

1 руб.

**КОНТРОЛЬ ОЦЕНОК
ПРОГНОЗНЫХ РЕСУРСОВ
РУДОНОСНЫХ ОБЪЕКТОВ**

Методические рекомендации

ЛЕНИНГРАД - 1990

МИНИСТЕРСТВО ГЕОЛОГИИ СССР
ВСЕСОЮЗНЫЙ ОРДЕНА ЛЕНИНА НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ им. А. П. КАРПИНСКОГО (ВСЕГЕИ)

КОНТРОЛЬ ОЦЕНОК
ПРОГНОЗНЫХ РЕСУРСОВ
РУДОНОСНЫХ ОБЪЕКТОВ

Методические рекомендации

ЛЕНИНГРАД · 1990

Контроль оценок прогнозных ресурсов рудоносных объектов. Методические рекомендации. Л., 1990. 104 с. (Мин-во геологии СССР, Всесоюз. ордена Ленина науч.-исслед. геол. ин-т им. А. П. Карпинского).

Рассмотрены принципы и научные основы контроля оценок прогнозных ресурсов, определения надежности методов оценки, их погрешности и достоверности на тех или иных стадиях геологоразведочных работ. Приведены примеры выявления погрешностей оценок и их контроля различными способами.

Предназначены для геологов, занимающихся поисками, изучением и прогнозированием месторождений полезных ископаемых.

Ил. 12, табл. 23, список лит. 62 назв.

Составители

И. А. НЕЖЕНСКИЙ, Г. А. БУЛКИН, В. А. БАБОШИН

Научный редактор

Ю. В. БОГДАНОВ

Рекомендовано к публикации Управлением перспективного развития геологоразведочных работ Мингео СССР

Введение

Методическое обеспечение оценок прогнозных ресурсов, которыми должна завершаться любая стадия геологоразведочного процесса, и систематический характер таких оценок требуют постоянного совершенствования всех аспектов количественного прогноза. В настоящее время опубликованы различные пособия и рекомендации [24, 28, 29], методическое руководство по оценке прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых, книги и статьи по вопросам количественного прогнозирования [5, 8, 10, 32, 33, 37 и др.]. Однако до сих пор остается нерешенной проблема контроля правильности оценок прогнозных ресурсов, определения их погрешности и достоверности, повышения их надежности, а это не позволяет объективно сравнивать различные подходы и методы оценки и достаточно четко представлять возможные и допустимые ошибки в оценках прогнозных ресурсов при применении различных методов на любых стадиях геологоразведочных работ. Контроль оценок прогнозных ресурсов тесно смыкается с проблемой комплексирования методов оценок. Возникает также необходимость в разработке специальных методов контроля оценок прогнозных ресурсов.

В представленных методических рекомендациях освещены наименее разработанные вопросы количественного прогнозирования: контроль оценок прогнозных ресурсов, а также определение их достоверности и надежности. При существующем банке оценок прогнозных ресурсов и их учете на государственном уровне решение их в настоящее время приобретает основополагающее значение. Описание методов оценки и вопросов их комплексирования дано в сжатом виде главным образом применительно к перечисленным выше задачам.

Авторы используют некоторые необщепринятые понятия и термины в области количественного прогнозирования, разъяснение которых отсутствует в существующих инструкциях [22 и др.], тогда как они необходимы для создания полной системы единиц учета ресурсов минерального сырья [8]. Кратко определим вводимые понятия и термины:

— *общие ресурсы* — все ресурсы данного вида сырья в пределах рудоносного объекта (рудоносной территории). Структура ресурсов при этом зависит от степени изученности объекта

(стадии геологоразведочных работ). Так, например, общие ресурсы рудного района, выделенного при геологосъемочных и сопутствующих работах масштаба 1:200 000, включают в себя прогнозные ресурсы категории P_3 , а также ресурсы категорий P_2 , P_1 (если они известны) и разведанные запасы (в случае, если они есть). Общие ресурсы рудного поля (после проведения работ масштаба 1:50 000) могут включать в себя прогнозные ресурсы категорий P_2 , P_1 и разведанные запасы. Общие ресурсы выявляются, в частности, методом аналогии. Прогнозные ресурсы искомой категории определяются затем путем вычитания из общих ресурсов известных ресурсов более высоких категорий, разведанных и отработанных запасов. Можно различать территории и объекты, изученные только в масштабе, соответствующем масштабу оценки ресурсов, и изученные (хотя бы частично) в более детальном масштабе. Структура ресурсов в первом случае более проста — все ресурсы относят к одной категории, соответствующей стадии работ (только к P_3 — для рудных районов, только к P_2 — для рудных полей и т. д.);

— *металлогенические (минерагенические) ресурсы* (металлогенический или минерагенический потенциал) — ресурсы, определяемые по результатам работ масштаба 1:500 000 и мельче (в пределах металлогенических зон и провинций). Иногда к металлогеническому потенциалу относят «забалансовые» ресурсы на любой стадии геологоразведочных работ, что вносит элемент неопределенности в это понятие. Такого типа ресурсы мы предлагаем называть *технологическим резервом*;

— *минерально-сырьевая база* — ближайший резерв добывающей промышленности, включающий в себя разведанные и предварительно оцененные запасы;

— *минерально-сырьевые ресурсы* — отдаленный резерв добывающей промышленности, включающий в себя прогнозные ресурсы и предварительно оцененные запасы. Последние, таким образом, входят и в минерально-сырьевые ресурсы, и в минерально-сырьевую базу;

— *текущий минерально-сырьевой потенциал* — все известные прогнозные ресурсы (категории P_3 , P_2 , P_1) и запасы (разведанные и предварительно оцененные);

— *общий минерально-сырьевой потенциал* — включает в себя помимо текущего потенциала также металлогенические ресурсы (металлогенический потенциал) и отработанные запасы (накопленную добычу).

Авторы выражают благодарность рецензенту В. А. Коровкину за ценные замечания к работе.

НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ КОНТРОЛЯ ОЦЕНОК ПРОГНОЗНЫХ РЕСУРСОВ

Научные основы контроля оценок прогнозных ресурсов в значительной мере базируются на научных основах самих оценок

прогнозных ресурсов и являются их следствием. При этом способам контроля оценок свойственны свои специфика и технология. Вопросы контроля оценок прогнозных ресурсов не могут рассматриваться в отрыве от всех этапов металлогенического анализа — выявления закономерностей размещения месторождений полезных ископаемых, рудоконтролирующих факторов, установления критериев выделения перспективных объектов, металлогенического районирования. Рудоконтролирующие факторы определяют качественный состав оруденения и его количество.

Металлогения — наука синтетическая, у которой «на выходе» — заключение по прогнозной оценке перспективных объектов, а «на входе» — общие законы природы и все доступные сведения о геологическом строении и полезных ископаемых территорий. Для целей металлогенического анализа эти сведения должны быть определенным образом организованы. Общие энергетические, статистические закономерности могут применяться по отношению к той или иной генеральной совокупности и выборкам из нее независимо от геологического строения территорий, которое объясняет конкретное пространственное размещение оруденения в пределах анализируемого блока. Подобные взгляды высказывали еще Ф. Блондель [52], М. Алле [50] и др.

Накопленный опыт металлогенических исследований (главным образом в СССР и, в частности, во ВСЕГЕИ) показывает, что при мелко- и среднemasштабных исследованиях наилучшая форма организации геологической информации для целей прогнозирования та, которую позволяет получить формационный анализ: выделение геологических и рудных формаций и их увязка с тектоническим режимом развития территорий. Такая увязка не всегда однозначна даже в рамках одной концепции развития структур, тем более она не одинакова с позиций, например, геосинклинальной концепции и концепции тектоники плит, что может привести и к разным заключениям о качественном и количественном типе рудоносности, исходя из одного и того же наблюдаемого геологического строения территорий. Тем не менее именно то или иное сочетание (ряды) определенных геологических формаций дает основание отнести геологическую позицию (геологический блок) к тому или иному типу (модели), что позволяет прогнозировать возможное развитие определенных рудных формаций и масштаб их проявления. При этом относительно внемасштабный подход к типизации рудоносных площадей на уровне металлогенических зон и рудных районов обеспечивает структурно-вещественное, а еще лучше — вещественное описание геологических обстановок (типа структурно-формационных зон) [41].

Перечислим основные физико-химические (энергетические), статистические, металлогенические (формационные) и другие закономерности, лежащие в основе качественного и количествен-

ного прогнозирования минерального сырья и применимые для контроля оценок прогнозных ресурсов (более подробно они рассматривались нами ранее в [42 и др.]).

1. Запасы полезных компонентов в промышленных концентрациях в рудоносных объектах любого иерархического уровня — рудных телах, месторождениях, рудных полях, районах, металлогенических зонах, провинциях, земной коре в целом, их среднее и минимальное промышленное содержание зависят от распространенности этих компонентов в земной коре (кларков). С позиций контроля оценок и определения их надежности можно отметить, что при прочих равных условиях достоверность оценок прогнозных ресурсов и запасов более высококларковых элементов выше, чем низкокларковых (редких). В принципе для любого элемента можно указать диапазон возможных колебаний оценок прогнозных ресурсов в объектах различных иерархических уровней.

2. В геологической истории развития земной коры в первом приближении наибольшие по запасам месторождения образуются тем позже, чем ниже кларк соответствующего элемента, т. е. чем большим должен быть кларк концентрации для достижения промышленных скоплений полезного компонента. Широко распространенные сидерофильные элементы (Cr, Fe, Ti, V, Ni, Co), для формирования промышленных скоплений которых достаточны кларки концентраций, равные 10—100 (в материнских породах), образуют наибольшие месторождения преимущественно в докембрии; халькофильные элементы (Cu, Zn, Pb) — кларки концентраций 100—1000 — в палеозое; халько-литофильные (Sn, W, Be, Mo, Sb, Hg, Ag, Bi) — кларки концентраций 1000—10 000 и более — в мезо-кайнозое. В этом же направлении происходит и увеличение самого спектра элементов, образующих промышленные концентрации. Общая закономерность осложняется сходной закономерностью второго порядка — аналогичной сменой максимумов промышленных концентраций в пределах тектоно-седименто-магматических циклов, а также наличием общемировых эпох повышенной рудоносности того или иного элемента, провинциальными особенностями развития и неравномерным «первичным» геохимическим фоном, т. е. изначальным различием в региональных кларках. Рассмотренная закономерность позволяет конкретизировать диапазон возможных оценок прогнозных ресурсов в зависимости от возраста оруденения и его положения в седименто-магматическом цикле.

3. С распространенностью элементов связаны не только их промышленные, но и общие геохимические запасы, а также соотношение тех и других. При крупномасштабных и детальных исследованиях появляется возможность более достоверно оценить геохимические запасы (продуктивность) ореолов рассеяния элементов в пределах потенциальных рудных полей и их перспективных участков (месторождений). Геохимические запасы

позволяют еще более уточнить диапазон возможных колебаний промышленных запасов.

4. Структура ресурсов минерального сырья обусловлена общезакономерностями. Распределение ресурсов по объектам различного размера, рудам с различным содержанием полезного компонента закономерно. Например, по максимальному по запасам рудоносному объекту из всей совокупности известных объектов может быть определена нижняя граница ресурсов оцениваемой территории. Используемая при этом обратная зависимость между размером объектов и их числом позволяет решать еще ряд задач по контролю и определению надежности оценок ресурсов, в частности, определять число и размеры неизвестных пока месторождений. При этом большая точность оценок прогнозных ресурсов будет у той совокупности, в которой известны наибольшие из возможных объекты, поскольку на них приходится большая доля всех возможных ресурсов [32], обеспечивающих большую полноту вовлекаемого в анализ рангового ряда.

5. Те или иные «наборы», парагенезы, ряды геологических формаций определяют соответствующие им ряды рудных формаций. Каждая рудная формация имеет диапазон возможной рудоносности (в смысле размеров ожидаемых месторождений, среднего содержания элементов в рудах), который может быть еще более сужен, если учесть место данной формации в ряду формаций, т. е. геологическую обстановку, ее типовую модель. Именно в этот диапазон должны попасть оценки прогнозных ресурсов, исходя, например, из удельной рудоносности (метод аналогии), что будет одним из элементов контроля достоверности оценок.

6. В общей истории геологического развития от архея до четвертичного периода, а также в ходе отдельных седименто-магматических циклов, как правило, можно наметить типовой ряд смены формационных и морфологических типов месторождений, а следовательно, и их размеров: метаморфизованные согласные стратиформные — скарновые — жильные и штокверковые — эпитептермальные (вулканические области) и телетермальные (амагматические области) — стратиформные поздних орогенных стадий развития — коры выветривания и продукты их преотложения — согласные вулканогенно-осадочные стратиформные следующего «цикла» и т. д.

Подобная закономерность сочетается с другими особенностями проявления оруденения во времени, в частности, с приуроченностью крупных запасов того или иного вида минерального сырья к определенным временным уровням, обусловленным причинами, указанными, например, в п. 2, и другими обстоятельствами. Их сложное сочетание приводит иногда к наличию нескольких временных максимумов развития крупных месторождений. Так, для марганца это <65 (в СССР — 30—15—олиго-

цен) млн. лет, для железистых кварцитов — архей и ранний протерозой и т. д.

Рассмотренные и иные временные закономерности распределения промышленной рудоносности являются составной частью контроля оценок прогнозных ресурсов, рассчитанных на основе усредненных параметров.

7. В качестве контролирующего элемента при оценке прогнозных ресурсов геологическими методами (по аналогии) может выступать степень дифференциации (контрастности) геологических образований на различных уровнях — формационном, породном, минеральном, элементном.

Характерным примером проявления различной контрастности геологических образований на формационном уровне служат особенности размещения колчеданного медно-цинкового оруденения. Значительно более перспективны дифференцированные формации натриевых базальтов, натриевых базальтов и риолитов, базальтов-андезитов-риолитов, чем слабодифференцированные формации натриевых базальтов, натриевых базальтов и риолитов.

На элементном уровне рассматриваемая закономерность может играть контролирующую роль при оценке прогнозных ресурсов по геохимическим ресурсам, сосредоточенным в ореолах рассеяния (см. п. 3). Большая доля промышленных ресурсов от общих геохимических и, следовательно, большие значения «переводных коэффициентов» свойственны геохимическим аномалиям с большей дисперсией, т. е. дифференциацией концентраций.

КРАТКИЙ ОБЗОР МЕТОДОВ ОЦЕНОК ПРОГНОЗНЫХ РЕСУРСОВ

Оценка прогнозных ресурсов по категориям P_1 — P_3 , ставшая обязательной, необходима для решения ряда важных народнохозяйственных задач. К их числу относятся составление пятилетних планов, освоение природных ресурсов, обеспечение сырьем действующих и строящихся предприятий, планирование и оптимальное управление геологической отраслью, охрана окружающей среды, размещение новых предприятий и даже прогноз конъюнктуры мирового рынка. Поэтому к качеству оценок прогнозных ресурсов уже сейчас должны предъявляться высокие требования, между тем применяющиеся методы часто этим требованиям не отвечают. Они малообъективны, ненадежны и допускают произвольное изменение результатов в соответствии с конъюнктурными соображениями.

В настоящее время большинство оценок прогнозных ресурсов категорий P_1 — P_3 получено методами аналогии с более детально изученными объектами или методами оценок, в том или ином объеме включающими результаты аналогии, вплоть до

экспертных методов. Поскольку их надежность неадекватна принимаемым на их основе ответственным решениям, необходимо повышение качества прогнозных оценок. Последнее связано с внедрением методов прямых расчетов. В настоящее время известно несколько таких методов; каждый из них отличается не только процедурой расчета, но и используемой или получаемой информацией, т. е. входом, преобразованием и выходом. Характеристика методов по виду результатов, масштабу прогнозирования, категориям прогнозных ресурсов, возможности прогноза крупных объектов, надежности и примерным затратам рабочего времени представлена в табл. 1.

О рабочем времени следует сказать особо. Его затраты учитывали сбор и переработку информации относительно прогнозного объекта соответствующей категории ресурсов, причем приведенные цифры характеризуют в основном порядок значений, поскольку и объекты прогнозирования, и время сбора информации для разных регионов, условий и категорий ресурсов колеблются в широком диапазоне. Из таблицы видно, что традиционные методы по эффективности уступают методам количественной оценки, хотя распределение последних по возможным задачам весьма неравномерно, что особенно хорошо видно для оценок по категории P_3 . В то же время состояние прогнозирования таково, что необходимая достоверность оценки ресурсов является результатом нескольких независимых методов. Это и требует создания системы обязательного контроля оценок несколькими методами.

Ниже приводится краткая характеристика методов (иногда групп методов) и их наиболее значимых модификаций.

Простая (качественная) аналогия обеспечивает относительно логичный и несложный способ оценки прогнозных ресурсов по аналогии с изученными регионами. Последние типизируются, классифицируются, определяются критерии прогнозирования, на основе которых выделяются новые прогнозные площади и выводятся, чаще всего полуколичественно, оценки прогнозных ресурсов. Классификация регионов может производиться на основе перечня геологических свойств либо модели геологического развития.

Простая аналогия привычна, весьма трудоемка и субъективна; требует обычной геологической подготовки; существует в виде вариантов, достаточно часто применяемых в узкой предметной или региональной области; исходные данные известны не всегда, сбор их трудоемок, требуется информация о большом числе признаков; влияние экономических факторов скрытое и не поддается учету; ЭВМ не нужны; допущений, лежащих в основе метода, много, иногда слабоправдоподобных, часто неопределенных; известно критическое отношение к методу в целом и особенно к его конкретному приложению; воспроизводимость оценок весьма низкая; надежность низкая, ее мера субъ-

Сравнение методов количественной оценки прогнозных ресурсов

Методы и их модификации	Прогнозные ресурсы			Число месторождений		Вероятность открытия новых ресурсов	Суммарный эквивалент ресурсов (стоимость и т. п.)	Разнообразие видов полезных ископаемых	Влияние рудоуплотняющих факторов
	общие	при данном бортовом содержании	в объектах определенной величины	общее	определенной величины				
Простой аналогии	+	+	+	+	+	-	-	+	+
Экспертных оценок	+	+	+	+	+	-	-	+	(к)
Объемный (площадный)	+	-	-	-	-	-	-	-	-
Математической аналогии									
классификация	+	+	+	+	+	+	+	+	+
распознавание образцов	+	+	+	+	+	+	+	+	+
корреляция, регрессия	+	+	+	+	+	-	-	+	(к)
дисперсионный анализ	+	-	+	-	-	-	+	-	+
факторный анализ	+	-	+	-	-	-	+	-	+
Качественных геологических моделей	+	+	+	-	-	-	-	-	(к)
Модели сложности и разнообразия	+	-	-	-	-	+	+	-	-
Моделей распределения содержания									
эмпирической	+	+	-	-	-	-	-	-	-
статистической	+	+	-	-	-	-	-	-	-
физической	+	+	-	-	-	-	-	-	-
положительная зависимость от среднего содержания	+	+	-	-	-	-	-	-	-
закон Ласки	+	+	-	-	-	-	-	-	-
Модели геохимического цикла									
зависимость от кларка и химического потенциала металлов	+	+	-	-	-	-	-	-	-
зависимость от коэффициента полезного действия миграции	+	-	-	-	+	+	-	-	-
Модели рангового ряда									
эмпирической зависимости от запасов крупнейшего объекта	+	-	-	-	-	-	-	-	-
теоретической зависимости от запасов крупнейшего объекта	+	-	-	-	-	-	-	-	-

по виду результатов оценки и условиям применения

Таблица 1

Масштаб прогнозирования						Категория определяемых прогнозных ресурсов			Прогноз крупных объектов		Определение надежности количественно	Примерные затраты времени, чел./дн.
планетарный	континентальный	провинциальный	региональный	локальный	детальный	P ₃	P ₂	P ₁	по методу	в сочетании		
-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	1000—2000
-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	10—15
-	-	-	+	+	+	+	+	+	-	-	+	400—450
-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	1000—1500
-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	1000—1500
-	-	-	-	+	+	+	+	+	-	-	+	75—500
-	-	-	?	+	+	+	+	+	?	-	+	100—700
-	-	-	?	+	+	+	+	+	-	-	+	100—700
-	-	-	+	+	+	-	+	+	+	+	-	1000—1750
-	+	+	+	?	-	+	+	+	-	+	-	250—400
-	-	-	-	?	?	-	?	+	-	-	+	30—60
-	-	-	-	?	?	-	-	+	-	-	+	30—60
-	-	-	+	+	-	-	+	+	+	+	-	30—60
-	-	-	+	+	+	-	+	+	+	+	-	30
+	+	-	?	?	+	-	?	+	-	-	+	50
+	+	+	+	?	-	+	+	-	-	+	-	15—35
+	+	+	+	?	+	-	-	-	-	-	-	35
-	-	+	+	+	-	-	+	?	-	+	-	10
-	-	+	+	+	-	-	+	+	-	+	+	10

Методы и их модификации	Прогнозные ресурсы			Число месторождений		Вероятность открытия новых ресурсов	Суммарный эквивалент ресурсов (стоимость и т. п.)	Разнообразие выходов полезных ископаемых	Влияние рудоконтролирующих факторов
	общие	при данном бортовом содержании	в объектах определенной величины	общие	определенной величины				
по запасам известных месторождений	+	-	+	+	+	-	-	-	-
по карте полезных ископаемых	+	-	+	+	+	-	-	-	-
по массе металла в геохимических аномалиях	+	-	+	+	+	-	-	+	-
по запасам месторождений, приведенных к эквиваленту	+	-	+	+	+	-	-	+	-
с учетом модели «геологоразведочного фильтра»	+	-	+	+	+	-	-	-	-
Геолого-экономическая экстраполяция	+	+	-	-	-	-	-	-	-

Примечание. Знаки «+» и «-» означают соответственно применимость и неприменимость данного метода к решению тех или иных задач при тех или иных условиях; (к) — качественно.

