использования метода главных компонент подтвердили данные, полученные методами многомерной классификации.

Для решения задачи 2 предварительно была проведена классификация руд по типам (задача 1) и зависимости строились по каждому типу отдельно (кусочно-линейная модель).

Первичной информацией для модели являлось содержание меди и никеля в питании и продуктах обогащения, ситовый анализ питания, расход основных реагентов. Данные по выходам продуктов обогащения и извлечения металлов получены расчетным путем с помощью уравнений материального баланса.

Анализ исходной информации по типам руд показал несущественность отличия распределения изучаемых параметров от нормального закона, что позволяет в качестве отправной гипотезы использовать предположение о существовании линейной многофакторной зависимости между технико-экономическими показателями обогащения, извлечением в концентрат, качеством руды и технологическими характеристиками процесса.

В табл. 2 приведены варианты рекомендуемых для дальнейшей работы зависимостей для кубанитовых руд. Как видно из этой таблицы, высока адекватность и точность изучаемых зависимостей (коэффициент Фишера (F) более чем в 10 раз превосходит табличное значение). Сопоставление характеристик точности моделей, построенных для всей совокупности, и кусочно-линейной модели свидетельствует о существенном повышении качества последней. Во всех классах существенно уменьшается средняя относительная ошибка прогноза (от 2 до 5 раз), а также снижается доля сравнительно больших ошибок ($>10\%$). Кроме того, в классах наблюдается изменение структуры влияния факторов на моделируемые показатели.

Таким образом, оцененные соотношения достаточно надежны для использования при прогнозировании в рассматриваемой области.

Модели подобного типа применяются в системах управления качеством руд в тех случаях, когда организуется селективная добыча и обо-

Модели показателей процесса обогащения руд

Моделируемый показатель, %	Коэффициент детерминации, R^2	Коэффициент Фишера, F	Коэффициенты регрессии (в числителе) и их стандартные ошибки (в знаменателе), %						Свободный член	
			содержание меди			содержание никеля				
			в никелевом концентрате	в руде	в руде	в руде	в пирротиновом концентрате	в медном концентрате		
%										
Извлечение:										
1) меди в никелевый концентрат	0,76	323,80	$\frac{3,30}{0,123}$	$\frac{-1,32}{0,103}$	$\frac{40,33}{0,943}$	$\frac{10,33}{0,943}$				-17,46
2) меди в пирротиновый концентрат	0,45	86,50	$\frac{0,52}{0,077}$	$\frac{-0,46}{0,063}$	$\frac{2,86}{0,246}$	$\frac{2,86}{0,246}$				0,72
3) никеля в медный концентрат	0,91	780,33	$\frac{-1,15}{0,099}$	$\frac{2,74}{0,083}$	$\frac{-11,28}{0,757}$	$\frac{-11,28}{0,757}$			$\frac{14,50}{0,434}$	8,29
4) меди в медный концентрат	0,81	440,9	$\frac{-4,08}{0,125}$	$\frac{1,75}{0,104}$	$\frac{-8,16}{0,957}$	$\frac{-8,16}{0,957}$				106,83
5) никеля в никелевый концентрат	0,93	1448,9			$\frac{41,51}{1,149}$	$\frac{41,51}{1,149}$			$\frac{-24,51}{0,488}$	$\frac{15,39}{0,664}$
6) никеля в пирротиновый концентрат	0,89	841,9			$\frac{-2,661}{0,144}$	$\frac{-2,661}{0,144}$			$\frac{23,92}{0,555}$	87,55

Баланс металлов и концентратов на обогатительной фабрике

Продукт	Выход, %	Никель, %			Медь, %		
		содержание	выход	извлечение	содержание	выход	извлечение
Руда	Q	α_{Ni}	q_P^{Ni}	—	α_{Cu}	q_P^{Cu}	—
Медный концентрат	Q_{Cu}	β_{Cu}^{Ni}	q_{Cu}^{Ni}	ε_{Cu}^{Ni}	β_{Cu}^{Cu}	q_{Cu}^{Cu}	ε_{Cu}^{Cu}
Никелевый концентрат	Q_{Ni}	β_{Ni}^{Ni}	q_{Ni}^{Ni}	ε_{Ni}^{Ni}	β_{Ni}^{Cu}	q_{Ni}^{Cu}	ε_{Ni}^{Cu}
Пирротиновый концентрат	Q_{Po}	β_{Po}^{Ni}	q_{Po}^{Ni}	ε_{Po}^{Ni}	β_{Po}^{Cu}	q_{Po}^{Cu}	ε_{Po}^{Cu}

гащение природных типов руд, т. е. предполагается близкая к детерминированной классификация руд, поступающих на обогащение (задача 1).