Масштаб прогнозирования						Категория определяемых прогнозных ресурсов			Прогноз крупных объектов		Определение надежности количественно	Примерные затраты времени, чел./дн.
планетарный	континентальный	пролювиальный	региональный	локальный	детальный	P ₁	P ₂	P ₃	по методу	в соотствии		
+	+	+	+	+	-	-	+	+	+	+	+	15
-	+	+	+	+	-	-	+	-	+	+	+	20
-	-	-	+	+	-	+	+	-	-	+	+	25
-	-	+	+	+	?	-	+	-	+	+	+	25
-	-	+	+	+	-	-	+	-	+	+	+	35
?	?	?	+	+	+	-	+	+	-	-	+	25—45

менность данного метода к решению тех или иных задач при тех или иных условиях;

активна и количественно не рассчитывается. Метод малоадекватен ответственным решениям. Применяется для всех масштабов, начиная с провинциального, и для всех категорий (P₁, P₂, P₃) суммарных прогнозных ресурсов, ресурсов в месторождениях определенных размеров, а также для других прогнозных характеристик (см. табл. 1). Его основные трудности: неопределенность при распространении свойств частной выборки на общую совокупность (нередко различия не случайные, а систематические); сложность выбора заведомо безрудных объектов; участвующих в сравнении; многочисленность геологических признаков, а также их взаимодействия, ускользающие от внимания геолога; степень обоснованности предположений, возможность аналогии (например, действительно ли сходство геологической среды определяет сходство рудоконтролирующих факторов; сходные факторы одинаково влияют на локализацию руд; сходные геологические процессы образуют сходные руды; ресурсы неоткрытых руд пропорциональны степени благоприятности рудообразования в соответствующей зоне и т. п.).

Метод экспертных оценок обеспечивает оценку прогнозных ресурсов по аналогии с изученными регионами за счет интуиции специалистов. Сравнение регионов осуществляется в неявном

виде. Результатом прогнозирования являются количественные (без обоснования) оценки прогнозных ресурсов или некоторых других характеристик, а также (очень приблизительно) прогнозные площади. Имеются математические способы обработки набора экспертных оценок для получения наиболее правдоподобного результата.

В качестве примера можно привести метод экспертных оценок, разработанный в компании Ренд-Корпорейшн (США). Для него характерны анонимность, регулируемая обратная связь и групповой ответ при процедурах сбора и обработки данных [6].

Метод привычен, прост, весьма субъективен; часто применяется в широкой предметной и региональной области; исходные данные практически не нужны; влияние экономических факторов скрытое и не поддается учету; использование ЭВМ желательно в части модификаций; основания метода малообъективны; возражения серьезны; воспроизводимость результатов плохая; надежность весьма малая, субъективная, неопределенная, в отдельных вариантах рассчитываемая, но и тогда скорее качественно, чем количественно определяемая. Метод часто неадекватен серьезным решениям. Применяется для оценки прогнозных ресурсов и числа неизвестных месторождений при всех масштабах, начиная с провинциального, и всех вариантах иссле-

вания взаимной независимости суждений экспертов, а также их независимости от конъюнктурных или расхожих представлений и, как следствие, низкая надежность метода. Основная особенность — присутствие сейчас в большинстве оценок ресурсов, обычно в неявном виде.

Основой **объемного (площадного) метода** (количественная аналогия) являются данные о запасах полезного ископаемого, с одной стороны, и разнообразная геологическая информация о тех районах, где они залегают, с другой. По аналогии данные о запасах переносятся на новые регионы с близкими геологическими свойствами. Метод имеет несколько модификаций, из которых наиболее типична следующая: прогнозные ресурсы района

$$Q = DSR,$$

где D — плотность оруденения исходной площади, S — площадь или объем нового, благоприятного для оруденения района, R — фактор благоприятности (аналогичности). Неопределенность, всегда имеющаяся при использовании метода, уменьшается с увеличением числа сравниваемых факторов и меры их сходства R . Последняя находится интуитивно или с помощью субъективно заданных «шкал» сравнения геологических свойств.

Например, прогнозная оценка неоткрытых ресурсов урана Управлением исследований и развития энергетических ресурсов США (USERDA) проводилась в районе Монумент-Хилл-Бокс-Крик [57] по формуле

$$Q = DLFR,$$

где D — коэффициент минерализации на погонную милю фронта растворения вмещающих осадочных пород при отложении урана, L — длина этого фронта, F — процент неразведывавшейся площади, R — фактор благоприятности (аналогичности). Нахождение соответствующих показателей позволило оценить прогнозные ресурсы урана: $1950 \cdot 47 \cdot 0,4 \cdot 0,5 = 18\,330$ т.

Метод привычен; прост; средней трудоемкости; субъективен; часто применяется в широкой тематической, предметной и региональной области; исходные данные в большинстве случаев известны, их сбор средней трудоемкости, малое число параметров; влияние экономических факторов скрытое, плохо поддается учету; ЭВМ не используется; основы метода дискуссионны; возражения против него характерны для аналогии; воспроизводимость оценок низкая; надежность также низкая, устанавливается лишь качественно, весьма субъективно. Метод неадекватен ответственным решениям. Применяется для оценки прогнозных ресурсов при всех масштабах (начиная с регионального и ниже) и всех категориях (P_1 , P_2 и P_3). Основные трудности —

неконтролируемость допущений, неопределенность и др., сказывающиеся на выборе коэффициента аналогии, виде соотношений в формулах, увязывающих исходные параметры, а также на границах исходной и прогнозируемой территорий. Основное преимущество — простота и универсальность.

Методы математической аналогии, в частности, методы классификации, позволяют на формально-математическом уровне сравнивать прогнозируемые площади с хорошо изученными. В тех и других по квадратам определенных размеров (по «элементарным» ячейкам) осуществляется сбор информации о широком наборе признаков. Их сопоставление для эталонных рудных и для заведомо безрудных ячеек позволяет найти признаки, наиболее информативные относительно присутствия оруденения или определения его количественных характеристик (ресурсов, числа месторождений и т. п.). Затем с помощью таких признаков устанавливаются ячейки, перспективные в заданном отношении, а также вероятности двух родов ошибок: отбраковка перспективных или признание перспективными безрудных ячеек. Среди методов математической аналогии различаются методы классификации и «распознавания образов».

Методы непривычны, сложны, средней трудоемкости (не менее одного чел./мес. при готовом программном обеспечении); относительно объективны; наряду с геологической, требуют специальной математической подготовки; при достаточном числе признаков применимы для любых полезных ископаемых, но только в одном регионе; применяются реже простой аналогии; исходные данные часто известны, сбор их весьма трудоемок, требуется информация о большом числе признаков; влияние экономических факторов скрытое и очень слабо поддается учету; ЭВМ необходима; в основе метода много недоказуемых предположений, часть из них весьма неправдоподобна; известны возражения; результат относительно воспроизводим; надежность высокая, рассчитываемая количественно, объективно. Методы адекватны ответственным решениям. Применяются в тех же условиях, что и простая аналогия. Трудности принципиально те же, хотя улучшаются использование информации, учет геологических признаков и особенно их взаимодействия. Основная особенность методов — оценка вероятности результатов прогнозирования.

Методы статистического анализа (корреляция, регрессия, дисперсионный анализ и др.) излагаются в пособиях по математической статистике и теории вероятностей. Например, корреляция и регрессия применяются для выявления наличия и характера связи между признаками; дисперсионный анализ — для оценки влияния факторов на изменчивость оруденения; факторный анализ — для выявления фундаментальных переменных, влияющих на рудообразование.

В качестве примера сошлемся на результаты дисперсионного анализа данных о ртутном орудении Никитовского рудного поля в Донбассе [9], согласно которым, например, влияние крутого продольного разлома Секущего на изменчивость оруденения составляет свыше 40 % общего влияния всей совокупности факторов.

Методы известны, относительно сложны, мало трудоемки, относительно объективны; требуют знания математической статистики; применяются в широкой области; исходные данные известны или нет, в зависимости от чего изменяется трудоемкость их сбора, параметров немного; влияние экономических факторов явное или скрытое (в зависимости от разных видов задач), иногда поддается учету; требуется использование ЭВМ; основы методов разной степени правдоподобности, обычной для аналогии; плохо проработаны теоретически; возражения против применения в геологии известны; воспроизводимость средняя; надежность высокая, объективная, рассчитываемая количественно. Методы адекватны принимаемым ответственным решениям. Методы инвариантны и используются самостоятельно или в сочетании с другими при масштабах исследований ниже провинциального для оценки прогнозных ресурсов всех категорий (P_1 , P_2 , P_3), а также для определения числа месторождений или их разнообразия (в том числе и в виде объектов определенной величины); используются и при контроле оценок, сделанных другими методами. Трудности характерны и для методов аналогии.

Метод качественных геологических моделей заключается в том, что на основе анализа эмпирических материалов по совокупности определенных геологических объектов или процессов создается их качественная статическая или динамическая модель, в рамках которой связываются (тоже качественно) составляющие, элементы или признаки. От простой аналогии метод отличается тем, что в нем учтены наиболее значимые признаки и свойства геологического объекта или процесса в целом.

В качестве примера напомним об одном из этапов геолого-разведочных работ в Никитовском рудном поле. При изучении ртутного оруденения Е. Е. Захаровым и Н. И. Королевым [19] было высказано предположение, что оно локализуется в районе крупного продольного разлома Секущий (одного из основных рудоподводящих каналов), позволившее значительно расширить перспективы разведки руд на глубину и на том этапе способствовавшее весьма оптимистической оценке прогнозных ресурсов. В дальнейшем разведка подтвердила правильность этой модели рудораспределения.

Метод традиционен, привычен, сложен, трудоемок, субъективен; существует в виде вариантов, часто применяемых; исходные данные нередко неизвестны, их сбор трудоемок ввиду большого числа признаков; влияние экономических факторов скрытое и не поддается учету; ЭВМ не нужна; часть оснований

метода гипотетична; возражения имеются против любой конкретной реализации метода; воспроизводимость весьма малая; надежность малая, не определяемая количественно, весьма субъективная. Метод часто неадекватен серьезным решениям. Применяется (обычно самостоятельно) при региональных и локальных масштабах исследований для оценок прогнозных ресурсов (включая ресурсы в крупных объектах) по категориям P_1 , реже P_2 .

Основные трудности: неопределенность при учете в модели свойств эмпирической совокупности; наличие неучтенных признаков, непроработанность отношений между признаками и правдоподобностью их логических преобразований.

Метод оценки по сложности и разнообразию геологического строения базируется на установленном положении о том, что сложность и разнообразие геологического строения региона определяет суммарные масштабы комплекса полезных ископаемых в его пределах. Это положение подтверждено эмпирически для железорудных месторождений Красноярского края, месторождений цветных, редких и благородных металлов Центрального Казахстана, для разнообразия рудных объектов восточной части Главного Кавказа, комплекса месторождений полезных ископаемых США и других провинций [7, 56]. Правда, конкретный вид взаимосвязи в значительной мере зависит от методики количественного определения сложности и разнообразия, масштаба исследования, размера элементарной ячейки, от зональности расположения объектов и др.

Например, по данным 50 штатов США, Пуэрто-Рико, Новой Зеландии, Родезии, Малайзии и четырех провинций ЮАР [56] между разнообразием y видов полезных ископаемых и числом x хронологическо-петрографических классов горных пород установлена, как уже говорилось, линейная связь

$$y = 11,277 + 1,846 x.$$

В целом метод несложен, средней трудоемкости, относительно субъективен; не требует особой подготовки; возможна широкая область применения, но пока применяется редко; исходные данные обычно неизвестны, сбор их относительно трудоемок, число интересующих параметров среднее; влияние экономических факторов скрытое, плохо учитываемое; основы метода не всегда правдоподобны; возражения неизвестны; результаты слабо воспроизводимы, весьма ненадежны, малобъективны, количественно неустанавливаемы. Адекватность метода серьезным решениям находится под вопросом. Метод применим в континентальных, провинциальных и локальных масштабах исследований для всех категорий (P_1 , P_2 , P_3) прогнозных ресурсов, а также для установления числа неизвестных месторождений и их разновидностей, включая объекты определенной величины. От-

личительная особенность метода — прогноз на всю совокупность полезных ископаемых и выявление наиболее перспективных участков. Основная трудность — зависимость измерения сложности и разнообразия от исходных единиц (включая размеры элементарной ячейки), а также маскировка влияния этих параметров в связи с миграцией от источников и зональностью.

С помощью **моделей распределения содержания полезного компонента** в рудах и вмещающих горных породах находят соотношения либо между балансовыми и забалансовыми запасами месторождения, либо между эмпирическим распределением содержания и его теоретической моделью. В качестве последней используется нормальная, логнормальная или экспоненциальная кривые (статистический подход) или кривая, рассчитываемая на основе энергии рудообразования и закона Больцмана (физический подход); соотношение запасов при разном бортовом содержании может находиться и непосредственно по эмпирической кривой для того же объекта. Знание реальных запасов и подсчитанные соотношения позволяют определять прогнозные ресурсы.

В качестве примера приведем ссылку на расчеты распределения запасов олова в кварц-касситеритовых рудах при различном содержании продуктивного металла [43, 44]. Расчеты сделаны на основе термодинамической модели энергии рудообразования в предположении его изотермических условий. Апроксимирующая кривая распределения запасов имеет вид

$$P_k = \frac{1290}{c'^{e0,029}} \sqrt{c' - 1},$$

где P_k — запасы олова в условных единицах при условном содержании в c' кларков, e — основание натурального логарифма. По этой кривой при содержании олова 0,03 % ($c'=1$) его запасы равны 12 980, а при содержании 78,4 % — 1 усл. ед. По разнице эмпирического и теоретического распределения олова получена оценка его прогнозных ресурсов на соответствующем объекте.

Метод непривычен, сложен, но поддается упрощению при использовании готовых таблиц; малотрудоемок; относительно объективен; требует ориентировки в геостатистике, но техника расчетов легко усваивается; применим для многих металлов и их месторождений, но пока применяется главным образом за рубежом; исходные данные о небольшом числе параметров обычно известны, сбор информации нетрудоемок, влияние экономических факторов явное и поддается учету; возможно применение ЭВМ; основы метода правдоподобны или слабы (в зависимости от вариантов); возражения известны для некоторых вариантов метода; воспроизводимость средняя; надежность рассчитывается количественно и объективно. Метод адекватен серьезным решениям.

Применяется главным образом в локальном масштабе для определения прогнозных ресурсов категории P_1 , иногда и P_2 , а также в планетарном и континентальных масштабах; пригоден для контроля прогнозных оценок в этих условиях. Главная трудность — выбор статистической модели распределения содержания и небольшая точность в области рудного содержания.

Геологический опыт и обработка эмпирических данных по ряду рудных провинций мира устанавливает существование **линейной положительной корреляционной связи между содержанием и запасами продуктивных компонентов** в месторождениях (рудопроявлениях) или рудных телах. Связь выражается уравнениями регрессии типа

$$q = \alpha c + \beta,$$

где q — запасы, c — содержание в рудах, α и β — линейные коэффициенты. Конкретный вид уравнения различается для разных металлических полезных ископаемых, регионов и величин содержания. Например, для меди Центрального Казахстана она имеет следующий вид: $q = 160\,000 c_{\max} + 254\,000$ т, а для висмута в том же регионе $q = 343\,000 c_{\max} + 35\,000$ т, где c_{\max} — наибольшее известное содержание в рудах. В ряде конкретных случаев под действием закона Ласки подобная связь не проявляется или обращается в отрицательную.

Метод привычен, прост, нетрудоемок; объективен; применим для разных полезных ископаемых и части регионов, но применяется редко; исходные данные часто известны; сбор их нетрудоемок — два параметра; влияние экономических факторов поддается учету; ЭВМ можно использовать; основы метода достаточно правдоподобны; возражения против него известны и серьезны; воспроизводимость оценок средняя; надежность низкая, рассчитываемая количественно и объективно. Метод находится на грани адекватности применяемым серьезным решениям. Используется в провинциальном или локальном масштабе исследований для оценки прогнозных ресурсов по категориям P_1 и P_2 . Основная трудность заключается в том, что связь запасов и содержания представляет собой неопределенную композицию двух противоположных по знаку зависимостей (одна — закон Ласки), вследствие чего ее конкретный вид зависит (включая знак) от конкретных условий.

Отрицательная связь запасов q металла и его содержания в рудах отдельных месторождений известна геологам с 1951 г. Ее общий вид

$$c = \alpha - \beta \ln q \text{ и } c_{\max} = \alpha - \beta (\ln q + 1),$$

где c и c_{\max} — среднее и бортовое содержание металла в руде, а α и β — коэффициенты линейной связи, получил название **закона Ласки**. В некоторых случаях представленные уравнения выполняются и для совокупности месторождений. Например, на

зарубежных ртутных месторождениях установлена следующая зависимость:

$$\bar{c} = 0,870 \ln q - 5,21 \text{ и } c_{\max} = 0,336 \ln q + 2,62,$$

где c_{\max} — наибольшее содержание ртути в рудах.

Метод позволяет рассчитывать изменение запасов при изменении содержания металлов в рудах.

Например, для ртути по Каргиллу с соавторами [53] отмечается обратная линейная связь между логарифмами кумулятивного содержания металла в руде и логарифмом кумулятивной добычи. Закон Ласки хорошо выдерживается и на крутопадающих ртутных месторождениях (Альмаден, Нью-Альмаден, Идрия) с выклинивающимися рудными зонами [59]. Аналогичны соотношения и для динамики добычи меди в США [60].

Метод непривычен, несложен, нетрудоемок, объективен; применяется (не часто) для рудных месторождений любых регионов; исходные данные известны для разведанных или разведываемых месторождений; сбор их нетрудоемок, параметров мало; влияние экономических факторов явное и поддается учету; желательное использование ЭВМ; основы метода правдоподобны; возражения известны; воспроизводимость средняя; надежность средняя; устанавливается объективно, иногда рассчитывается количественно. Метод адекватен принимаемым серьезным решениям. Применяется в локальном масштабе месторождений или рудных полей для оценки прогнозных ресурсов категории P_1 , иногда при изменении порогового содержания полезного компонента. Основная трудность — отсутствие учета безрудных интервалов внутри рудных тел. Главная особенность — прогнозирование в основном субэкономических ресурсов.

Метод оценки по кларкам и химическим эквивалентам базируется на теоретически и эмпирически установленном положении о том, что суммарные ресурсы Q металла в земной коре под континентами и в крупных геологических провинциях (например, таких, как США, Канада, Забайкалье, Япония) прямо пропорциональны его кларку c_0 :

$$Q = kc_0,$$

где k — коэффициент пропорциональности, который в среднем для земной коры под континентами до глубины в 2 км равен примерно $10^{10,51}$, для США $10^{10,39}$, Канады $10^{9,8}$ — $10^{10,7}$, Японии 10^8 — 10^9 . Формула суммарных ресурсов уточняется, если в нее вводится химический потенциал a/z металла,

$$Q = k \frac{a}{z} c_0,$$

где a — атомный вес, z — валентность.

Например, вольфрам в одном из регионов имеет общую массу в блоке земной коры, равную примерно $1 \cdot 10^{11}$ т, кпд $\eta = \frac{a}{zF} = 2,67 \cdot 10^{-4}$, коэффициент $k \approx 1 \cdot 10^{-4}$, тогда

$$Q = 2,67 \cdot 10^{-4} \cdot 10^{-4} \cdot 10^{11} = 2,67 \cdot 10^3 = 2670 \text{ т.}$$

Разведанные запасы вольфрама в этом регионе $Q_s = 870$. Следовательно, прогнозные ресурсы $Q_{пр} = 1800$ т.

Метод непривычен, прост, нетрудоемок, объективен; применим в широкой области (металлические полезные ископаемые), но применяется пока редко; исходные данные (мало параметров) часто, но не всегда известны; влияние экономических факторов поддается учету; ЭВМ не нужно; основы метода правдоподобны; возражения против него пока неизвестны; воспроизводимость высокая; надежность средняя, объективно не рассчитываемая. Метод адекватен серьезным решениям, применяется для оценок прогнозных ресурсов только в планетарном, континентальном и провинциальном масштабах по категории P_3 , а также для контроля оценок в региональном масштабе. Основная трудность — отсутствие минимального масштаба применимости метода. Основные особенности — простота, доступность, объективность.

Оценка по коэффициенту полезного действия рудообразования производится на основе модели геохимического цикла. Введен коэффициент полезного действия (кпд) миграции

$$\eta = \frac{n}{m},$$

где n — число концентрирующихся, m — общее число мигрирующих атомов. Для реальных процессов рудообразования кпд может быть определен по содержанию металла, по соотношениям изотопного состава или по термодинамическим условиям процесса. Знание примерной величины m или отношения n/m (кпд) в сходных условиях приводит к примерной оценке количества концентрирующихся атомов. Установлено, что

$$n_{i>k} = \frac{m \eta^k}{\ln \eta} = \frac{m \bar{\eta}}{\ln \eta},$$

где i и k — все и некоторые моменты рудообразования, $\bar{\eta}$ — интегральная величина кпд.

В качестве примера покажем расчет кпд по изменению изотопного отношения при рудообразовании. Если в среднем оно $m_1/m_2 = a$, в рудах $n_1/n_2 = b$, а во вмещающих породах $(m_1 - n_1)/(m_2 - n_2) = c$, то кпд будет примерно равен $n_2/m_2 = (a - c)/(b - c)$. Расчеты показывают, что чем больше смещение изотопного состава в рудах относительно вмещающих пород, тем выше интенсивность оруденения и больше месторождение, что неоднократно отмечалось в опубликованной литературе.

Метод непривычен, несложен, средней трудоемкости, низкой объективности; может применяться в планетарном и континентальном или локальном (месторождение) масштабе исследования; исходные данные (мало параметров) обычно отсутствуют, но легко вычисляются несколькими имеющимися способами — по распределению содержания; по изотопному составу и др.; влияние экономических факторов весьма слабое, учету не поддается; использование ЭВМ необязательно; метод пока плохо разработан, но основания относительно правдоподобны; возражения неизвестны; воспроизводимость слабая, надежность не изучена. Адекватность принимаемым серьезным решениям неясна. Может применяться и в локальном масштабе для оценки прогнозных ресурсов по категории P_1 . Основная трудность — расчет суммарных масс металла, мигрировавших при образовании месторождения и момента k окончания процесса. Основная особенность — применимость в настоящее время только при имитации рудообразующих процессов.

Метод рангового ряда основывается на том, что если рудообразующий процесс является единым (в статистическом смысле, т. е. когда совокупность его продуктов не противоречит единому статистическому распределению), то запасы полезного ископаемого в его месторождениях или рудных телах для искусственно упорядоченного по убыванию запасов их ряда подчинены закону Ципфа, т. е. распределяются по равнобочной гиперболе. Благодаря этому запасы q и ранговый номер n взаимосвязаны: $qn = \text{const}$, а суммарные ресурсы ряда $Q = q_{\text{max}} \ln \frac{q_{\text{max}}}{q_0}$, где q_{max} и q_0 — запасы наибольшего и наименьшего промышленного объекта. С помощью формулы возможно определить число и запасы пропущенных месторождений ряда, а также общие ресурсы всего ряда или его определенных интервалов (например, для крупных объектов).

В литературе имеются примеры применения метода рангового ряда в различных масштабах. В качестве характерного примера можно указать работу [13], где приведены оценки прогнозных ресурсов цветных металлов (меди, свинца, цинка) для одного из регионов с помощью четырех модификаций метода.

Метод непривычен, прост, нетрудоемок, относительно объективен, применим в широкой области исследований, но пока мало применяется; исходные данные чаще всего известны, сбор их нетрудоемок, параметров немного (один-два); влияние экономических факторов скрытое, но поддается учету; использование ЭВМ возможно, но не обязательно; основы метода правдоподобны; против метода имеются возражения; воспроизводимость хорошая; надежность средняя, объективная, количественно рассчитываемая. Метод адекватен принимаемым решениям. Применяется для прогнозных оценок (по категории P_3 в планетарном, провинциальном и региональном масштабах) суммарных

ресурсов и числа месторождений (в том числе при определенной их величине), для оценок по категории P_1 ресурсов и числа рудных тел (жил, пластов) одного месторождения (рудного поля), а также для оценок ресурсов всего набора полезных ископаемых. Метод применим для совокупности полезных ископаемых, выраженной в эквивалентных количествах. Основной недостаток — сложность определения соответствия геологических условий (цельности и единства эволюционного процесса; адекватности ему исходных данных; отсутствия денудации объектов, сформировавшихся в процессе; меры представительности среди них объектов известного интервала глубинности; границ рудной провинции и др.) модели рангового ряда. Основная особенность — доступность получения ряда важных оценок: суммарных ресурсов и числа объектов, включая объекты определенной величины, соотношения этих параметров и т. п.

Метод эмпирической зависимости ресурсов от запасов крупнейшего месторождения основывается на том, что для ряда металлов между суммарными ресурсами Q в рудоносной провинции и запасами q_{max} ее наибольшего месторождения установлена следующая зависимость:

$$\ln Q = \alpha \ln q + \beta,$$

где $\alpha = 1,00 - 0,062 \beta$, а $\beta = 1,29 \cdot 10^5 c_0 + 3,17$, (c_0 — кларк соответствующего металла). Метод позволяет по запасам наибольшего месторождения определять прогнозные ресурсы рудоносной провинции.

Метод оценки прогнозных ресурсов по запасам крупнейшего месторождения применим к региональным масштабам. В качестве примера можно указать работу [13], где рассмотрена оценка ресурсов меди по указанным формулам для одного из регионов.

Метод непривычен, прост, нетрудоемок, объективен, широко применим (кроме оценок для распространенных металлов — железа, алюминия и др.), но пока мало применяется; исходные данные — только один параметр — обычно хорошо известны, их легко собирать; влияние экономических параметров легко учитывается; использование ЭВМ необязательно; метод обоснован теоретически и эмпирически, основы правдоподобны; возражения пока неизвестны; воспроизводимость высокая, надежность средняя или высокая, объективная, количественно не рассчитываемая. Метод адекватен ответственным решениям; используется в провинциальных масштабах для прогнозной оценки ресурсов по категории P_3 , а также для контроля оценок. Основная трудность — определение границ и площади рудной провинции, по отношению к которой действителен прогноз, а также уровня ее денудации.

Метод определения влияния «геологоразведочного фильтра» учитывает систематические различия, имеющиеся между теоре-

тическим ранговым рядом и известной пока совокупностью месторождений. Он позволяет сравнивать регионы по эффективности открытия месторождений, которая определяется следующим соотношением:

$$\frac{Q_э}{Q_т} = \beta q_{\max}^{\alpha-1} \ln \frac{q_0}{q_{\max}} = \operatorname{tg} \delta,$$

где $Q_э$ — ресурсы открытых (эмпирические) месторождений, $Q_т$ — теоретические, α , β — коэффициенты уравнения связи между суммарными запасами $Q_э$ и запасами наибольшего месторождения q_{\max} ; q_0 — запасы наименьшего промышленного месторождения, δ — угол между осью абсцисс и линией эмпирического рангового ряда в логарифмической шкале координат. Кроме того, метод позволяет сопоставлять регионы по запасам среднего месторождения ($q_э = \beta' q_{\max}^{\alpha-1} \operatorname{tg} \delta q_0^{\operatorname{tg} \delta}$) или месторождения, находящегося в центре эмпирического ряда («настройка» фильтра $\ln q = \ln q_0 + 0,693 \operatorname{ctg} \delta$), а также по запасам и доле запасов, числу месторождений и доле этого числа, приходящимся на определенные объекты по размерам (например, крупные).

В качестве примера сравним параметры месторождений цветных металлов в центральной части Казахской и на территории Азербайджанской ССР (табл. 2). Из таблицы следует, что для

Таблица 2

Сравнение некоторых параметров геологоразведочных работ в двух регионах СССР

Регион	Металл	Параметры геологоразведочного фильтра		
		эффективность открытия месторождения, $\operatorname{tg} \delta$	средние запасы месторождения, усл. ед.	«настройка» фильтра, q^1
Центральный стан	Cu	0,674	47,6	0,03
	Pb	0,466	88,9	5,79
	Zn	0,363	836,9	1,08
Азербайджан	Cu	0,641	3,86	0,03
	Pb	0,389	238,2	7,78
	Zn	0,382	263,2	0,98

меди и цинка эффективность открытия месторождений и «настройка» фильтра в этих регионах практически одинакова; средние размеры месторождений меди и цинка выше в первом районе, а «настройка» и средние размеры свинца выше во втором. Это означает, что при одинаковых затратах и сходном уровне геологоразведочных работ прирост запасов для свинца будет выше на территории Азербайджанской, а меди и цинка — в центральной части Казахской ССР.

Метод непривычен, несложен, нетрудоемок, относительно объективен; применим в широкой области исследований, но пока

мало применяется; исходные данные обычно известны, сбор их нетрудоемок, параметров мало (один-два); влияние экономических факторов выявляется с помощью метода; возможно использование ЭВМ; основы метода правдоподобны; возражения пока неизвестны; воспроизводимость хорошая; надежность средняя, объективно и количественно рассчитываемая. Метод адекватен серьезным решениям, применяется для оценки по категориям P_2 и P_1 прогнозных ресурсов и числа месторождений (в том числе в объектах определенных размеров) в провинциальных, региональных или локальных масштабах исследований, а также для контроля прогнозных оценок, сделанных другими методами. Основная трудность — сложность определения соответствия геологических условий модели рангового ряда. Основная особенность — оценка прогнозных ресурсов при современном уровне технологии и степени эффективности освоения региона.

Метод геолого-экономической экстраполяции основан на предположении о том, что на месторождении или в регионе динамика изменения скорости открытия запасов на погонный метр бурения (или рубль затрат при геологоразведочных работах) может быть представлена отрицательной экспоненциальной зависимостью в координатах: $t/\operatorname{пог. м}$ запасов (ось x) и погонные метры суммарного бурения (ось y). Зная размеры запасов и объем суммарного бурения на два-три периода разведки объекта, определяем прогнозные ресурсы по формуле

$$Q = - \left(\frac{dQ}{dh} \right)_0 \frac{1}{a} e^{ah},$$

где $\left(\frac{dQ}{dh} \right)_0$ — начальная скорость открытия запасов, h — объем проведенного бурения для изучаемого объекта, a — показатель экспоненты, определяемый по эмпирическим данным из уравнения

$$\left(\frac{dQ}{dh} \right)_n = \left(\frac{dQ}{dh} \right)_0 e^{-ah}.$$

Метод геолого-экономической экстраполяции применим к различным масштабам. В качестве примера оценки прогнозных ресурсов предложенным методом в пределах рудного поля можно указать работу [15].

Метод непривычен, несложен, мало трудоемок, средней объективности; возможна широкая область применения, но применяется пока главным образом в нефтяной геологии; исходные данные обычно известны, сбор их мало трудоемок — мало параметров; экономические факторы влияют сильно, но почти всегда поддаются учету; ЭВМ могут применяться; основания метода мало правдоподобны; известны возражения; воспроизводимость оценок средняя; надежность удовлетворительная, объективно устанавливаемая количественно. Метод адекватен серьезным решениям, инвариантен, применим в региональных и ло-

кальных масштабах для оценки прогнозных ресурсов по категориям P_1 и P_2 . Основные трудности связаны с недоказанностью выбора модели динамики изменения скорости открытия запасов во времени. Основная особенность — применим для долго разведывающихся месторождений или регионов.

КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ПРОГНОЗНЫХ РЕСУРСОВ

Выше описаны методы и их модификации, различающиеся по эффективности, надежности и другим характеристикам. Выбор методов при оценке прогнозных ресурсов определяется конкретными задачами и условиями работы. Он облегчается обращением к табл. 1, которая позволяет сравнивать методы по результатам, масштабу прогнозирования, категорииности ресурсов, возможности количественной оценки надежности и по трудозатратам. Из таблицы видно, что распределение методов по возможным задачам весьма неравномерно; количественные модели не разработаны для обоснования методов оценки по категории P_3 ; традиционные методы по многим пунктам уступают количественным и др. В то же время общее состояние количественного прогнозирования таково, что необходимая достоверность оценки является результатом нескольких независимых методов, что и должно быть учтено в дальнейшем внедрении системы обязательных параллельных оценок и их контроля на всех этапах апробации.

При этом, несмотря на многообразие обстоятельств, влияющих на выбор рационального комплекса методов оценки, определяющими остаются масштаб исследований, тип объекта оценки и вид исходной информации. В табл. 3 методы оценки прогнозных ресурсов объединены в группы (комплексы) в зависимости от масштаба исследований и соответствующих этим масштабам объектов оценки, что удобно для рассмотрения вопросов комплексирования методов по стадиям геологоразведочных работ. В таблице упоминаются некоторые методы, не охарактеризованные выше и не указанные в табл. 1 (по геохимическим, геофизическим аномалиям). Их подробное описание имеется в ряде специальных работ [17, 20, 29, 43, 44], а вопросы их достоверности, как и достоверности других методов, рассматриваются ниже. Остальные методы также более подробно описаны в методических указаниях по оценке прогнозных ресурсов и других работах [24, 28, 37].

Из табл. 3 видно, что одни методы являются «сквозными», применяемыми на всех или нескольких стадиях геологоразведочных работ (аналогии, экспертных оценок), другие привязаны к определенным масштабам исследований (объектам оценки). При этом в направлении от региональных масштабов прогнозирования к локальным в основе оценки прогнозных ресурсов гео-

ретические предпосылки сменяются эмпирическими закономерностями, а затем все большую роль играют фактические данные (конкретные параметры среды и оруденения).

Окончательное определение прогнозных ресурсов территорий проводится интегральным или дифференциальным путем или комбинацией того и другого подхода. Интегральный путь предполагает суммирование известных и прогнозных ресурсов локальных объектов в пределах оцениваемых территорий. Поскольку интегральный подход приемлем для оценки ресурсов хорошо изученных территорий, последние могут составлять лишь отдельные части рассматриваемой площади.

Дифференциальный путь противоположен по смыслу интегральному. Он базируется на анализе особенностей геологического строения территорий, выявлении закономерностей размещения полезных ископаемых, критериев прогнозной оценки площадей, установлении закономерностей связи рудоносности с особенностями геологического строения территорий. Сам процесс анализа направлен при этом от региональных масштабов к локальным. При оценке прогнозных ресурсов в этом случае особые требования предъявляются к четкости формулирования критериев прогноза, выявлению их значимости и рационального комплексирования. Подобно тому, как для выделения перспективных площадей важны критерии, максимально сокращающие прогнозные площади, для количественного прогнозирования необходимы критерии, максимально коррелирующие с запасами полезных компонентов.

СПЕЦИФИКА ОЦЕНОК ПРОГНОЗНЫХ РЕСУРСОВ, ПОЛУЧЕННЫХ РАЗНЫМИ МЕТОДАМИ

Величина оценки прогнозных ресурсов металлов по категориям P_1 , P_2 и P_3 имеет смысл лишь при вполне определенных условиях. К ним, например, относятся данные о минимальных запасах промышленных рудных тел или месторождений, минимальном граничном и среднем содержании и др. Конкретные значения данных обусловлены рядом геологических и экономических причин, взаимозависимы и изменчивы во времени. Хотя все это общеизвестно, условия оценки прогнозных ресурсов обычно не указываются, что приводит к невозможности корректного их сравнения. В качестве примера приведем часто интересное соотношение числа крупных, средних и мелких месторождений, оно нередко приводится в литературе по разным видам металлических полезных ископаемых и разным регионам, но нигде не сопровождается указанием на величину граничных размеров классов месторождений, хотя известно, что и для разных районов, и для различных металлов эти размеры неодинаковы. Без них соотношение, функционально зависящее

Комплексирование методов

Масштаб исследований и стадии геолого-разведочных работ	Объекты оценки прогнозных ресурсов	Тип используемой информации при выделении объекта	Признаки объекта
Обзорный (мельче 1 : 1 000 000)	Земная кора в целом, континенты, металлогенические пояса, металлогенические провинции	Обзорные географические, геологические, металлогенические карты, литературные данные	Ассоциация структурно-формационных комплексов (для металлогенических поясов и провинций)
Мелкий (региональные геолого-геофизические исследования масштаба 1 : 1 000 000 — 1 : 500 000)	Структурно-металлогенические зоны	Мелкомасштабные карты геологического и прогнозного содержания	Структурно-формационный комплекс (ассоциации рядов геологических и рудных формаций) ряд геологических и рудных формаций

оценки прогнозных ресурсов

Таблица 3

Методы оценки прогнозных ресурсов (выделены основные)	Основные оценочные параметры	Способы (источники) получения оценочных параметров	Категории прогнозных ресурсов
По геохимическим константам и др.	Кларки земной коры, континентов, региональные; коэффициенты перевода геохимических ресурсов в промышленные	Геохимические справочники, расчеты	Начальный минерально-сырьевой потенциал
Ранговых рядов	Запасы известных месторождений	Опубликованные и фондовые материалы, карты полезных ископаемых	
Инвентаризационный с экстраполяцией	То же	То же	
Экспертные	Оценки параметров рудоносности или ресурсов, данные экспертами	Опрос, анкетирование, статистическая обработка	
Аналогии	Удельная рудоносность; площадь выхода перспективных рядов формаций; глубина оценки; коэффициенты подобия	Расчеты по эталонным территориям, металлогенические и прогнозные карты	Минералогенические ресурсы (металлогенический потенциал)
Экспертные	Оценка ресурсов или параметров рудоносности, даваемые экспертами	Опрос, анкетирование, статистическая обработка	
Ранговых рядов	Запасы известных месторождений	Литературные и фондовые материалы	R ₃ — на основе обобщения данных более крупномасштабных съемок
По крупному месторождению	Запасы крупнейшего месторождения, эмпирические коэффициенты уравнения связи	То же	То же
Структурно-геометрический	Узлы пересечения разломов	Геолого-тектонические, металлогенические карты, «достройка» сети разломов	„
Кларковый	Региональные кларки, коэффициенты перевода геохимических ресурсов в промышленные	Литературные и фондовые материалы, расчеты	„

Масштаб исследований и стадии геолого-разведочных работ	Объекты оценки прогнозных ресурсов	Тип используемой информации при выделении объекта	Признаки объекта
Средний (региональные геофизические, геологосъемочные и другие работы масштаба 1 : 200 000—1 : 100 000)	Рудные районы	Среднемасштабные карты геологического и прогнозного содержания, карты геофизических и геохимических аномалий	Геологическая и рудная формации
Крупный (геологосъемочные работы масштаба 1 : 50 000—1 : 25 000 с общими поисками)	Рудные поля	Комплект карт масштаба 1 : 50 000 (геологические, геоморфологические, четвертичных отложений, геохимические, геофизические, закономерностей размещения и прогноза полезных ископаемых)	Геологическая и рудная субформации, внутриформационные неоднородности (фаши, ритмы, уровни несогласий и др.)

Методы оценки прогнозных ресурсов (выделены основные)	Основные оценочные параметры	Способы (источники) получения оценочных параметров	Категории прогнозных ресурсов
Аналогии	Удельная рудоносность; площадь выхода перспективных формаций или структур; глубина оценки; коэффициенты подобия	Расчеты по эталонным рудным районам, металлогенические и прогнозные карты	Р _в
Экспертные	Оценки ресурсов или параметров рудоносности, даваемые экспертами	Опрос, анкетирование, статистическая обработка	
Геохимические	Данные опробования первичных и вторичных ореолов минерализации, параметры ореолов, их продуктивность, коэффициенты перехода между геохимическими и промышленными запасами, статистическое распределение содержания металлов в ореолах (средние, дисперсии и др.)	Опробование, геохимические карты, коэффициенты перехода (по аналогии с другими районами), экспертная оценка	
Геофизические	Параметры интенсивности геофизических аномалий, пространственные параметры аномалий, коэффициенты перехода между интенсивностью аномалий и промышленными ресурсами	Геофизические измерения, геофизические карты	
Статистические	Интенсивность проявления геологических признаков (факторов) и оруденения	Снятие информации с карт (часто по равновеликим площадям), опробование, измерения	
Аналогии	Удельная рудоносность; площадь выхода перспективной ассоциации пород, рудоконтролирующей структуры; глубина оценки; коэффициент подобия	Расчеты по эталонным рудным полям, измерения, экспертиза	
Экспертной оценки	Оценка ресурсов, данные экспертами	Опрос, анкетирование, статистическая обработка	

Масштаб исследований и стадии геолого-разведочных работ	Объекты оценки прогнозных ресурсов	Тип используемой информации при выделении объекта	Признаки объекта
	Перспективные участки, выраженные в геохимических аномалиях		
	Перспективные участки, выраженные в геофизических аномалиях		
	Рудопроявления		Минеральный, минералого-морфологический, геологопромышленный тип

Методы оценки прогнозных ресурсов (выделены основные)	Основные оценочные параметры	Способы (источники) получения оценочных параметров	Категории прогнозных ресурсов
Статистические	Интенсивность проявления (площадь, объем, длина, плотность) геологических признаков и известной рудоносности	Обычно снятие информации с карт по равно-великим ячейкам, опробование, измерения	
Ранговых рядов рудных тел	Запасы известных рудных тел	Прямые и косвенные расчеты ресурсов известных рудных тел	
Геолого-экономической экстраполяции	Скорость бурения, вложения средств; время освоения	Анализ экономических характеристик разведки — обычно фондовые материалы	
Геохимические (для металлических полезных ископаемых)	Данные опробования первичных и вторичных ореолов минерализации, их продуктивность; параметры ореолов; коэффициенты перехода от геохимических ресурсов к промышленным, статистика распределения содержания металлов	Опробование, геохимические карты, коэффициенты перехода (аналогия, экспертные оценки)	P ₂
Геофизические (для некоторых видов полезных ископаемых)	Данные геофизических измерений, выражающие интенсивность геофизического поля, его пространственные параметры. Коэффициенты перехода между интенсивностью аномалий и промышленными ресурсами	Геофизические измерения, геофизические карты	
Аналогии	Запасы эталонных месторождений данного геологопромышленного (минерального, морфологического) типа	Фондовые источники	P ₂
Экспертные	Оценки ресурсов или отдельных параметров рудоносности, данные экспертами	Опрос, анкетирование, статистическая обработка	
Прямые расчеты	Предполагаемые и измеряемые параметры рудных тел и вмещающей среды	Измерения, экстраполяция измерений, предположения по аналогии	
Ранговых рядов	Запасы (ресурсы) известных рудных тел	Прямые и косвенные расчеты ресурсов известных рудных тел	P ₂
По распределению содержания полезного компонента	Данные опробования рудных тел и ореолов рассеяния	Опробование, фондовые материалы	

от граничных значений величин запасов, лишено реального смысла. Поэтому первое требование, которое должно быть предъявлено к оценке прогнозных ресурсов, заключается в необходимости перечня граничных условий, при которых оценка получена. Второе требование связано с характеристикой метода, поскольку смысловые значения оценки, найденные разными методами, весьма несхожи. Каждый метод при достаточно обширном комплексе характеризуется особым смыслом результата, его надежностью и объективностью, поэтому сравнение оценок, полученных разными методами, это не только сравнение цифр. Планирование народного хозяйства и управление геологоразведочными работами на их основе нуждается в максимальном качестве. Последнее требует применения комплекса независимых методов, повышения надежности каждого из них, а также введения системы сравнения и контроля оценок. Предварительно, однако, следует разобраться в их смысле.