Однако, несмотря на то что технологические сорта руд часто бывают выделены и геометризованы, в работе действующих обогатительных фабрик нередко существует несоответствие между составом и свойствами планируемой и поступающей на фабрику шихты. Это может быть вызвано сложными горно-техническими условиями отработки месторождения, одновременным вовлечением в переработку большого количества рудных тел при отсутствии усреднительных складов и другими причинами. В этом случае возникает задача прогнозирования и управления процессом обогащения по экспрессным анализам шихты, участвующей в нем. В отличие от рассмотренной ситуации, когда технологические свойства руды заранее оценены и идет переработка одного типа руд, здесь имеет место только некоторая временная устойчивость перерабатываемой смеси руд. При их относительной выдержанности во времени (более часа) можно оперативно определить оптимальную глубину обогащения на отдельных процессах на основе адаптации моделей управления.

Для решения задачи 3 применяются имитационные статистические модели ситуационного анализа производственного процесса. Для их построения берутся результаты задач 1 и 2, данные балансов металлов и концентратов в обогащении и расчетные (нормативные) технико-экономические показатели металлургического передела Норильского горно-металлургического комбината.

Имитационная часть модели технико-экономических показателей обогащения может быть представлена в табл. 3.

Модель содержит 26 переменных. Входными параметрами являются: объем руды — Q , содержание в ней никеля и меди α_{Ni} , α_{Cu} . Кроме этого, к входным относится также содержание никеля в медном концентрате β_{Cu}^{Ni} . Оставшиеся 22 параметра — производные, они вычисляются на основе установленных статистических зависимостей, балансовых и теоретических соотношений.

Остановимся более подробно на процедуре вычисления элементов балансовой матрицы.

Исходя из очевидных балансовых соотношений по основным извлекаемым металлам запишем

$$\varepsilon_{Cu}^{Ni} + \varepsilon_{Ni}^{Ni} + \varepsilon_{Po}^{Ni} = 100, \quad (1)$$

$$\varepsilon_{Cu}^{Cu} + \varepsilon_{Ni}^{Cu} + \varepsilon_{Po}^{Cu} = 100.$$

Воспользуемся регрессионными зависимостями извлечений металлов в соответствующие концентраты от параметров качества исходной руды и качества концентратов, приведенными в табл. 2.

Пусть извлечения меди в концентраты характеризуются следующими соотношениями: в никелевый концентрат — $a_0^1 + a_1^1 \rho_{\text{Ni}}^{\text{Cu}} + a_2^1 \alpha_{\text{Cu}} + a_3^1 \alpha_{\text{Ni}}$; в пирротиновый — $a_0^2 + a_1^2 \rho_{\text{Ni}}^{\text{Cu}} + a_2^2 \alpha_{\text{Cu}} + a_3^2 \rho_{\text{P}_0}^{\text{Ni}}$; в медный — $a_0^3 + a_1^3 \rho_{\text{Ni}}^{\text{Cu}} + a_2^3 \alpha_{\text{Cu}} + a_3^3 \alpha_{\text{Ni}}$; а извлечение никеля в медный концентрат — $b_0^1 + b_1^1 \rho_{\text{Ni}}^{\text{Cu}} + b_2^1 \alpha_{\text{Cu}} + b_3^1 \alpha_{\text{Ni}} + b_4^1 \rho_{\text{Cu}}^{\text{Ni}}$; в никелевый — $b_0^2 + b_3^2 \alpha_{\text{Ni}} + b_4^2 \rho_{\text{Cu}}^{\text{Ni}} + b_5^2 \rho_{\text{P}_0}^{\text{Ni}}$; в пирротиновый — $b_0^3 + b_2^3 \alpha_{\text{Cu}} + b_3^3 \alpha_{\text{Ni}} + b_5^3 \rho_{\text{P}_0}^{\text{Ni}}$.