Оценки прогнозных ресурсов при геологоразведочных работах (ГРР) производятся в процессе геологического изучения площадей и касаются их продуктивности за пределами уже открытых и разведанных запасов по категориям А, В и C_1 — C_2 на продолжении главным образом уже выявленных структур, на их флангах, глубине и т. п. По сути дела, здесь речь идет о вероятности распространения руд в прилегающих участках, но составляют они полный объем руд месторождения или только его часть, неизвестно. Следовательно, метод дает представление о ближайших перспективах развития геологоразведочных работ. В анализе участвуют экономические условия, которые учтены при оконтуривании уже известных руд.

Метод аналогии при оценке прогнозных ресурсов дает представление о средних масштабах оруденения в рудных телах, месторождениях или регионах, если использована информация о рудных телах, месторождениях или регионах соответственно. Оценка прогнозных ресурсов здесь совпадает с оценкой при ГРР, но обычно шире нее по объему понятия, увеличивающемуся в указанном ряду. Экономические соображения входят в оценку в неявном виде, поскольку они таким же образом участвовали в формировании исходных данных, из которых она получена. Но точные границы действия экономических факторов и их сопоставимость с типовыми при оценке в результате геологоразведочных работ неясна и скорее всего условна. В свою очередь, оценки по данным о рудных телах, о месторождениях или о регионах также малосопоставимы. Действительно, первые учитывают возможности нахождения ресурсов в рудных телах, аналогичных известным, но оценки по данным о месторождениях уже включают и перспективы в разных условиях, характеризуя более широкие возможности локализации оруденения, но при меньшей надежности прогноза. Еще больше это относится к оценкам рудного района.

Все методы, основывающиеся на распределении содержания продуктивного компонента в рудах, позволяют найти оценку прироста ресурсов в рудах с определенным содержанием (балансовых, забалансовых или субэкономических) относительно уже разведанных или оцененных запасов. Но величины последних вполне подвержены изменениям, а значит, подвержены изменениям и вытекающие из них оценки прогнозных ресурсов. Отличие оценок этим методом от предыдущих заключается в том, что здесь речь идет не обо всех ресурсах, не о ресурсах ближайшей перспективы, а только о ресурсах определенного качества, поскольку здесь можно учесть экономические требования к содержанию; правда, другие экономические требования (глубина, характер залегания кровли, обогащаемость) здесь также не рассматриваются.

Метод геолого-экономической экстраполяции дает оценку рудного месторождения в целом, но на стадии, когда значительная часть его запасов уже разведана, причем на протяжении, как правило, длительного предшествующего срока. При этом учтены экономические условия подсчетов ресурсов, которые и экстраполируются на будущее, причем нередко за пределы обозреваемых в настоящее время перспектив. Поэтому оценка прогнозных ресурсов этим методом сопоставима с оценкой методом аналогии по информации о месторождениях или рудных полях, но отличается от оценок другими методами.

Понятно, что сравнение оценок, сделанных каждым из этих методов, возможно, но не просто, и требует знания особенностей методов. В качестве примера их неучета следует привести статью И. Ф. Мигачева и А. Е. Сальникова [31], посвященную «закрытию» метода рангового ряда. Основанием для нее послужили расчеты, показавшие, что известные запасы месторождений Канады отличаются от теоретических по закону Ципфа, а оценки, сделанные при изъятии из эмпирического рангового ряда данных по каждому десятому, пятому или второму месторождению, заметно расходятся по величине. Эти результаты не могут опровергнуть ни закона Ципфа, ни его применения при оценке прогнозных ресурсов. Метод рангового ряда заключается в том, что для региона строится эмпирический ряд величин запасов известных месторождений (убывающий или возрастающий), находится наиболее близкий к нему теоретический ряд, отвечающий закону Ципфа, т. е. гиперболическому распределению запасов, а затем по их разнице определяется наименьший возможный уровень прироста запасов при конкретных исходных данных. Таким образом, оценка относится не к абсолютной величине ресурсов, а только к ее нижней границе. Об этом говорилось и в работе [13] («Оценки ресурсов могут быть ниже, но не выше действительных ресурсов») и в других работах [10, 14]. Основное доказательство М. Ф. Мигачева и А. Е. Сальникова [31] о «неприменимости» закона Ципфа при

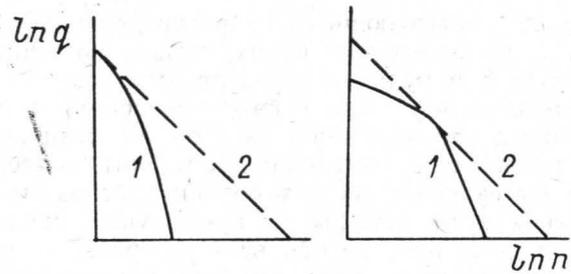
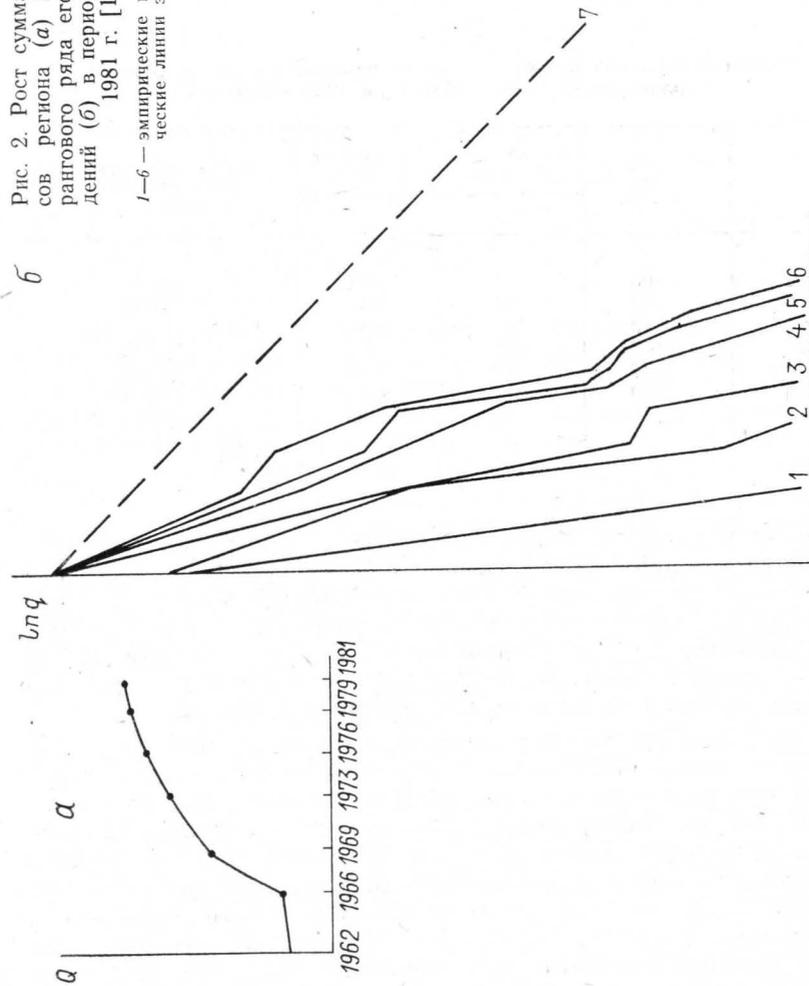


Рис. 1. Графические модели двух разновидностей эмпирических ранговых рядов (1) и соответствующие им теоретические ряды (2).

прогнозной оценке (а именно, несходимость оценок при последовательном увеличении разведанности запасов в ранговом ряду или, что то же, при последовательном ретроспективном изъятии запасов) неправомерно. Покажем это с помощью распределения запасов ранговых рядов на графиках в логарифмической системе координат, где предельный теоретический ряд Ципфа представлен прямой под углом 45° к осям. На рис. 1 показаны встречающиеся на практике две разновидности эмпирических рядов (сплошная линия) и соответствующие им теоретические ряды (прерывистая линия). Процедура оценки прогнозных ресурсов, расчетная техника которой представлена в [10], заключается в построении линии эмпирического ряда месторождений, известных в регионе (q — запасы, $N=1, 2, 3, \dots, n$ — ранговый номер); линии теоретического ряда, т. е. прямой под углом 45° к осям, касающейся эмпирической линии сверху в первой же точке касания; наконец, в определении площади между двумя этими линиями и осями координат. Эта площадь отвечает нижнему пределу величины ресурсов, установленному по совокупности уже известных объектов, а не общей величине ресурсов. На каждом этапе изучения месторождений региона положение эмпирической и теоретической линий запасов разное и разный нижний предел оценок. Возможны случаи, когда этот предел даже меньше, чем запасы известных ресурсов (иногда это бывает на кривых типа b на рис. 2), что обычно показывает, что в регионе неизвестен или недостаточно изучен один или несколько крупнейших объектов. На рис. 2, имеющем реальный прототип, дана типичная схема роста разведанности запасов в регионе. На первом этапе эмпирическая линия 1 месторождений определяется небольшими запасами разведанных объектов (даже у наибольшего объекта ряда), причем оценка прогнозных ресурсов тоже невелика. Затем увеличивается как набор месторождений, так и их запасы, в том числе и крупнейшие (линии 2, 3). Соответственно меняются представления о минимально возможном при-

Рис. 2. Рост суммарных запасов региона (а) и изменение рангового ряда его месторождений (б) в период с 1962 по 1981 г. [11].
1—6 — эмпирические и 7 — теоретические линии запасов.



росте ресурсов. Очевидно, что оценка прироста (площади между линиями 1, 2, 3 и 7) не может совпадать. Только на последнем этапе (линии 4—6), когда изменение эмпирической линии запасов идет за счет открытия и разведки средних и малых объектов, линия теоретического ряда остается постоянной, следовательно, лишь в этом случае, который отвечает хорошо изученным регионам, можно говорить о сходимости результатов. В табл. 4 для того же региона показаны оценки прогнозных ре-

Таблица 4

Оценка прогнозных ресурсов методом рангового ряда по данным геологоразведочных работ (для 1969—1981 гг.)

Год	Разведанные запасы, усл. ед.	Оценка прогнозных ресурсов по разведанным данным		Общие (разведанные и прогнозные) ресурсы региона, усл. ед.
		%	усл. ед.	
1962	800	711	5692	6 500
1966	920	407	3690	4 600
1969	2240	401	8984	11 220
1973	2800	307	8617	11 440
1976	3060	235	7197	10 260
1979	3420	247	8464	11 880
1981	3530	214	7548	11 080
				$Q_{\text{ср}} = 11\,180 \pm 82$

сурсов (в усл. ед.) и видно, что только по состоянию для трех последних периодов сумма разведанных и прогнозируемых ресурсов остается практически постоянной (ошибка ± 82 усл. ед.). Извлекая из ряда ту или иную часть объектов, как это делают И. Ф. Мигачев и А. Е. Сальников [31], т. е. переходя от линии 5 к линии 1, особенно, от 3 к 1, получаем заведомо различные нижние пределы величины прогнозных ресурсов.

В подобном же ракурсе находится «доказательство» неприменимости закона Ципфа из-за различия эмпирического и теоретического рядов месторождений Канады. Неоднократно излагалось [10], что эмпирический ранговый ряд закономерно отличается от теоретического, так как геологоразведочные работы представляют собой естественный фильтр, действие которого сказывается в том, что крупные объекты открываются легче, чем средние и малые. Модель «геологоразведочного фильтра» вносит в метод рангового ряда серьезные поправки, связанные с современным уровнем разведанности месторождений. В таком случае отличие эмпирических данных от теоретических не может быть поставлено в укор методу, при разработке которого оно установлено, изучено и при прогнозе учитывается [16].

Промышленные запасы	1	2	3	4
Субэкономические запасы	5	6	7	8

Рис. 3. Соотношение оценок прогнозных ресурсов (промышленных и субэкономических), сделанных разными методами (соотношения площадей).

1 и 5 — по рудным телам методом аналогии. 1+2 и 5+6 — методом рангового ряда, 1+2+3 и 5+6+7 — методом геолого-экономической экстраполяции. 1+2+3+4 и 5+6+7+8 — по месторождениям методом аналогии.

Метод рангового ряда в геологии обоснован, в первую очередь, работами советских геологов-нефтяников [4, 21]. В геологии рудных месторождений проведен его разбор на модельном уровне [10] и доказано соответствие следствий, вытекающих из теоретической модели, эмпирическим соотношениям [32]. Кроме того, существуют данные об изменении ранговых рядов в процессе разведки регионов и месторождений [14, 32], подобные рис. 2, которые показывают, что эмпирические ранговые ряды последовательно приближаются к теоретическому, следующему из закона Ципфа. Трудности на пути применения метода рангового ряда заключаются не в ограниченности закона Ципфа, а в сложности доказательств геологического единства объектов и их адекватности определенному рудообразующему процессу. Но эти трудности преодолимы, если не на общем уровне, то пока на уровне конкретных геологических регионов, поэтому оснований для отказа от метода рангового ряда в настоящее время нет.

Таким образом, метод рангового ряда дает нижний предел оценки прогнозных ресурсов объектов, представляющих собой статистическую совокупность, адекватную некоторому геологическому процессу, породившему ее. Только для очень хорошо разведанных объектов метод дает приближенную оценку прогнозных ресурсов, которая, если бы не была подвержена влиянию не всегда выявляемых экономических факторов (например, глубинности руд), могла бы быть сопоставима с оценкой методом аналогии.

На рис. 3 показано примерное соотношение оценок прогнозных ресурсов, сделанных разными методами.

Таблица 5

«Ящик Маккелви» — модель геолого-экономической классификации ресурсов

Степени выгодности	Степени надежности				
	установленные общие ресурсы			неоткрытые общие ресурсы	
	демонстрируемые		предполагаемые	гипотетические	спекулятивные
	измеренные	установленные			
Экономические	Запасы				
Субэкономические пре- дель- ные полу- пре- дель- ные	Ресурсы				

ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О ДОСТОВЕРНОСТИ И НАДЕЖНОСТИ ОЦЕНОК И ТРЕБОВАНИЯ К ИХ КАЧЕСТВУ

Проблема достоверности и надежности оценок прогнозных ресурсов рассматривается в настоящее время на качественном уровне. Первое ее рассмотрение связано с так называемым «ящиком Маккелви» [59] — моделью, в которой были увязаны два главных аспекта проблемы (табл. 5): геологическая надежность (горизонтальная ось) и экономическая выгодность (вертикальная). Градации надежности включают в себя установленные запасы, в том числе измеренные, указанные и предполагаемые, а также неоткрытые ресурсы, в том числе гипотетические (в известных районах) и (в значительной степени) спекулятивные. Градации выгодности включают экономические и субэкономические (в их числе полупредельные и предельные) запасы и ресурсы.

Принципы «ящика Маккелви» сейчас признаны в разных странах, где, как правило, сохранены те же два измерения, но применены другие их градации. Например, Геологическая служба Канады [55] в 1972 г. использовала вариант классификации, представленной в табл. 6. Поскольку границы категорий по горизонтальной оси весьма условны, а по вертикальной — сильно подвижны в зависимости от конъюнктуры, то между запасами и ресурсами существуют зоны неопределенности, которые иногда и указываются на схемах (рис. 4).

Таблица 6

Вариант классификации ресурсов в развитие модели «ящик Маккелви»

Уменьшение достоверности существования	Уменьшение возможности промышленной добычи	
	могут разрабатываться сейчас (вероятность 50%)	дополнительные, могут разрабатываться до 2000 г. (вероятность 50—10%)
Уже открытые		
Дополнительно ожидаемые		
Предполагаемые		
Гипотетические		

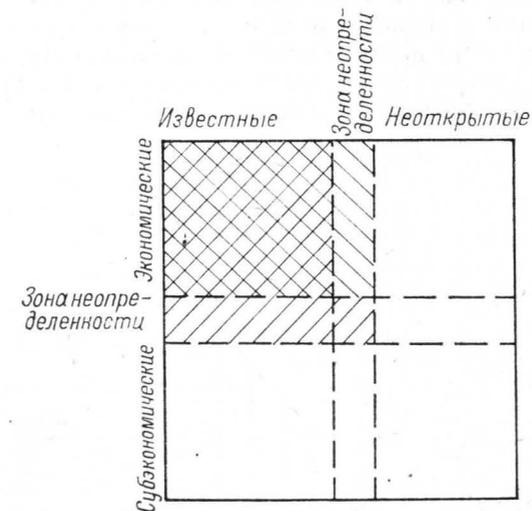


Рис. 4. Вариант классификации ресурсов в развитие модели «ящик Маккелви» с учетом зон неопределенности.

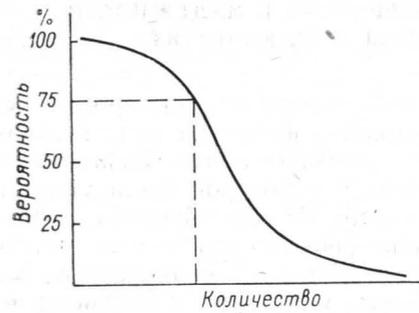


Рис. 5. Соотношение оценки количества прогнозных ресурсов и ее вероятности.

личины имеется, очевидно, непрерывная обратная связь (рис. 5). С помощью графика на рисунке оценка прогнозных ресурсов может быть дана при любом уровне надежности, как это было сделано для нефти США и Канады.

Между количеством ресурсов и их ценами на мировом рынке также имеется непрерывная связь, что видно на графиках рис. 6, где она показана для мировых ресурсов меди, никеля и цинка. Связь положительна и, вероятно, близка к экспоненциальной. С. М. Карджил и др. [53] с помощью пятибалльной системы определили надежность оценки прогнозных ресурсов несколькими методами (баллы указаны в скобках) — экстраполяции среднего ареального значения ресурсов (1), экстраполяции среднего объемного значения (1), функции распределения содержания полезного компонента в рудах (2), экспертизы по Дельфи (3), моделирования месторождений (4) и,

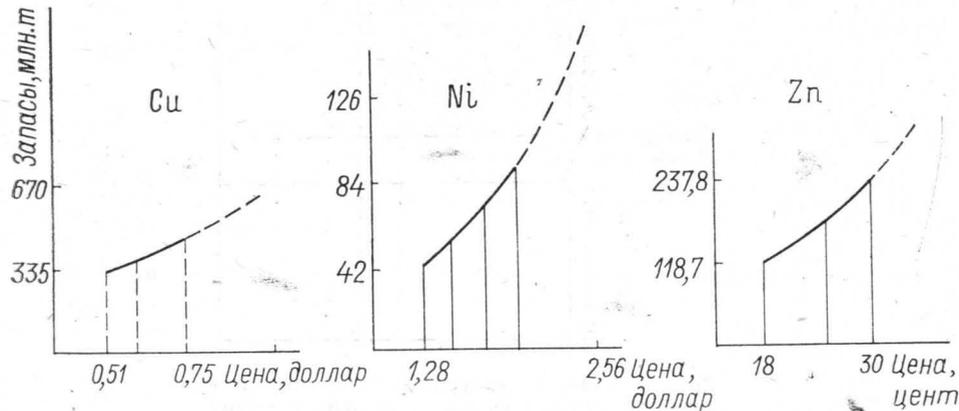


Рис. 6. Мировые запасы меди, никеля, цинка как функция цены.

Значение «ящика» заключается в том, что он вносит ясность в оценки прогнозных ресурсов, где существует путаница малосравнимых цифр запасов и ресурсов разных категорий, а при использовании метода аналогий — непонимание критериев, различающихся для разных полезных ископаемых и регионов, причем не только ролью в оценке, но и вообще своей понятийной базой.

Следует отметить, что между количеством ресурсов и надежностью определения их величины

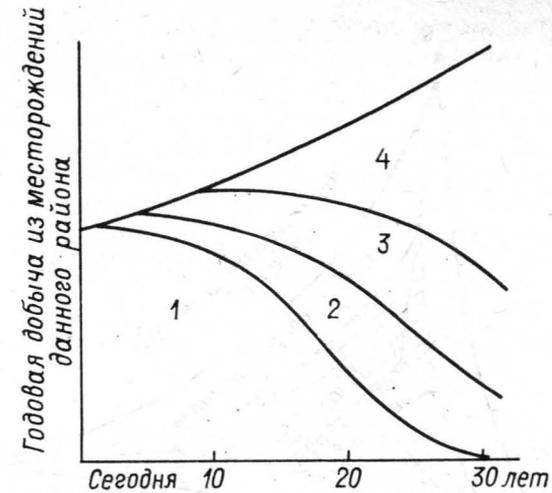
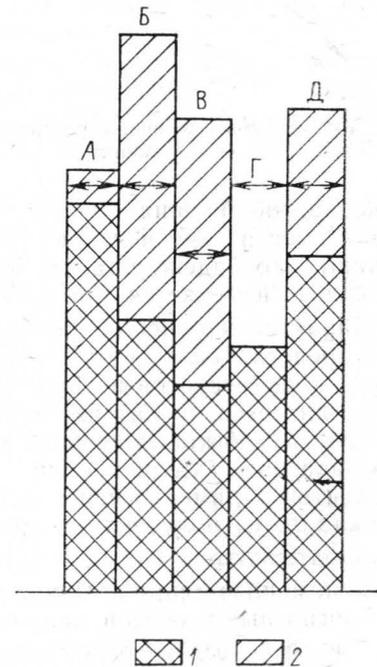


Рис. 7. Изменение надежности оценок ресурсов при экстраполяции в будущее.

1 — надежная, 2 — возможная, 3 — вероятная, 4 — неопределенная добыча.

Рис. 8. Соотношение оценок прогнозных ресурсов.

1 — минимальная оценка, 2 — зона вероятной ошибки средней оценки. А — действительные запасы, Б—Д — ресурсы, оцененные методами аналогии с другими месторождениями (Б) и другими рудными телами (В), рангового ряда (Г), геолого-экономической экстраполяции (Д). Горизонтальные линии со стрелками — средняя оценка ресурсов, без стрелок — границы ее возможных колебаний.



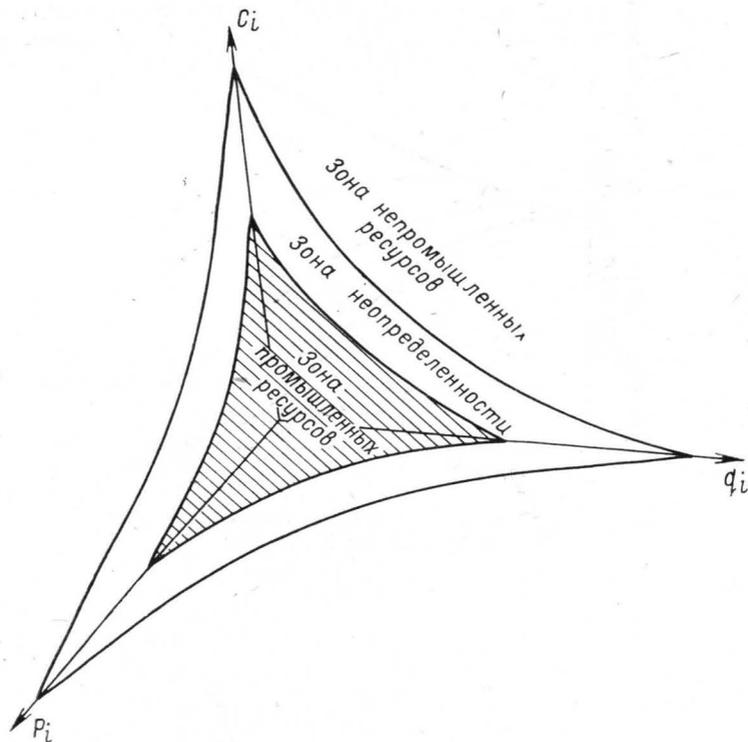


Рис. 9. Связь величины ресурсов q_i с вероятностью P_i ее оценки и минимальным содержанием C_i .

наконец, обобщения — комбинирования или интегрирования — совокупности перечисленных методов (5). При этом авторы отмечают, что надежность, свойственная каждому методу оценки, несколько изменяется при любой конкретной оценке.

Характер изменения надежности при экстраполяции в будущее представлен на рис. 7 [62]. С его помощью можно понять, какие виды ресурсов по надежности попадут в сферу практического интереса, чтобы их подготовка (включая поиски, оценку и разведку) была завершена своевременно. Комплекс источников запасов в будущем охватывает все больше неопределенных элементов. Примерно через 20 лет половина добываемого сырья должна быть получена из месторождений, которые сейчас не разрабатываются.

С помощью «ящика Маккелви» можно также сравнить оценки прогнозных ресурсов, полученные разными методами (рис. 8). Из рис. 8 следует, что эти оценки, как уже говорилось, существенно различаются между собой.

Таким образом, качественное рассмотрение позволило показать, что достоверность и надежность оценки прогнозных ресурсов тесно связаны с величиной ресурсов, уровнем вероятности ее определения и минимальным граничным содержанием промышленных руд (рис. 9). Из рисунка следует, что между любыми двумя указанными компонентами из трех существует обратная связь, а рядом с оценкой промышленных прогнозных ресурсов имеется зона неопределенности, где взаимодействие компонент может дать низкое качество оценок прогнозных ресурсов.

ВОЗМОЖНАЯ ОСНОВА РАСЧЕТА ДОСТОВЕРНОСТИ ОЦЕНОК ПРОГНОЗНЫХ РЕСУРСОВ

Достоверность оценок прогнозных ресурсов совершенно очевидно связана с их точностью, с ошибками (погрешностями) их расчета. При существующей системе учета прогнозных ресурсов, когда их оценки фиксируются как точечные, погрешности оценок, с одной стороны, практически всегда имеют место, с другой, — нигде не фиксируются и учитываются лишь косвенно, путем указания категоричности ресурсов. В следующем разделе зависимость между достоверностью оценок ресурсов и их категоричностью характеризуется количественно. Здесь же рассмотрим возможный математический аппарат оценки такой зависимости. Для этого введем ряд обозначений:

\bar{Q} — средняя (наиболее вероятная) оценка прогнозных ресурсов (ОПР); Q_{\min} — минимально возможная ОПР; Q_{\max} — максимально возможная ОПР; ΔQ — ошибка ОПР; Π — погрешность ОПР; T — точность ОПР; D — достоверность ОПР; DI — доверительный интервал ОПР.

В основу количественного определения достоверности (истинности) ОПР предлагаем положить такие понятия, как ошибка, погрешность, точность, доверительный интервал. Эти понятия, в свою очередь, взаимосвязаны. Так, $\Pi = \Delta Q / \bar{Q} \cdot 100\%$; $T = 1 / \Delta Q$; $DI = Q_{\max} - Q_{\min}$; $DI = |-\Delta Q| + |+\Delta Q|$ (при асимметрии \bar{Q}); $DI = 2\Delta Q$ (при симметрии \bar{Q}); $D = (100 - \Pi)\% = \left(1 - \frac{\Delta Q}{\bar{Q}}\right) \cdot 100\%$; ОПР имеет смысл, если $\Delta Q < \bar{Q}$ и, следовательно, $\Pi < 100\%$, $D > 0$, т. е. соблюдается условие $0 < D \leq 100\%$.*

Чем больше погрешность оценки, тем меньше ее точность и достоверность. Максимально точная и достоверная оценка — при погрешности, равной нулю. Если $\Delta Q \rightarrow 0$ и $\Pi \rightarrow 0$, то $T \rightarrow \infty$ и $D \rightarrow 100\%$. В том виде, в каком в настоящее время представ-

* Достоверность события имеет лишь два значения: 0 или 100%. Достоверность же оценки события может принимать все промежуточные значения.

ляются ОПР, не содержится данных для расчета достоверности, ибо приводятся лишь точечные оценки, которые в лучшем случае соответствуют \bar{Q} . Для расчета достоверности необходимо представление о всем возможном диапазоне оценок, т. е. знание Q_{\max} и Q_{\min} . В этом случае, для простоты допустив симметричность математического ожидания ОПР (\bar{Q}), т. е. распределение ОПР по нормальному закону, достоверность может быть рассчитана по формуле $D = (1 - \Delta Q / \bar{Q}) \cdot 100\%$, преобразованной следующим образом:

$$\Delta Q = \frac{Q_{\max} - Q_{\min}}{2}; \quad \bar{Q} = \frac{Q_{\max} + Q_{\min}}{2};$$

$$D = \left(1 - \frac{Q_{\max} - Q_{\min}}{Q_{\max} + Q_{\min}}\right) \cdot 100\%.$$

Если выразить Q_{\min} в долях от Q_{\max} , или наоборот, Q_{\max} в единицах, кратных Q_{\min} , т. е. $K = \frac{Q_{\max}}{Q_{\min}}$, то формула достоверности выразится следующим образом:

$$D = \left(1 - \frac{KQ_{\min} - Q_{\min}}{KQ_{\min} + Q_{\min}}\right) \cdot 100\% = \left[1 - \frac{Q_{\min}(K-1)}{Q_{\min}(K+1)}\right] \times \\ \times 100\% = \left(1 - \frac{K-1}{K+1}\right) \cdot 100\%.$$

Таким образом, если известен диапазон возможных оценок прогнозных ресурсов, то достоверность может быть рассчитана через порядок (кратность) различий Q_{\min} и Q_{\max} :

$$D = \left(1 - \frac{K-1}{K+1}\right) \cdot 100\%,$$

где K — коэффициент, равный отношению максимально и минимально возможных ОПР. При этом величина D не зависит от того, как рассчитывается K : как $K = Q_{\max}/Q_{\min}$ или как $K' = Q_{\min}/Q_{\max}$. Как будет показано в следующем разделе, такой способ расчета достоверности оценок прогнозных ресурсов удобен, в частности, при применении методов геологической аналогии (объемный и др.).

Диапазон возможных значений ОПР, как и значения других параметров рудоносности, определяется видом минерального сырья, типами рудоносной и рудной формаций, структурной обстановкой их проявления, а также степенью изученности оцениваемого объекта (масштабом исследований, стадией геологоразведочных работ), методом оценки, экономическими требованиями и рядом «случайных» обстоятельств. Эти аспекты ОПР рассматриваются в следующем разделе.

Встречаемый в литературе термин «надежность» ОПР часто применяется как синоним достоверности, в смысле вероятности приводимой точечной оценки. В этом случае надежность коли-

чественно будет равна достоверности точечной оценки, выраженной в процентах. Достоверность же интервальных оценок при условии $Q_{\min} < \bar{Q} < Q_{\max}$ всегда будет стопроцентной. Правда, при значительном доверительном интервале, как уже отмечалось, такая оценка теряет смысл. Можно также давать надежность ОПР следующее толкование.

Оценка прогнозных ресурсов — завершающий этап комплекса металлогенических исследований, от установления закономерностей размещения месторождения до металлогенического районирования в данном масштабе. Каждый этап проводится с различной степенью обоснованности и включает в себя элемент неопределенности, поскольку исчерпывающая осведомленность о геологических событиях и факторах рудоконтроля практически неосуществима. Совокупная уверенность каждого исследователя в проведении всех стадий металлогенического анализа создает у него субъективное представление о надежности проведенной оценки. Можно также, как уже отмечалось, указать субъективную вероятность нахождения оценки прогнозных ресурсов в пределах данного интервала.

Вообще достоверность и точность оценок прогнозных ресурсов определяется достоверностью и точностью вычисления соответствующих параметров.

Наметим некоторые рекомендации по контролю оценок прогнозных ресурсов:

— различные оценки прогнозных ресурсов одного и того же объекта (геологического объема) принимаются «совпадающими», если их доверительные интервалы перекрывают друг друга, причем настолько, что новый доверительный интервал не лишает оценку достоверности, т. е. сохраняется условие $\Delta Q < Q$, $D > 0$;

— для установления достоверности оценок прогнозных ресурсов необходимо определять не точечные, а интервальные оценки. Чем меньше доверительный интервал, тем больше достоверность и точность оценки. Однако сравнивать между собой различные оценки по их достоверности и точности можно при одном и том же уровне их значимости, т. е. при одинаковой их вероятности;

— оценки прогнозных ресурсов тем надежнее, чем*

более полно представлены наибольшие по запасам уже известные к моменту оценки месторождения в пределах объекта оценки. Это положение вытекает из факта сосредоточения наибольшей части минеральных ресурсов в первых нескольких объектах ранговых рядов,

более просто геологическое строение и история развития оцениваемой территории,

* Указываются «объективные» причины, влияющие на надежность оценок, и опускаются «субъективные»: научная квалификация исследователя и т. д.

морфологически более прост тип ожидаемого оруденения,

детальнее масштаб проведенных на допрогножном этапе работ, что закрепляется и в более высокой категории прогнозных ресурсов,

больше учитывается измеренных, а не предполагаемых по аналогии параметров оценки, т. е. зависит от применяемых методов оценки,

выше кларк элемента, ресурсы которого оцениваются;

— оперативный контроль оценок прогнозных ресурсов прямым путем — по доле ресурсов, переведенных в высшие категории, или непосредственно по разведанным запасам и тем более по добыче практически неосуществим. Поэтому пути контроля могут быть косвенными:

определение достоверности, точности, надежности оценок прогнозных ресурсов, полученных тем или иным методом,

применение нескольких методов для оценки одного и того же объекта (комплексирование методов),

применение нескольких способов получения оценочных параметров (контроль параметров),

применение специальных контрольных методов (тестов),

методический контроль путем ретроспективного анализа эталонных объектов (условное снятие информации).

ДОСТОВЕРНОСТЬ ОЦЕНОК ПРОГНОЗНЫХ РЕСУРСОВ РАЗЛИЧНЫХ КАТЕГОРИЙ

Категории прогнозных ресурсов, так же, как и разведанных запасов увязаны со стадийностью геологоразведочных работ, в которой реализован принцип последовательного приближения, и с объектами оценки. В конечном счете именно степень детальности геологосъемочных, поисковых, поисково-оценочных и разведочных работ и связанные с ней способы прогнозирования определяют категоричность прогнозных ресурсов, их обоснованность и, следовательно, достоверность. Способы расчета прогнозных ресурсов различных категорий приведены во многих инструктивных и обобщающих методических работах [22]. Здесь эти вопросы рассматриваются лишь с позиций установления их достоверности и касаются до сих пор слабо разработанных аспектов прогнозной оценки рудоносных объектов. Связь стадийности геологоразведочных работ, объектов оценки прогнозных ресурсов, категорий прогнозных ресурсов и запасов минерального сырья представлена в табл. 7.

На стадии регионального геологического изучения территории СССР (на первой подстадии) составляются и обновляются мелкомасштабные полистные и сводные карты (масштаба 1:1 000 000—1:500 000) и дается прогнозная оценка региона

на возможность нахождения месторождений полезных ископаемых. Объектами прогнозирования и прогнозной оценки являются металлогенические пояса, провинции и зоны, для которых определяется минерагенический (металлогенический) потенциал.

Металлогенический потенциал может быть определен комплексом методов, среди которых при оценке металлогенических поясов и провинций важное значение имеют теоретические, основывающиеся на химических, термодинамических, энергетических законах: оценка по кларкам и химическим эквивалентам, по коэффициенту полезного действия рудообразования, по ранговым рядам месторождений, в том числе по запасам крупнейшего месторождения. Комплексная оценка перспективности металлогенических провинций может быть произведена по сложности и разнообразию их геологического строения.

Применение указанных методов формально опирается на объективные показатели, такие, как кларки, сведения о запасах известных месторождений. Однако кларки, особенно региональные, по разным определениям могут отличаться на порядок и более. Как минимум на порядок по разным данным отличаются и коэффициенты пропорциональности между кларками или геохимическими ресурсами и промышленными ресурсами. Вопрос о полноте ранговых рядов при оценке металлогенических провинций, о влиянии на них так называемого геологоразведочного фильтра также решается в данном масштабе в широкой шкале допусков.

В целом можно утверждать, что диапазон оценок прогнозных ресурсов в данном масштабе при применении к указанным объектам составляет до двух порядков, т. е. соотношение минимальной оценки Q_{\min} и максимальной Q_{\max} будет $Q_{\min} = 0,01Q_{\max}$ или $100Q_{\min} = Q_{\max}$. Исходя из приведенных соотношений, рассчитаем достоверность оценок прогнозных ресурсов по выведенной в предыдущем разделе формуле:

$$D = \left(1 - \frac{K-1}{K+1}\right) \cdot 100\%; \quad K = \frac{Q_{\max}}{Q_{\min}} = 100\%;$$
$$D = \left(1 - \frac{99}{101}\right) \cdot 100\% = (1 - 0,98) \cdot 100\% = 2\%.$$

Такая низкая достоверность ОПР на первый взгляд делает почти бессмысленной количественную оценку металлогенического потенциала. Но следует подчеркнуть еще раз, что данная достоверность относится к точечной оценке $\bar{Q} = (Q_{\min} + Q_{\max})/2$. Эта достоверность по сути характеризует вероятность того, что ОПР будет равна именно данному значению. Интервальная же оценка $Q = \bar{Q} \pm 50Q_{\min}$ или $Q = \bar{Q} \pm 0,5Q_{\max}$ вообще обладает стопроцентной достоверностью, т. е. любая ОПР окажется в этом интервале. Другое дело, что этот интервал, из которого «ничего не вывалится», очень велик. К этому надо относиться

Соотношение стадийности геологоразведочных работ, объектов оценки,

прогнозных ресурсов и разведочных запасов различных категорий

Прогнозирование	Стадии геологоразведочных работ	Выделяемые перспективные площади (объекты оценки прогнозных ресурсов)	Категории прогнозных ресурсов и разведанных запасов
Региональное	1. Региональное геологическое изучение территории СССР		
мелкомасштабное	региональные геолого-геофизические исследования масштабов 1 : 1 000 000—1 : 500 000	Металлогенические (Минерогенические) зоны	MP
среднемасштабное	региональные геофизические, геологосъемочные и другие работы масштабов 1 : 200 000—1 : 100 000	Рудные районы	P ₃
крупномасштабное	2. Геологосъемочные работы масштабов 1 : 50 000—1 : 25 000 с общими поисками	Рудные поля	P ₂
Локальное	3. Поисковые работы	Перспективные участки (рудопроявления)	P ₂ , P ₁
"	4. Поисково-оценочные работы	Месторождения	P ₁ , C ₂
Детальное	5. Предварительная разведка	Месторождения, блоки (участки) месторождений, рудные тела	C ₂ , C ₁ *
"	6—8. Детальная разведка, доразведка, эксплуатационная разведка	То же	C ₁ , B
"	Добыча		

Достоверность прогноза, %	Группы прогнозных ресурсов и запасов				
2	Металлогенические (минерогенические) ресурсы			Металлогенический (минерогенический) потенциал	Общий минерально-сырьевой потенциал
20—30	Прогнозные ресурсы	Минерально-сырьевые ресурсы	Минерально-сырьевой потенциал		
30—70					
70 (для P ₁)	Предварительно оцененные запасы			Минерально-сырьевая база	
80 (для C ₂)					
> 80	Разведанные запасы месторождений, рудных тел			Накопленная добыча	
> 80					
	Отработанные запасы				

* За контурами запасов категории C₂ при разведочных работах могут быть полу

чены уточненные оценки прогнозных ресурсов категории P₁.

трезво. Мы указали именно стопроцентно достоверный интервал. Сужая его, мы как бы повышаем точность оценок, но теряем их достоверность вплоть до D=2% для точечной оценки. Таковы статистические законы и с ними следует считаться при планировании развития минерально-сырьевой базы на основе оценок прогнозных ресурсов.

Металлогенический потенциал металлогенических зон может быть определен с помощью не только указанных теоретических, но и ряда эмпирических методов: аналогии, экспертных оценок, структурно-геометрического. Поскольку практически для каждой конкретной металлогенической зоны может быть найдена эталонная (с известными или достоверно прогнозиру-

емыми ресурсами и запасами) или поставлена ей в соответствие та или иная усредненная модель зоны, характеризующаяся определенными параметрами рудоносности, одним из основных методов оценки металлогенического потенциала зон является метод количественной аналогии (объемный). Возможность нахождения промышленных месторождений в оцениваемых зонах должна подтверждаться их прямыми признаками или обосновываться сходством косвенных признаков эталонной и оцениваемой территорий, что фиксируется выбором величины коэффициента схождения. Важнейший признак при оценке металлогенических зон — ряды геологических формаций и их структурное положение. В основе расчетов по аналогии лежат три основных параметра (или их модификации): K — коэффициент схождения эталонной и оцениваемой территорий, q — удельная рудоносность (продуктивность) эталонной территории, V — геометрические параметры оцениваемой территории. Последние получают путем прямых измерений на карте, и их погрешность можно не учитывать. Коэффициент схождения не может изменяться в широком диапазоне, поскольку в противном случае такие территории несопоставимы и надо подыскивать другой эталон. Хотя этот показатель часто определяется субъективно, было бы правомерным считать его не ниже 0,7, т. е. изменяющимся в диапазоне 0,7—1.