Подставив эти соотношения в (1) и обозначив $A_1 = a_1^1 + a_2^1 + a_3^1$, $A_2 = a_2^2 + a_2^3 + a_3^3$, $A_3 = a_3^1 + a_3^3$, $A_4 = a_4^1$, $A_0 = 100 - [(a_0^1 + a_0^2 + a_0^3) + A_2 \alpha_{\text{Cu}} + A_3 \alpha_{\text{Ni}}]$, $B_1 = b_1^1$, $B_2 = b_2^1 + b_2^3$, $B_3 = b_3^1 + b_3^3 + b_3^3$, $B_4 = b_4^1 + b_4^1$, $B_5 = b_5^2 + b_5^3$, $B_0 = 100 - [(b_0^1 + b_0^2 + b_0^3) + B_2 \alpha_{\text{Cu}} + B_3 \alpha_{\text{Ni}} + B_4 \rho_{\text{Cu}}^{\text{Ni}}]$,

получим систему линейных уравнений с двумя неизвестными $\beta_{\text{Ni}}^{\text{Cu}}$, $\beta_{\text{P}_0}^{\text{Ni}}$

$$A_1 \beta_{\text{Ni}}^{\text{Cu}} + A_4 \beta_{\text{P}_0}^{\text{Ni}} = A_0 \quad (2)$$

$$B_1 \beta_{\text{Ni}}^{\text{Cu}} + B_5 \beta_{\text{P}_0}^{\text{Ni}} = B_0.$$

Коэффициенты уравнений системы определяются регрессионными коэффициентами, а также заданием входных параметров балансовой таблицы (параметры перерабатываемой руды α_{Ni} , α_{Cu} и качество концентрата $\beta_{\text{Cu}}^{\text{Ni}}$).

Система (2) линейно независима и имеет единственное решение: $\beta_{\text{Ni}}^{\text{Cu}}$, $\beta_{\text{P}_0}^{\text{Ni}}$.

Оставшиеся элементы балансовой матрицы определяются из соотношений

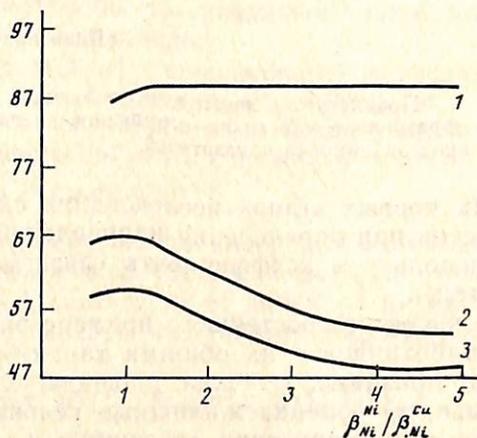
$$\begin{aligned} q_P^{\text{Cu}} &= \alpha_{\text{Cu}} Q / 100, & q_{\text{Cu}}^{\text{Cu}} &= \varepsilon_{\text{Cu}}^{\text{Cu}} q_P^{\text{Cu}} / 100, \\ q_{\text{Ni}}^{\text{Cu}} &= \varepsilon_{\text{Ni}}^{\text{Cu}} q_P^{\text{Cu}} / 100, & q_{\text{P}_0}^{\text{Cu}} &= q_P^{\text{Cu}} - q_{\text{Cu}}^{\text{Cu}} - q_{\text{Ni}}^{\text{Cu}}, \\ q_P^{\text{Ni}} &= \alpha_{\text{Ni}} Q / 100, & Q_{\text{Ni}} &= q_{\text{Ni}}^{\text{Cu}} 100 / \beta_{\text{Ni}}^{\text{Cu}}, \\ q_{\text{Cu}}^{\text{Ni}} &= \varepsilon_{\text{Cu}}^{\text{Ni}} q_P^{\text{Ni}} / 100, & Q_{\text{Cu}} &= q_{\text{Cu}}^{\text{Ni}} 100 / \rho_{\text{Cu}}^{\text{Ni}}, \\ q_{\text{P}_0}^{\text{Ni}} &= \beta_{\text{P}_0}^{\text{Ni}} Q_{\text{P}_0} / 100, & \beta_{\text{Cu}}^{\text{Cu}} &= q_{\text{Cu}}^{\text{Cu}} 100 / Q_{\text{Cu}}, \\ \varepsilon_{\text{P}_0}^{\text{Ni}} &= q_{\text{P}_0}^{\text{Ni}} 100 / q_P^{\text{Ni}}, & \beta_{\text{P}_0}^{\text{Cu}} &= q_{\text{P}_0}^{\text{Cu}} 100 / Q_{\text{P}_0}, \\ \varepsilon_{\text{P}_0}^{\text{Cu}} &= 100 - \varepsilon_{\text{Ni}}^{\text{Cu}} - \varepsilon_{\text{Cu}}^{\text{Cu}}. \end{aligned}$$