Основной изменчивостью обладает эмпирически (статистически) получаемый параметр удельной рудоносности q . Наш опыт показывает, что для металлогенических зон на уровне различий между минимальными и максимальными возможными значениями он может колебаться на порядок.

Таким образом, доверительный интервал оценок по аналогии будет определяться доверительным интервалом значений q . Следовательно, в данном случае типично следующее соотношение минимальной и максимальной оценок прогнозных ресурсов: $Q_{\min}=0,1 Q_{\max}$ или $10 Q_{\min}=Q_{\max}$. Исходя из этих соотношений, рассчитаем достоверность оценок прогнозных ресурсов:

$$D = \left(1 - \frac{K-1}{K+1}\right) \cdot 100\%; \quad D = \left(1 - \frac{9}{11}\right) \cdot 100\% = 18\%.$$

Таким образом, за достоверность оценок металлогенического потенциала металлогенических зон в среднем может быть принята 20 %-ная величина.

Если оценка прогнозных ресурсов металлогенических зон проведена на основе обобщения данных более крупномасштабных съемок, то такие ресурсы могут быть отнесены к категории P_3 с соответствующей им достоверностью, рассматриваемой ниже.

На второй подстадии регионального геологического изучения производится среднемасштабное (1:200 000) картирование

региона, обоснование поисковых признаков и критериев, с помощью которых выделяются перспективные рудные районы и определяются их прогнозные ресурсы, относимые к категории P_3 . При этом так же, как и металлогенический потенциал, прогнозные ресурсы категории P_3 определяются в целом для выделенной перспективной площади (в данном случае потенциального рудного района), поскольку выявление месторождений считается равновероятным в любом ее месте. Если перспективы отдельных участков рассматриваемой площади расцениваются более высоко, оценки ресурсов могут быть соответственно дифференцированы.

Рудные районы, являясь фрагментами структурно-формационных (металлогенических) зон, обычно не теряют структурно-формационной целостности, обладая ею на другом иерархическом уровне. Если при сопоставлении эталонных и оцениваемых металлогенических зон сравниваются ряды геологических формаций, то при оценке рудных районов сравниваются обычно одна-две формации, развитые в пределах той или иной относительно локальной структуры. Эмпирические методы оценки, применяемые при анализе металлогенических зон, сохраняют свое значение также при превалировании метода аналогии. Фундаментальной, хотя и субъективной, основой достоверности оценок прогнозных ресурсов рудных районов (как и металлогенических зон) служат главные (структурно-формационные) признаки, по которым сравниваются оцениваемые и эталонные объекты. Основа точной оценки здесь (как и для металлогенических зон) — правильный выбор эталонов. Это обеспечивается выбором только таких эталонных или модельных рудных районов, коэффициент схождения с которыми у оцениваемых районов не ниже 0,7—0,8. Таким образом, субъективная вероятность ошибки в выборе эталона уже исходно сводится к минимуму. Удельная рудоносность, определяемая на основе большего числа и более детальных данных, в среднем различается на порядок-полпорядка. В результате соотношение минимальных и максимальных оценок по аналогии находится в пределах $Q_{\min}=(0,1-0,2) Q_{\max}$ или $(10-5) Q_{\min}=Q_{\max}$. Достоверность ОПР категории P_3 находим по формуле

$$D = \left(1 - \frac{K-1}{K+1}\right) \cdot 100\%.$$

При $K=10-5$ получаем $D=18-33\%$. Различие в достоверности ОПР от 18 до 33% объясняется различием в надежности оценок, относимых к одной и той же категории P_3 , для металлогенических зон, потенциальных рудных районов, рудных районов с известными месторождениями прогнозируемой рудной формации. Именно в указанном направлении достоверность оценок возрастает от 18 до 33% (округленно от 20 до 30%).

Прогнозные ресурсы категории P_3 служат основой для долгосрочного прогнозирования развития минерально-сырьевой базы и планирования площадей под геологическую съемку масштаба 1:50 000 с общими поисками. Приоритетность районов для постановки указанных работ, помимо количества и качества прогнозных ресурсов, включая тип ожидаемых месторождений, диктуется такими экономическими условиями, как возможность одновременного освоения совокупности полезных ископаемых, совместной эксплуатации различных природных ресурсов, создания новых территориально-производственных комплексов в неосвоенных потенциальных рудных районах, а также возможность обеспечения деятельности существующих предприятий в будущем в известных, освоенных в той или иной мере рудных районах.

На стадии геологосъемочных работ масштаба 1:50 000 с общими поисками производится крупномасштабное геологическое картирование прежде всего в пределах известных горнорудных районов, районов организации территориально-производственных комплексов и районов с высокими перспективами на обнаружение и освоение промышленных месторождений, особенно дефицитных видов минерального сырья. В результате работ оконтуриваются перспективные рудные поля, локализуются в их пределах участки с благоприятными поисковыми признаками, выделяются геохимические и геофизические аномалии рудоносной природы и проявления полезных ископаемых и оцениваются их прогнозные ресурсы. Прогнозные ресурсы указанных рудных объектов (рудных полей, участков, выраженных геохимическими и геофизическими аномалиями, перспективных участков в пределах рудных полей и проявлений полезных ископаемых) относятся к категории P_2 .

При оценке прогнозных ресурсов рудных полей, перспективных участков, рудопроявлений на рассматриваемой стадии геологоразведочных работ наиболее применимы некоторые эмпирические методы, а именно, аналогии (объемный) и экспертных оценок. Применение методов аналогии в этом масштабе часто проводится на формально-статистической основе путем обработки исходных данных математическими методами на ЭВМ при снятии информации по равновеликой сети или по отдельным объектам (математическая аналогия, классификация, регрессионный анализ).

Применение методов математической аналогии (классификационных) основаны на выделении информативных признаков разделения оцениваемых объектов на «безрудные» и рудоносные с той или иной величиной ресурсов путем «обучения» с помощью соответствующих объектов и проведения классификации оцениваемых объектов по степени близости к определенным эталонам. Если ресурсы эталонного объекта i -го класса

равны Q_i , то и ресурсы Q_x объекта, отнесенного к i -му классу, будут равны Q_i , т. е. $Q_x = Q_i$.

Алгоритмы классификации позволяют на основе выбранных для сопоставления признаков и количественно выраженной «интенсивности» их проявления дать в той или иной форме количественное выражение степени сходства оцениваемого и эталонного объекта (своего рода коэффициента K в формуле оценки объемным методом). В качестве такого выражения можно принять, например, вероятность ошибочного отнесения оцениваемого объекта к данному классу P , порог которой можно установить заранее (как это делалось для коэффициента K в виде величины, равной 0,7—0,8). Очень высокий порог может лишить нас эталонов, так как нет абсолютно схожих месторождений, рудных полей и т. д. В то же время этот порог для ресурсов категории P_2 должен быть выше, чем для ресурсов категории P_3 , где возможна ошибка на порядок-полпорядка (в 5—10 раз). Очевидно, его разумно принять в данном случае в пределах пяти-двукратной ошибки, т. е. $Q_{\min} = (0,2—0,5) Q_{\max}$. Поскольку вероятность в данном случае как бы определяет доверительный интервал оценок прогнозных ресурсов как соответствующую часть их ($\Delta Q = P \cdot Q$), она может быть рассчитана, исходя из принятого условия (получения пяти-двукратной ошибки), по формуле $P = \Delta Q / Q$, т. е. как погрешность оценки

$$P = \frac{Q_{\max} - Q_{\min}}{Q_{\max} + Q_{\min}} = 0,66 \text{ -- } 0,33.$$

Достоверность ОПР, рассчитанная по формуле

$$D = \left(1 - \frac{K-1}{K+1}\right) \cdot 100\%,$$

в данном случае при $K=5-2$ составит 33—67 %.

Таким образом, при оценке прогнозных ресурсов методами математической аналогии (классификации) следует устанавливать порог для вероятности ошибочного отнесения оцениваемого объекта к тому или иному классу максимум в 0,66 (66 %), стремясь довести его при наличии эталонов нужного качества до более жесткого — 0,33, что соответствует повышению достоверности оценок с 33 до 67 %.

При регрессионном методе оценка прогнозных ресурсов производится на основе учета связей между величиной ресурсов и интенсивностью проявления геолого-геофизических признаков. Информативная совокупность признаков и их «вес», доля влияния на оценку ресурсов (в общем пропорциональные корреляции ресурсов с данным признаком) определяются на основе данных, снятых с эталонных ячеек (объектов). Прогнозные ре-

суды в оцениваемых ячейках (объектах) определяются, исходя из итогового уравнения, полученного по эталонным ячейкам:

$$Q = A_0 + A_1 X_1 + A_2 X_2 + \dots + A_n X_n,$$

где величина коэффициента A_i ($i=1 \dots n$) соответствует степени влияния признака X_i на оценку прогнозных ресурсов Q . Относительная доля влияния (ДВ) i -го признака может быть найдена по формуле

$$ДВ_i = \frac{A_i}{A_1 + A_2 + \dots + A_n}.$$

«Вклад» каждого признака в величину ресурсов Q пропорционален величине $ДВ_i$. Однако, как и при расчете ресурсов любым другим методом, одновременно с оценкой ресурсов Q формируется и ее ошибка ΔQ . «Вклад» в эту ошибку каждого геологического, геохимического или геофизического признака, включенного в уравнение регрессии, по нашему мнению связан с его корреляцией с величиной общих ресурсов Q . Эта корреляция может меняться от функциональной (коэффициент корреляции значений признака и ресурсов $r_{X_i Q}$ равен единице) до ее полного отсутствия ($r_{X_i Q} = 0$), хотя, конечно, в уравнение регрессии признаки с нулевой или отрицательной корреляцией попасть не должны. Величины коэффициентов корреляции X_i -го признака с величиной ресурсов $r_{X_i Q}$ и вклада признака X_i в ошибку ΔQ , ΔQ_i , находятся в обратной связи, поэтому при условии изменения r от 0 до 1 $0 \leq r \leq 1$ вклад признака в ошибку оценки ресурсов будет пропорционален величине $1 - r$, т. е.

$$\Delta Q_i = (1 - r_{X_i Q}) \cdot \bar{Q},$$

$\Delta Q_i = 0$ при $r_{X_i Q} = 1$. В этом случае в уравнении связи будет всего один признак, достаточный для оценки ресурсов в точечном виде, без доверительного интервала. В общем случае для всех признаков будет характерно $r_{X_i Q} < 1$ и $(1 - r_{X_i Q}) > 0$. Величина ошибки ΔQ будет складываться из суммы ΔQ_i :

$$\pm \Delta Q = \sum_{i=1}^n \Delta Q_i = \left(1 - \sum_{i=1}^n r_{X_i Q}\right) \bar{Q},$$

где n — число признаков в уравнении регрессии. Оценка Q при этом сохраняет смысл при условии $\Delta Q < \bar{Q}$. Кстати, при этом появляется еще один критерий для включения в уравнение регрессии тех или иных признаков, а именно — не только по их максимальному вкладу в Q , но и по их минимальному вкладу в ΔQ , что к тому же и взаимосвязанно. Если принять порог

ошибки прогнозных ресурсов категории P_2 , исходя из условия $Q_{\min} = (0,2 - 0,5) Q_{\max}$, то $\Delta Q \leq (0,1 - 0,25) \bar{Q}$.

Таким образом, в уравнение регрессии достаточно включить те ранжированные по величине $r_{X_i Q}$ признаки X_i , которые позволяют соблюсти условие $(1 - \sum_{i=1}^n r_{X_i Q}) < 0,25$ или $\sum_{i=1}^n r_{X_i Q} > 0,75$. Величина $\sum_{i=1}^n r_{X_i Q} < 0,75$ не обеспечивает соответствия оценки ресурсам категории P_2 .

Прогнозные ресурсы выделяемых по результатам геологической съемки масштаба 1:50 000 и общих поисков участков, выраженных в геохимических и геофизических аномалиях, оцениваются специфическими методами, суть которых заключается в использовании теоретически и статистически обоснованных взаимосвязей между интенсивностью проявления аномалий и масштабом промышленного оруденения. Так, в самом общем виде прогнозные ресурсы Q через продуктивность геохимических аномалий P , с учетом эмпирически установленного коэффициента пропорциональности K оцениваются по формулам типа $Q = KPh$ (h — вероятная вертикальная протяженность оруденения ожидаемого формационного типа). В этой формуле продуктивность ореолов определяется прямым расчетом по данным опробования; глубина оруденения предполагается, но тем самым известно, до какой глубины произведен расчет ресурсов, и только к этой глубине они относятся; коэффициент же пропорциональности устанавливается эмпирически на основе обобщения данных по конкретным типам месторождений или на основе эталонного объекта. Таким образом, основной вклад в ошибку оценки ресурсов ΔQ и в ее погрешность $\Delta Q / \bar{Q}$, а следовательно, и в достоверность ОПР вносит коэффициент K . Исходя из логически выведенных нами требований к достоверности оценок прогнозных ресурсов категории P_2 , вытекают и требования к коэффициентам пропорциональности. Они должны выбираться максимум с пятикратной ошибкой и именно с этих позиций формироваться по данным по известным объектам.

Оценка прогнозных ресурсов по геофизическим аномалиям обычно выполняет контролирующие функции и либо подтверждает ресурсы, оцененные другими методами, либо приводит к пересмотру оценок. При этом иногда используется много разнообразных параметров вмещающей среды и оруденения, установленных по геофизическим данным. Следовательно, в этом случае в погрешность оценки вносят свою долю многие элементы. Однако при их анализе следует также иметь в виду требования к конечной ошибке в данном масштабе. Она должна быть не более, чем пятикратной.

В рассматриваемом масштабе могут быть применимы и другие методы определения ОПР — геолого-экономической экстра-

поляции, по содержанию полезных компонентов (при оценке рудопроявлений) и др.

На территории известных и выделенных при геологической съемке масштаба 1 : 50 000 и общих поисках рудных полей, где возможность обнаружения месторождений подтверждена наличием поисковых признаков или проявлений полезных ископаемых, планируются поисковые работы.

На стадии поисковых работ выявляются и оконтуриваются перспективные участки в пределах рудных полей, а также рудопроявлений и определяются их прогнозные ресурсы по категориям P_2 и P_1 . Ресурсы категории P_1 рассчитываются по измеренным или предполагаемым на основе хорошо обоснованной экстраполяции признакам с учетом оценочных кондиций. Такой подход позволяет установить, причем не только для методов прямого расчета, но и для применяемых в данном масштабе (1 : 10 000—1 : 5 000) методов аналогии, экспертных оценок, рядов рядов рудных тел, геолого-экономической экстраполяции, по содержанию полезных компонентов, примерно двукратную ошибку для ОПР. Исходя из нее, следует предъявлять соответствующие требования к оценке отдельных параметров в формулах расчета. Итак, в данном случае $Q_{\min} = 0,5 Q_{\max}$ или $2 Q_{\min} = Q_{\max}$. Найдем необходимую достоверность оценок прогнозных ресурсов по категории P_1 по формуле

$$D = \left(1 - \frac{K-1}{K+1}\right) \cdot 100\%.$$

При $K=2$ получаем $D=67\%$. В общем достоверность оценок для данной стадии может быть принята равной 70 %.

На участках, получивших положительную геолого-экономическую оценку в результате поисковых работ, проектируются поисково-оценочные работы, на стадии которых производится отбраковка тех проявлений полезных ископаемых, где не подтвердилась современная или перспективная их промышленная значимость. В процессе поисково-оценочных работ детально исследуются приповерхностные части месторождений и прилегающие к ним участки. Оконтуриваются месторождения в пространных пределах геометризованного объема подсчитываются запасы категории C_2 , а в остальной, менее изученной части месторождения, в том числе в пределах единично подсеченных новых рудных тел, оцениваются прогнозные ресурсы категории P_1 . Для последних уже указывалась двукратная возможность ошибки и достоверность, равная 70 %. Но надежность оценок ресурсов категории P_1 на этой стадии увеличивается. Экстраполируя эти данные по точности оценок, приходим к пониманию необходимости оценок предварительно оцененных запасов с возможной полуторакратной ошибкой. В данном случае $Q_{\min} = 0,7 Q_{\max}$ или $1,5 Q_{\min} = Q_{\max}$.

Определим достоверность ОПР:

$$D = \left(1 - \frac{K-1}{K+1}\right) \cdot 100\%$$

при $K=1,5$, $D=80\%$.

Поисково-оценочные работы завершаются составлением технико-экономических соображений (ТЭС) о возможном промышленном значении месторождения, которые становятся основанием для постановки работ следующей стадии — предварительной разведки.

Прогнозные ресурсы категории P_1 и предварительно оцененные запасы категории C_2 , определяемые на последующих разведочных стадиях, характеризуются уже указанной достоверностью (соответственно 70 и 80 %), но увеличивающейся надежностью.

Величина доверительного интервала $Q_{\max} - Q_{\min} = 2\Delta Q$ и особенности положения в нем математического ожидания (или наиболее вероятной оценки прогнозных ресурсов) \bar{Q} позволяют подойти к решению вопроса об ожидаемом количестве прогнозных ресурсов более высокой категории на данном объекте после проведения следующей стадии геологоразведочных работ. Нижний предел этого количества выразится формулой

$$\frac{100 - |-П|}{100 + |+П|} \bar{Q},$$

а верхний

$$\frac{100 + |+П|}{100 - |-П|} \bar{Q}$$

при асимметричной оценке (когда $|-П| \neq |+П|$) и соответственно формулами

$$\frac{100 - П}{100 + П} \bar{Q} \text{ и } \frac{100 + П}{100 - П} \bar{Q}$$

при симметричной оценке $|1-П| = |+П|$.

Например, если оценка прогнозных ресурсов рудного района по категории P_2 проведена с погрешностью, равной $\pm 80\%$ (т. е. с достоверностью 20 %), то количество прогнозных ресурсов категории P_2 на следующей стадии геологоразведочных работ масштаба 1 : 50 000 составит от

$$\frac{100 - 80}{100 + 80} \bar{Q} = 0,11 \bar{Q}$$

до

$$\frac{100 + 80}{100 - 80} \bar{Q} = 9 \bar{Q},$$

т. е. это количество, по существу, при данном уровне достоверности оценки (20 %) практически непредсказуемо (от 0,11 до

9 \bar{Q}). Если же проведена оценка прогнозных ресурсов рудопроявления по категории P_1 с погрешностью, равной 30 % (достоверность оценки составляет 70 %), то при разведке месторождения можно ожидать предварительно оцененных запасов категории C_2 в интервале от

$$\frac{100 - 30}{100 + 30} \bar{Q} \approx 0,6 \bar{Q}$$

до

$$\frac{100 + 30}{100 - 30} \bar{Q} \approx 1,9 \bar{Q}.$$

Таким образом, «предсказательная сила» оценок прогнозных ресурсов при «перепрыгивании» через стадию, до проведения соответствующих работ, падает. Так, в первом примере на «своей» стадии $Q_{\max}/Q_{\min}=10$, а на следующей $Q_{\max}/Q_{\min}=9\bar{Q}/0,11\bar{Q}=82$. Во втором примере на «своей» стадии $Q_{\max}/Q_{\min}=2$, на следующей $Q_{\max}/Q_{\min}=1,9 \bar{Q}/0,6\bar{Q}\approx 3$.

При увеличении достоверности оценок это различие, как видим, резко уменьшается. Так, при достоверности 20 % оно составляет 10 и 82, а при достоверности 70 % — уже лишь 2 и 3. Это различие по мере детализации в принципе должно стремиться к нулю, достигая минимума между эксплуатационной разведкой и добычей (здесь играют роль потери другого типа — разубоживание руды при добыче, оставление целиков и другие «технические» причины).

ОБЕСПЕЧЕННОСТЬ РЕЗУЛЬТАТАМИ ПРЯМЫХ ЗАМЕРОВ ПАРАМЕТРОВ РУДОНОСНЫХ ОБЪЕКТОВ КАК ГАРАНТИЯ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ПОДСЧЕТА РЕСУРСОВ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Согласно методологии познания, принятой в материалистической философии, «определение понятий в терминах измеряемых величин является обязательным требованием ко всем наукам независимо от того, что выступает предметом их изучения» [Пугач Б. Я., 1986 г., с. 59]. Таким образом, количественное прогнозирование как необходимый этап развития минеральной геологии наиболее точно отвечает этому требованию, однако современный уровень достоверности оценки прогнозных ресурсов нуждается в дальнейшем совершенствовании. Одно из важнейших условий для повышения надежности и сопоставимости получаемых результатов — обеспечение качества измерений исходных для расчетов параметров. При оценке ресурсов по методу аналогии наибольшие трудности возникают при определении степени геологического подобия сравниваемых территорий. Если геометрические параметры и параметры рудоносности изме-

ряются прямым путем, то для получения коэффициента подобия K довольно часто пользуются косвенными данными. Однако эти показатели, а также мнения экспертов относятся в строгом смысле этого слова не к результатам измерений, а являются следствием различного рода полуколичественного, номинального, логического оценивания (например, в баллах, по степени перспективности и т. д.).

Как известно, лишь метрология имеет дело с измерениями преимущественно физических величин. Эти измерения занимают особое положение среди различных видов количественного оценивания. Их отличительная особенность — высокая познавательная ценность, заключающаяся в установлении однозначного соответствия между измеряемыми физическими величинами и их числовыми выражениями [Селиванов М. Н., Фридман А. Э., Кудряшова Ж. Ф., 1987 г.]. Малая познавательная значимость физических, а особенно нефизических параметров приводит в итоге к снижению достоверности оценки. Зависимость между физическими величинами можно выразить уравнениями и привлечь таким образом к познанию природы всю мощь математического анализа, как отмечал советский метролог М. Ф. Маликов [1949 г.].

К сожалению, коэффициент геологического подобия в формуле количественного прогнозирования пока не получают в результате метрологических операций. В этом кроется первопричина резкой тенденции к снижению достоверности и сопоставимости количественных выражений прогнозных ресурсов полезных ископаемых по сравнению с категориями запасов. Например, при использовании косвенных данных считаются вполне допустимыми ошибки в определении P_3 , превышающие 95 % истинных значений. Многие, если не все, результаты экспертных оценок вообще не поддаются математическому анализу. Подсчитанные количества ресурсов в этих случаях не обладают свойством сопоставимости (обеспечиваемости сравнимости), что ставит под сомнение рациональность определения ресурсов, ибо появляется неуверенность в том, что даже при значительных различиях одни числовые показатели действительно больше других, а не наоборот.

Возникает острая необходимость поиска таких вариантов коэффициента геологического подобия, которые, как и физические величины, можно было бы использовать в математических уравнениях, связывающих воедино количественную оценку оруденения и интенсивность проявления каких-либо геологических особенностей прогнозируемых территорий. Такой вывод обосновывается тем, что коэффициент геологического подобия имеет некоторые признаки, которые отдаленно напоминают признаки физических величин. Действительно, «в настоящее время в рамках законодательной метрологии физическая величина определяется как свойство материального объекта (процесса, явле-

ния и т. д.), качественно общее множеству объектов, но количественно индивидуальное для каждого из них» [Селиванов М. Н. и др., 1987 г., с. 25]. Коэффициент K выражает свойство сопоставимости материальных объектов (прогнозируемой и эталонной территорий) по комплексу качественно общих геологических признаков. Однако здесь четко отмечается размытость указанных качественно общих, но количественно индивидуальных свойств из-за множества отдельных составляющих этот комплекс признаков. Такая размытость и некоторая неопределенность предмета измерения (вернее, оценивания) обусловлена в основном непредсказуемостью взаимного влияния каждой пары или иного сочетания из этого множества признаков на конечный результат прогноза. Поэтому в отличие от физической величины, которую можно измерить, лишь выделив из числа других, коэффициент геологического подобия может быть оценен только с помощью суммы каких-то, разумеется, внесистемных единиц, характеризующих какую-либо геологическую особенность площади. При этом очевидно, что чем меньше будет использовано входящих в этот комплекс отдельных признаков, тем больше коэффициент K будет напоминать физическую величину и тем надежнее будет его вероятность соответствия числового выражения практической значимости.

Итак, подчеркнем, что мерой уподобления прогнозируемой территории эталонной площади должна быть степень сходства или различия таких элементов геологического строения, интенсивность проявления которых обнаруживает необходимо повторяющуюся связь с количеством оруденения. Метод обнаружения таких связей — корреляционный анализ. Методология выделения геологических признаков перспективности на полезные ископаемые отрабатывались на примере месторождений мусковитоносных пегматитов. Первоочередной задачей ставилась количественная оценка уже известной зависимости геологический признак — оруденение, так как на основе этого можно было классифицировать вновь выявленные связи по степени их практической значимости.

Обычно различают три меры изучаемых признаков: в систему номинальной (назывной, классификационной) шкалы входят признаки, критерием оценки которых служит фиксация их наличия или отсутствия, соответственно кодируемые для статистической обработки 1 («да») или 0 («нет»); в системе порядковой (ранговой) шкалы признаки характеризуются относительной (полуколичественной, балльной и т. д.) оценкой; количественная (метрическая) шкала подразделяется на два вида: интервальную и пропорциональную, где признаки получают прямую количественную оценку.

По силе связей или степени удаленности-близости к функциональной зависимости итог корреляционного анализа интерпретировался нами условно, как

— закон, когда точки прямых замеров при вынесении на двойную диаграмму выстраиваются в прямую линию или группируются в очень узкое вытянутое поле, а коэффициент парной корреляции определяется величиной выше 0,85;

— пропорциональная стохастическая закономерность, при которой корреляционная решетка значений признаков на двойной диаграмме в отличие от предыдущего результата выглядит как широкое вытянутое поле (мера взаимной согласованности изменения пары признаков фиксируется соответствующими значениями коэффициента корреляции от 0,85 до 0,25);

— статистическая ассоциация, показывающая меру согласованности положительной или отрицательной частоты встречаемости какого-либо признака в зависимости от наличия или отсутствия другого (в эту группу попадают все результаты задач с номинальными и порядковыми признаками).

В настоящее время имеется возможность обрабатывать региональный материал с широким охватом геологических признаков, измеряемых лишь по номинальной шкале. Результаты подсчета задач с такой мерой признаков интерпретируются в форме излишне общих выводов о наличии вероятностных слабых тенденций и недостаточно конкретных связей.

На формировании слюдоносных пегматитов заметно сказывается влияние литолого-петрографических факторов рудоносности, поэтому на начальном этапе применения корреляционного анализа комплекса номинальных признаков в обязательном порядке использовались исходные выборки в системах пегматит — вмещающая порода и месторождение — окружающая среда, т. е. именно те признаки, с помощью которых можно было бы выявить силу связи между наличием полезного ископаемого и самых разнообразных геологических особенностей окружающих пород.

Материалом для статистической обработки в системе пегматитовая жила — вмещающая порода послужили данные по месторождениям Кольского полуострова (958 жил) и Карелии (564 жилы). Таким образом, указанными количествами обеспечивалась достоверность коэффициентов корреляции при низких их величинах от 0,07 до 0,09 (значимо отличающихся от 0 при уровне 0,95).

В шкале номинальных геологических признаков регистрировались особенности, характеризующие минеральный состав жил, наличие петрографических разновидностей вмещающих пород, элементы залегания пегматитов и вмещающих их пород, мощность и форма жильных тел, отмечалось преобладание или слабое развитие в жилах структурно-текстурных разновидностей пород, наличие зональности, фиксировались качество мусковита, типы дефектов полезного ископаемого, цвет, результаты опробования и т. д.

В качестве примера можно привести часть конкретных данных (в разных задачах количество учитываемых признаков варьировалось от 67 до 81), отражающих геолого-экономические особенности полезного ископаемого и состав вмещающих пород: содержание мусковита в пробе; жила залегает в продуктивной породе, индифферентной к слюдообразованию породе; в жиле развит мусковит кварц-мусковитового комплекса, пегматоидный, трещинный, чешуйчатый; в жиле фиксируется второстепенная минерализация берилла, турмалина, граната, апатита; цвет мусковита яблочно-зеленый, зеленый, бурый, красновато-бурый; в мусковите отмечается наличие волнистости, ленточности, клиновидности и ельчатости, пятнистости; номерной состав мусковита; жила керамическая; жила зональная и т. д.

В результате решения этих задач были получены коэффициенты корреляции, подтвердившие наличие уже известных взаимосвязей различных геологических объектов и дополнившие их характеристикой силы связи. Открыты также ранее неизвестные отношения, зафиксированные как новые знания. Однако для наших нужд здесь представляют интерес данные об отчетливой приуроченности размещения слюдоносных жил, в частности, к различным плагиогнейсам. Количественно эти особенности характеризуются следующими связями. Для Карелии наиболее высокое содержание мусковита (по данным опробования) чаще всего встречается в пегматитах, залегающих в различных гранато-биотитовых, кианито-гранато-биотитовых продуктивных безмикроклиновых породах ($r = +0,21$). На Кольском полуострове слюдоносные пегматиты имеют положительную корреляционную связь с вмещающими их плагиогнейсами ($r = +0,32$).

Другая группа задач относилась к системе месторождения — окружающая среда. Количество использованных для получения информации месторождений в каждой задаче варьировалось от 81 до 173. Соответственно была гарантирована достоверность коэффициента корреляции при значениях от 0,15 до 0,22 (так же, как и в предыдущих задачах, значимо отличающихся от 0 при уровне 0,95, т. е. с учетом допустимой ошибки 5 %). В качестве признаков здесь учитывались состав вмещающих пород, геологическая структура, особенности минерального состава, строения и промышленной значимости пегматитовых жил каждого месторождения или отдельного участка. Например, в шкале геологических признаков фиксировалось наличие или отсутствие главнейших вмещающих пород (перечислялись разновидности), второстепенных вмещающих пород, определенной геологической структуры (синклинали, антиклинали, моноклинали), а также отмечалось количество жил (в процентном отношении от общего количества пегматитовых тел, т. е. в шкале уже количественной оценки) слюдоносных, керамических, промышленных, комплексных, бесплодных,

кварц-плагиомикроклиновых, кварц-плагиоклазовых по составу, с преобладанием апографических или иных структур, зональных и т. д.

Как и в предыдущих задачах, при геологической интерпретации полученных математических результатов здесь среди прочих явно напрашивается вывод о ведущем литолого-петрографическом контроле размещения полезного ископаемого: количество слюдоносных и промышленно-слюдоносных жил на месторождениях возрастает, если среди вмещающих пород преобладают продуктивные биотитовые, гранато-биотитовые, кианит-содержащие плагиогнейсы. Эти связи подтверждаются коэффициентами корреляции от $+0,21$ до $+0,41$. Все другие связи между наличием полезного ископаемого (или слюдоносного пегматита), с одной стороны, и самыми разнообразными геологическими признаками, с другой, незначимы. Подобная интерпретация полученных конкретных показателей силы связей и статистических ассоциаций признаков может служить обоснованной предпосылкой для постановки тематических работ по определению этих же связей между полезным ископаемым и вмещающими их породами, но уже в количественной (метрической) шкале оценки исходных данных. Такая работа была проделана на ряде разведанных месторождений мусковита с привлечением документации керн буровых скважин. Эти месторождения в дальнейшем были использованы в качестве эталонов при оценке перспективности метаморфических комплексов на слюду и подсчете прогнозных ресурсов методом аналогии (геологического подобия).

Исходные параметры имели способы выражения либо в штуках (жил, прослоев непродуктивных пород), либо в виде суммарной мощности, либо в процентах от общей мощности разреза пород, либо в процентах от общего количества жильных тел.

На месторождениях обычно получает развитие не только какая-либо одна или совокупность разновидностей продуктивных пород, но и какая-то доля непродуктивных пород (амфиболсодержащих гнейсов, амфиболитов, микроклинсодержащих биотитовых гнейсов, лейкократовых гранито-гнейсов и аплитовидных пород). В разных участках месторождений количество непродуктивных пород варьирует от 1 до 80 % (в среднем 21 %). Если в номинальной шкале оценок связь литолого-петрографических признаков с оруденением характеризуется величинами коэффициентов корреляции от 0,21 до 0,41, то в метрической шкале оценок эти же связи проявляются более отчетливо и выражаются коэффициентами от 0,33 до 0,78 [2,49].

Закономерности литологического контроля пегматитов Беломорья были использованы нами для расчета коэффициента геологического подобия эталонной и прогнозируемой площадей. За основу расчетов взята отрицательная корреляционная ре-

Таблица 8

Сравнительная взаимосвязь количества слюдоносных жил и суммарных интервалов непродуктивных пород в колонке буровых скважин

Непродуктивные породы		Слюдоносные пегматиты	
% от общей мощности	отношение к минимальному	% от общего количества пегматитов	отношение к минимальному
Макс. 35	5	Мин. 16	1
Ср. 21	3	Ср. 48	3
Мин. 7	1	Макс. 80	5

сетка с координатами $x-y$, где x — количество слюдоносных жил (в % от общего их числа), y — содержание (в % непродуктивных пород в продуктивной толще). При этом аппроксимированная линия регрессии выражается уравнением $y=42,5-0,45x$ [3].

В табл. 8 показан порядок изменения содержания слюдоносных пегматитов в зависимости от максимального и минимального количества непродуктивных пород в разрезе различных участков эталонного месторождения. Если взять за основу минимальное содержание, то отношение непродуктивных пород к среднему и максимальному их содержанию будет 1:3:5, а отношение количества слюдоносных пегматитов соответственно будет изменяться в обратном порядке (5:3:1). Если принять за «геологический стандарт» среднее содержание 21 % «примеси» непродуктивных пород, при котором коэффициент геологического подобия $K=1$, то минимальное содержание в 7 % будет соответствовать коэффициенту 1,7, а максимальное в 35 % — коэффициенту 0,3.

Используя имеющиеся данные, можно рассчитать уравнение регрессии, связывающее воедино значения коэффициента геологического подобия K и количество непродуктивных пород y в составе продуктивной толщи месторождения:

K 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0; 1,1; 1,2; 1,3; 1,4; 1,5; 1,6; 1,7
 y , % 35; 33; 31; 29; 27; 25; 23; 21; 19; 17; 15; 13; 11; 9; 7

$(K=2,05-0,05y)$.

Таким образом, все три основных параметра обобщенной формулы метода геологических аналогий могут быть получены на основе результатов прямых измерений. Различные коэффициенты, опирающиеся на косвенные данные, которые отрицательно сказываются на надежности количественного прогнозирования, исключаются из расчетной формулы этого метода.

Работы, проведенные по предлагаемой здесь методике, обеспечивают в конечном итоге выход таких значений прогнозных ресурсов, которые обладают сопоставимостью, ибо каждый из исходных параметров получают при соблюдении единообразия измерений (оценивания). Сопоставимость — обеспечивае-

мость сравнимости (уподобляемости) объектов по интенсивности проявления наиболее существенных признаков (особенностей, свойств) в таких пределах, чтобы разность значений полученных показателей служила надежной мерой сходства или различия этих объектов. Любой показатель, не обладающий свойством сопоставимости, не несет полезной информации. Лишь при наличии свойства обеспечиваемости сравнимости категории запасов и ресурсов можно расположить в виде следующего ряда по наивысшим (в пределах доверительных интервалов) величинам погрешностей их подсчетов: $A=20$, $B=40$, $C_1=60$, $C_2=80$, $P_1=90$, $P_2=95$, P_3 — свыше 95 % (обобщенные данные по работам В. М. Крейтера, 1940 г., 1961 г.; Е. О. Погребницкого и В. И. Тернового, 1974 г.; Г. Б. Феттвайса, 1979 г. и др.). Такая градация количественных категорий полезных ископаемых не имеет отношения к параметрам, полученным путем экспертных оценок. Последние как категории субъективные не поддаются математическому анализу и не обладают свойством сопоставимости. В качестве примера можно рассмотреть ситуацию, когда в формулу метода аналогии предлагается ввести «коэффициент надежности прогноза, равный 0,5 или 0,7 в зависимости от представлений о степени достоверности отдельных параметров подсчета» [36, с. 430]. Подобные коэффициенты — типичный образец волевых решений.

Итак, с помощью корреляционного анализа обрабатываются массивы самых разнообразных геологических признаков в номинальной шкале их оценки для выявления связей и статистических ассоциаций в системе наличие полезного ископаемого — геолого-минералогическая особенность площади.

Статистические ассоциации с количественной характеристикой значимых корреляционных связей $r=0,20$ и выше служат обоснованной предпосылкой для проведения работ по определению вероятностной связи между интенсивностью проявления геологического признака и количеством полезного ископаемого в метрической шкале оценки исходных данных.

Результаты количественных измерений (оценивания) выносятся на двойную диаграмму. Если при $r=0,30$ и выше точки замеров образуют вытянутое поле, то рассчитывается линия регрессии или приближенно проводится средняя линия поля, а также определяются уравнения регрессии, связывающие воедино параметры геологических признаков и коэффициент геологического подобия эталонному месторождению (стандарту).

ПОГРЕШНОСТЬ КОНКРЕТНЫХ ВИДОВ ОЦЕНКИ ПРОГНОЗНЫХ РЕСУРСОВ

Ниже мы остановимся на максимальных погрешностях конкретных функций, применяемых при оценке прогнозных ресурсов

Таблица 9

Относительные погрешности (%) суммарных ресурсов рангового ряда

Относительная погрешность запасов наибольшего месторождения, %	Запасы наибольшего месторождения в единицах запасов наименьшего		
	1 000	10 000	100 000
10	11,45	11,09	10,88
20	22,90	22,17	21,73
40	45,80	44,34	43,47
60	68,70	66,51	65,21
80	91,59	88,68	86,95
100	114,49	110,86	108,69

металлических полезных ископаемых. В первую очередь анализируем наиболее применяемые функции метода рангового ряда. Так, суммарные запасы ряда определяются по соотношению $Q = q_{\max} \ln q_{\max}/q_0$, где q_{\max} — запасы наибольшего месторождения ряда, q_0 — запасы наименьшего еще интересующего промышленность месторождения. Если первые выразить в единицах вторых $q^* = q_{\max}/q_0$, то суммарные запасы ряда в этих же единицах будут равны

$$Q^* = q^* \ln q^*.$$

Наибольшая возможная погрешность будет равна

$$\varepsilon_Q = |Q^*| \varepsilon_{q^*},$$

или

$$\varepsilon_Q = |1 + \ln q^*| \varepsilon_q = \varepsilon_q + \varepsilon_q \ln q^*.$$

Пример. Наибольшее месторождение ряда имеет запасы 100 000 т металла, наименьшее промышленное — 100 т. Общие ресурсы ряда равны $Q^* = 1000 \ln 1000 = 6900$ единиц q_0 . Максимальная погрешность при определении запасов наибольшего месторождения оценивается в 25 % запасов, т. е. $\varepsilon_q = 250$. Отсюда абсолютная погрешность $\Sigma Q^* = 250 + 250 \ln 1000 = 1976,94$, относительная — 28,65 %. $Q^* = 6900 \mp 1976,94$.

В табл. 9 показаны относительные погрешности суммарных ресурсов ряда в зависимости от относительных погрешностей наибольшего месторождения (погрешность ресурсов ряда в целом близка к погрешности запасов наибольшего месторождения).

Если суммарные ресурсы ряда

$$Q = q_{\max} \ln N,$$

где N — общее количество месторождений ряда, то погрешность

$$\varepsilon_Q = \varepsilon_{q_{\max}} \ln N + \frac{\varepsilon_N q_{\max}}{N}.$$

Пример. Для рангового ряда определено, что запасы наибольшего месторождения $q_{\max} = 1000 \mp 250$, а общее количество месторождений $N = 40$, причем оно примерно в 2,5 раза ниже вероятного числа месторождений в регионе. Абсолютная погрешность оценки общих ресурсов $\varepsilon = 2422$, относительная — 65,66 %. Таким образом, $Q = 3689 \mp 2422$.

Определяя запасы «пропущенных» месторождений ряда, пользуются соотношением $q = \text{const}/n$, где const — наибольшая постоянная qn эмпирического ряда. Тогда абсолютная погрешность определения запасов конкретного «пропущенного» месторождения будет

$$\varepsilon_q = \frac{\varepsilon_{\text{const}}}{n} + \frac{\text{const}}{n^2} \varepsilon_n.$$

Пример. В предыдущем ранговом ряду месторождений определено, что наибольшая постоянная ряда $qn = 2700$, причем ее возможная погрешность примерно равна 25 %. Отсюда абсолютная погрешность определения любого «пропущенного» месторождения ряда $\varepsilon = 118,12$.

Для седьмого объекта запасы равны 386 ед. $\mp 118,12$, а относительная погрешность их определения 30 %. При этом по мере уменьшения оценки запасов ошибка определения будет возрастать.

Суммарные запасы металла в регионе определяются и по эмпирической формуле

$$\ln Q = \alpha \ln q_{\max} + \beta,$$

где α и β — коэффициенты пропорциональности. Ее абсолютная погрешность выводится, если считать $\ln Q$ функцией трех переменных, входящих в правую часть:

$$\varepsilon_{\ln Q} = \frac{\alpha}{q_{\max}} \varepsilon_{q_{\max}} + \ln q_{\max} \varepsilon_{\alpha} + \varepsilon_{\beta}.$$

Пример. Если $\alpha = 0,9$; $\beta = 1,9$; $q_{\max} = 100000$, относительные ошибки α и β не превышают 30 %, а запасов q_{\max} наибольшего объекта — 50 %, то абсолютная погрешность определения запасов металла в регионе $\varepsilon_{\ln Q} = 4,13$. Следовательно — $\ln Q = 12,26 \mp \pm 4,13$; $3400 \leq Q \leq 13,125$ млн; $Q =$ от 211,082 тыс. т до 13,125 млн. т.