Таким образом, задавая параметры исходного сырья и качество одного из концентратов (например, медного), можно получить взаимосогласованные варианты выпуска продукции обогатительного цикла. Изменяя входные параметры модели в пределах, допустимых технологической схемой, определим зависимости извлечения в обогатительном, металлургическом производствах, а также общее извлечение металла от качества концентрата.

Разработанный класс моделей ситуационного анализа и управления используется в двух режимах как инструмент: 1) выработки стратегических решений по наиболее рациональному извлечению полезных компонентов руды, 2) оперативного управления. Оба направления обеспечивают высокий экономический эффект.

Анализ результатов расчетов по имитационным статистическим моделям показал, что экономика производства на Норильском горнометаллургическом комбинате существенно зависит от принимаемых управленческих решений. На рисунке представлены зависимости извлечения никеля в концентрат, извлечения никеля в металлургическом цикле и сквозного извлечения от качества никелевого концентрата, которые получены на основе имитационных расчетов по моделям. При среднем извлечении, например, никеля в никелевый концентрат на уровне 64% колебания извлечения при принятии противоположных управленческих решений составляют ± 5 абс.%. За счет огрубления медного концентрата можно

Зависимость извлечения никеля от соотношения $\beta_{Ni}^{Ni}/\beta_N^{Cu}$ в концентрате: 1 — металлургический передел; 2 — обогащительный передел, 3 — сквозное извлечение. По оси ординат — извлечение никеля, %



повысить сквозное извлечение никеля на комбинате. Так как существует более чем трехкратная разница в ценах на никель и медь, это позволяет увеличить прибыль на каждой тонне готовой продукции порядка 2000 руб., что составит около 4–5 млн. руб. в год (хозрасчетный результат предприятия). На уровне отрасли или народного хозяйства этот результат будет еще выше вследствие действия дополнительных факторов народнохозяйственного значения. Прежде всего, оптовая цена на металл, по которой подсчитан хозрасчетный результат, не отражает уровень цен на мировом рынке. Далее, в отрасли функционируют предприятия с существенно разным уровнем затрат на единицу получаемого металла, в том числе и предприятия, где они почти в 2 раза выше, чем на Норильском комбинате. С учетом масштабов комбината отраслевой экономический результат также оказывается достаточно чувствителен к применяемым на нем управленческим решениям. Дополнительное производство металла можно использовать для снижения объемов горных работ на других предприятиях, где содержание металлов в руде в 5–8 раз ниже, чем в Норильске.

ЛИТЕРАТУРА

1. Розин Б. Б., Ягольницер М. А. Конструирование экономико-статистических моделей с заданными свойствами. Новосибирск: Наука, 1981.
2. Розин Б. Б., Котюков В. И., Ягольницер М. А. Экономико-статистические модели с переменной структурой. Новосибирск: Наука, 1984.
3. Кулешов В. В., Лукацкая М. Л., Ягольницер М. А. Проблемы статистического моделирования и оптимизация отраслевых планов. Новосибирск: Наука, 1977.
4. Распознавание образов при построении экономико-статистических моделей. Новосибирск: Наука, 1975.

Поступила в редакцию
29 V 1990