При оценке прогнозных ресурсов методом геолого-экономической экстраполяции применяется формула

$$Q = \frac{V}{a} e^{ah},$$

где $V = dQ/dh$ — скорость прироста запасов на погонный метр суммарной длины скважин, a — показатель экспоненты, h — длина скважин при полной разведке объекта.

Наибольшая абсолютная погрешность оценки прогнозных ресурсов рассчитывается как для функции нескольких переменных:

$$\varepsilon_Q = - \left| \frac{\varepsilon_V}{a e^{ah}} \right| + e^{-ah} (1 - ah) \varepsilon_a - V e^{-ah} \varepsilon_h.$$

По данным [15] показатели $V=0,1337$; $a=1,15 \cdot 10^{-6}$; $h=7,91 \cdot 10^5$, а погрешности примерно равны: $\varepsilon_V=0,3$, $\varepsilon_a=0,1$; $\varepsilon_h=100$. Абсолютная погрешность результирующей оценки $\varepsilon_Q=138950$; $Q=110000 \mp 138950$; относительная $\lambda=126,32 \%$.

В тех случаях, когда для расчетов прогнозных ресурсов при изменении кондиций применяется уравнение Ласки $\ln q = a - bc_{\min}$, где a и b — коэффициенты пропорциональности, c_{\min} — минимальное бортовое содержание продуктивного металла, то абсолютная погрешность

$$\varepsilon_{\ln q} = \varepsilon_a + b \varepsilon_{c_{\min}} + c_{\min} \varepsilon_b.$$

Пример. Для одного из золоторудных участков установлено, что зависимость массы металла от минимального промышленного содержания имеет вид $\ln q = -1,1 c_{\min}$, причем можно полагать, что $\varepsilon_a=3,5$; $\varepsilon_b=0,25$; $\varepsilon_c=0,4$. Тогда $\varepsilon_{\ln q}=4,69$. Учитывая, что $\ln q=9,23$, получим, что относительная погрешность $\lambda_{\ln q}=50,81 \%$.

Если оценивается увеличение ресурсов месторождения при уменьшении порогового содержания, то по соотношению находим, что при $\Delta c_{\min}=1$, а $\varepsilon_{\ln q/q_0} = \varepsilon_b \Delta c_{\min}$ или $\ln q/q_0=1,1$ ($c_{\min} - c_0$) = $1,1 \cdot 2 = 2,2 \mp 0,5$

$$q/q_0 = 1,268 \mp 0,60.$$

Если расчеты прогнозных ресурсов ведутся одним из вариантов объемного метода, то погрешность измерений также находится как погрешность функции нескольких аргументов. Например, если прогнозные ресурсы рудоносного района $Q = Vdqk$, где V — объем рудовмещающих пород, d — удельный их вес, q — удельная рудоносность, k — коэффициент аналогии, то абсолютная погрешность оценки прогнозных ресурсов

$$\varepsilon_Q = dqk \varepsilon_V + Vqk \varepsilon_d + Vdk \varepsilon_q + Vdq \varepsilon_k,$$

где ε_V , ε_d , ε_q , ε_k — абсолютные погрешности V , d , q и k соответственно. Относительная погрешность

$$\lambda_Q = \lambda_V + \lambda_d + \lambda_q + \lambda_k = \sum_{i=1}^4 \lambda_i.$$

Пример. По геологическим данным объем рудовмещающих пород до глубины 1 км равен $V=25 \times 10 \times 1 \text{ км}^3 = 250 \text{ км}^3$, удельный вес $d=2,6 \text{ т/м}^3$; удельная рудоносность $q=1 \text{ г/м}^3$; коэффициент подобия $k=0,3$. Абсолютная погрешность этих величин $\varepsilon_V=50 \text{ км}^3$; $\varepsilon_d=0,2 \text{ т/м}^3$; $\varepsilon_q=0,5 \text{ т/м}^3$; $\varepsilon_k=0,25$. Отсюда

$$\varepsilon_Q = 3,9 \cdot 10^{10} + 1,5 \cdot 10^{10} + 9,75 \cdot 10^{10} + 1,625 \cdot 10^{11} = 3,14 \cdot 10^{11}, \quad Q = 1,95 \cdot 10^{11} \text{ кг/м}^3 = 195 \text{ кг/км}^3. \text{ Относительная ошибка } \lambda = 3,14/1,95 = 1,61 = 161 \%.$$

Наконец, определяя число n атомов химического элемента, концентрирующегося при его миграции, мы использовали следующие формулы:

$$n = \eta m; \quad n' = k \frac{a}{Z} m,$$

где η — степень концентрации, m — общая масса элемента, участвующая в миграции, a — его атомный вес, Z — валентность, k — коэффициент концентрации. Абсолютные погрешности будут соответственно равны

$$\varepsilon_n = m \eta + \eta \varepsilon_m; \quad \varepsilon'_n = \frac{am}{Z} \varepsilon_k + \frac{km}{Z} \varepsilon_a + \frac{ka}{Z} \varepsilon_m + \frac{kam}{Z^2} \varepsilon_Z,$$

где ε_n , ε_m , ε_k , ε_a , ε_Z — абсолютные погрешности определения степени концентрации, всей массы мигрирующего элемента, коэффициента пропорциональности, атомного веса и валентности соответственно. Здесь следует отметить, что при миграции химического элемента в различных условиях может иметь значение усредненная валентность, оценка которой также может иметь погрешность. Атомный же вес имеет весьма незначительную погрешность, связанную с изменением его изотопного состава. Если ею пренебречь, то

$$\varepsilon_n = \frac{am}{Z} \varepsilon_k + \frac{ka}{Z} \varepsilon_m + \frac{kam}{Z^2} \varepsilon_Z.$$

Относительные погрешности будут равны соответственно:

$$\lambda_n = \frac{\varepsilon_\eta}{\eta} + \frac{\varepsilon_m}{m} = \lambda_\eta + \lambda_m;$$

$$\lambda'_n = \frac{\varepsilon_k}{k} + \frac{\varepsilon_a}{a} + \frac{\varepsilon_m}{m} + \frac{\varepsilon_Z}{Z} = \lambda_k + \lambda_a + \lambda_m + \lambda_Z.$$

Таким образом, относительная погрешность результата равна сумме относительных погрешностей исходных величин.

Пример. Относительные погрешности оценок степени концентрации и общего количества мигрирующего металла весьма велики. Даже принимая их равными 50%, что для степени концентрации скорее всего мало, получим относительную погрешность при оценке концентрирующегося металла $\lambda_n=100 \%$. То же видно и из формулы λ'_n , где относительные погрешности коэффициента пропорциональности, вычисляемого эмпирически, весьма велики (500% для него не будет большим преувеличением). Отсюда $\lambda'_n=550 \%$ даже при абсолютной точности определения атомного веса и валентности.

Ранее [10] между логарифмами запасов Q и логарифмом кларка металла была установлена следующая эмпирическая связь:

$$\ln Q = 0,564 \ln c_0 + 23,55.$$

Погрешность результата

$$\varepsilon_{\ln Q} = \frac{0,564}{c_0} \varepsilon_{c_0}.$$

где ε_{c_0} — ошибка в определении кларка,

$$\lambda_{\ln Q} = 0,564 \lambda_{c_0}.$$

Аналогичным образом для уравнения (см. там же)

$$\ln q_{\max} = 0,84 \ln c_0 + 24,84,$$

абсолютная и относительная погрешности будут равны

$$\varepsilon_{\ln q} = \frac{0,84}{c_0} \varepsilon_{c_0}; \lambda = 0,84 \lambda_{c_0}.$$

Погрешность оценки массы концентрирующегося вещества, если его содержание распределено в соответствии с показательной функцией

$$n = c^{-bx} (1 + bx_0) m,$$

где m — общая масса мигрирующего вещества, x_0 — граница надфоновое содержание, b — коэффициент показательной функции, обратной математическому ожиданию, будет равна

$$\varepsilon_n = e^{-bx_0} (1 - x_0^2) \varepsilon_b + e^{bx_0} (1 + bx_0) \varepsilon_m.$$

В данном случае ε_b и ε_m — погрешности определения соответствующих величин.

КОНТРОЛЬ ОЦЕНОК СПЕЦИАЛЬНЫМИ МЕТОДАМИ

Относительно высокий уровень погрешностей при количественных оценках прогнозных ресурсов требует организации системы контроля оценок прогнозных ресурсов, которая должна основываться на принципах прежде всего объективности, комплексности, надежности и эффективности. Последняя может достигаться за счет улучшения качества оценок прогнозных ресурсов, уменьшения времени, затрачиваемого на получение оценок, снижения объема необходимых трудовых затрат и стоимости. При имеющемся сейчас наборе методов оценки эффективный контроль возможен и необходим на всех уровнях подготовки и апробации оценок ресурсов категорий P_1 — P_3 . Сам контроль должен быть независим, действителен, активен, обеспечивать максимально возможное качество прогнозирования.

Но приступая к разработке и внедрению принципов и методов контроля, следует обратить внимание на то, что сравнение оценок прогнозных ресурсов, полученных разными методами, в связи с их особенностями, не так просто. Оценки прежде всего должны быть сравнимы по смыслу, а прогнозируемые ресурсы — по своему виду, минеральному составу, потребительским свойствам, качеству руды и т. п. Общеизвестно, например, что объем руды зависит от граничных условий, при которых они подсчитывались (бортового и среднего содержания продуктивного компонента, а также полезных и вредных элементов-примесей; от величины безрудных интервалов, включающихся в подсчет; от минимальной величины запасов рудного тела или месторождения, еще интересующего промышленность; от экономических условий и уровня освоения района, от близости горнодобывающих предприятий и их обеспеченности запасами и т. д.) и которые при ряде методов оценки (например, при методе аналогии или рангового ряда) находятся за пределами внимания прогнозиста.

Особенно важно, как это было показано выше, что оценки не строго детерминистические, они включают неопределенность, которая не всегда полностью учтена при расчете погрешностей оценок. В связи с этим оценки имеют вероятностный характер, обусловленный как погрешностью методов, которыми они получены, так и погрешностью исходных геологических данных, которая пока изучена мало. Имеющиеся случаи проверки оценок прогнозных ресурсов практикой показывают, что эти оценки значительно и в обе стороны отклоняются от действительности. Например [40], ресурсы газа в Западной Сибири в 1971 г. оказались в 2 раза больше, чем их оценки, сделанные в 1966 г. Ресурсы нефти в Башкирии, наоборот, оказались на 44 % ниже, чем их оценки по результатам прогноза.

Можно сформулировать три основных подхода к контролю оценок:

- контроль в рамках самих методов (метода) оценки за счет проверки правильности исходных данных;
- проверка за счет оценки ресурсов другими, не использованными при первоначальных расчетах методами;
- контроль косвенными путями, например, сопоставлением полученных зависимостей между исходными характеристиками и прогнозными ресурсами и подобных зависимостей для известных запасов.

Контроль оценок прогнозных ресурсов должен быть организован и на уровне их первоначального расчета, и на уровне их апробации. На уровне первоначального расчета целесообразно провести проверку всех получаемых оценок хотя бы тремя-четырьмя независимыми способами, тогда как на уровне апробации необходимо провести только выборочный контроль, но ему должна подвергаться как величина оценки, так и ее погреш-

ность для каждого метода и всего комплекса методов. Во всех случаях контроль должен оказывать влияние на качество исходных оценок, быть активным. Следует предусмотреть усреднение оценок, сделанных в разных организациях и в разные интервалы времени, выявляя систематические ошибки и надежность методов. Все это возможно с помощью статистического подхода к контролю.

Для контроля оценок ресурсов по категории P_1 могут быть применены следующие методы (см. табл. 1): моделей распределения содержания; математической аналогии, включая статистические методы; моделей рангового ряда, а также геолого-экономической экстраполяции [15]. Для оценки и контроля ресурсов категории P_2 могут быть применены методы математической аналогии; зависимости ресурсов от сложности и разнообразия геологического строения; зависимости от кларка и химического потенциала металлов; модели рангового ряда с использованием эмпирической зависимости от запасов крупнейшего месторождения и модели «геологоразведочного фильтра» [16]. Для контроля категории P_3 могут применяться методы математической аналогии; зависимости ресурсов от сложности и разнообразия геологического строения; зависимости от кларка и химического потенциала; под вопросом один из вариантов рангового ряда — по массам металла в геохимических аномалиях.

В качестве примера приведем оценки прогнозных ресурсов в одном из регионов Советского Союза.

Один из путей контроля оценок прогнозных ресурсов категории P_1 заключается в сравнении статистических характеристик прогнозных ресурсов и запасов в рудах более надежных разведочных категорий (B_1 , C_1 и C_2). Например, на месторождении III по данным категории P_1 получен ряд уравнений регрессии для ресурсов y и среднего содержания x продуктивных металлов в рудных телах при разном минимальном бортовом содержании. В табл. 10 приведены эти уравнения для указанных параметров двух металлов при бортовом содержании 0,8; 1,2 и 1,5 усл. ед. (отмечено у основания символа). В разных геологических условиях — зоны окисления и двух нижележащих зон первичной сульфидной минерализации — связи несколько различаются между собой, что при последующем сравнении категорий P_1 и $C_1 + C_2$ позволяет лучше ориентироваться в их сходстве и различии. Так, сравнение соотношений запасы — среднее содержание для одного металла (I) показывает, что оценки ресурсов по P_1 относительно среднего содержания скорее всего занижены не менее, чем в 1,5 раза. Соотношения запасов и соотношения среднего содержания при разном бортовом содержании не выходят за пределы отмеченных для другого металла (II) на месторождении.

Таким образом, сравниваемые зависимости между параметрами рудных тел категорий P_1 и $C_1 + C_2$ мало различаются меж-

Таблица 10

Сравнение уравнений регрессии основных параметров рудных тел месторождения III

зона окисления	По данным категорий $C_1 + C_2$			По данным категории P_1
	зона от границы окисления до отметки +220 м	зона между отметками +220 и +160 м	зона между отметками +220 и +160 м	
$y_{I, 1.5} = 0,059 x_{I, 1.5} + 0,0415$ —	$y_{I, 1.5} = 0,109 x_{I, 1.5} - 0,214$ —	$y_{II, 1.5} = 0,322 x_{I, 1.5} - 0,058$ —	$y_{I, 1.2} = 0,0725 x_{I, 1.2} - 0,0785$ $y_{I, 0.8} = 0,1 x_{I, 0.8} - 0,0637$	
$x_{1.5} = 1,692 x_{I, 0.8} + 0,935$ — —	— $x_{II, 1.2} = 1,342 x_{II, 0.8} - 0,17$ $x_{II, 1.5} = 2,054 x_{II, 0.8} - 0,43$	$x_{I, 1.5} = 1,195 x_{I, 0.8} + 1,65$ — —	$x_{I, 1.2} = 1,176 x_{I, 0.8} + 0,694$ $x_{II, 1.2} = 1,29 x_{II, 0.8} + 0,318$ —	
$y_{II, 1.5} = 0,68 y_{II, 0.8} + 0,046$ —	$y_{II, 1.5} = 0,79 y_{II, 0.8} + 0,103$ $y_{II, 1.2} = 0,905 y_{II, 0.8} - 0,003$	— $y_{II, 1.5} = 0,488 y_{II, 0.8} + 0,114$ $y_{I, 1.2} = 0,609 y_{I, 0.8} + 0,038$ $y_{I, 1.5} = 0,879 y_{I, 0.8} + 0,028$	$y_{II, 1.2} = 0,822 y_{II, 0.8} - 0,029$ — $y_{I, 1.2} = 0,986 y_{I, 0.8} + 0,007$ —	
— —	$y_{I, 0.8} = 0,364 y_{II, 0.8} + 0,18$ $y_{I, 1.5} = 0,382 y_{II, 1.5} + 0,008$	$y_{I, 0.8} = 0,260 y_{II, 0.8} + 0,025$ $y_{I, 1.5} = 0,285 y_{II, 1.5} + 0,028$	$y_{I, 0.8} = 0,315 y_{II, 0.8} + 0,001$ —	

ду собой, т. е. оценки прогнозных ресурсов P_1 здесь относительно правдоподобны.

Наконец, серьезный подход к вопросу контроля может заключаться в объединении разных оценок для крупных металлогенических провинций и сравнение полученных величин с суммарной оценкой, сделанной по методу Маккелви—Овчинникова для провинции в целом, где, как известно, суммарные запасы должны быть пропорциональны кларку соответствующего металла при коэффициенте пропорциональности, в среднем равном 10^{10} — 10^{11} т.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ВЫЯВЛЕНИЕ ПОГРЕШНОСТИ ОЦЕНОК ПРОГНОЗНЫХ РЕСУРСОВ

Выше было показано, как погрешность конкретных методов оценки прогнозных ресурсов определяется с помощью погрешностей исходных данных. Но эти погрешности в геологии мало изучены, хотя можно полагать, что они весьма существенны, поэтому требуется разработка иных способов определения погрешностей. Пока просматриваются следующие направления выявления величины погрешности оценки прогнозных ресурсов: для конкретного ее вида, для конкретного ее метода и для совокупности методов.

Погрешность конкретного вида оценки прогнозных ресурсов выявляется с помощью нескольких различающихся значений исходных данных.

Приведем примеры.

Для одного из среднеазиатских месторождений получены статистические параметры распределения содержания продуктивного металла в рудах в предположении нормальности и логнормальности аппроксимирующей модели (табл. 11). С помощью этих данных, таблиц и номограмм, воспроизведенных у Давида [18], теоретически найдены запасы и их доли, имеющиеся в рудах с определенным интервалом содержания металла. Имея результаты разведки относительно балансовых и забалансовых запасов и зная доли запасов, которые должны приходиться на интервалы содержания, соответствующие балансовым и забалансовым рудам, можно по первым дать оценку вторых или по вторым первым. Меняя минимальное бортовое содержание и границы содержания между балансовыми и забалансовыми рудами, получим (табл. 12) несколько значений оценки общих балансовых руд при одном и том же бортовом содержании металла (в таблице 40 усл. ед.) с учетом вида модели распределения. Подобная работа, как видно из таблицы, проведена отдельно для окисленных, смешанных и сульфидных руд, а также руд категорий C_1 и C_2 . Поскольку сравниваются расчетные и разведанные оценки руд, то разница в равной степени возможна как

в балансовых, так и забалансовых рудах. Это значит, что исходя из величин забалансовых запасов можно получить как завышенные, так и заниженные оценки балансовых, что и видно по результатам табл. 11 и 12, где расчетные величины балансовых руд не достигают иногда их разведанных величин. Тем не менее, при расчете погрешностей эти оценки ресурсов также могут быть учтены.

В целом из табл. 11—12 следует, что результаты, полученные по логнормальной модели распределения, более оптимистичны, чем по нормальной, но и погрешность первых в среднем значительно выше (в 1—5 раз). Во всех случаях она не превышает 30 % общих оценок балансовых ресурсов, составляя 50—100 % от величины оценки прогнозных. Это значение и следует пока принять как примерную погрешность модификации метода в условиях описываемого месторождения.

Для другого среднеазиатского месторождения также найдены статистические параметры распределения содержания продуктивного металла в рудах на основе как нормальной, так и логнормальной модели распределения (табл. 13). С помощью этих параметров, а также соответствующих таблиц и номограмм [18] рассчитаны доли запасов, приходящиеся на определенный интервал содержания металла в рудах. По данным разведки о величинах балансовых и забалансовых руд, а также по расчетам долей запасов, соответствующих содержанию первых и вторых, находятся оценки прогнозных балансовых ресурсов (табл. 14). Эти оценки получены отдельно для трех рудных зон и всего месторождения в целом.

Из табл. 13 видно, что оценки прогнозных ресурсов по модели логнормального распределения обычно выше, чем нормального. Среди рудных зон наиболее перспективна зона II, но и погрешность оценок здесь наибольшая. В целом оценки по зонам имеют погрешность не более 50 % от величины прогнозных ресурсов; для месторождения в целом — не более 30 %.

С помощью этой же модификации метода получены оценки прогнозных ресурсов свинца и барита, а также погрешности оценок для одного из центрально-казахстанских полиметаллических месторождений. В табл. 15 даны статистические параметры распределения содержания свинца и барита в рудах месторождения в предположении, что распределение подчинено либо нормальной, либо логнормальной, либо модели Вейбулла. Проверка с помощью критерия χ^2 позволяет первые две модели иногда (если $\chi^2 < 5,99$), а последнюю всегда отклонить. В табл. 16 и 17 показаны расчеты доли запасов свинца и барита в рудах при содержании выше бортовых и в предположении нормальности или логнормальности распределения (здесь, как и выше, использованы соответствующие таблицы и номограммы из [18]).

В табл. 18 приведены количественные характеристики балансовых и забалансовых руд, полученные при разведке месторож-

Расчет долей запасов продуктивного металла, приходящихся на определенные интервалы его содержания в рудах месторождения 104

Параметры распределения содержания	Минимальное бортовое содержание	Интервал содержания	Расчет на основе нормальной модели			Расчет на основе логнормальной модели		
			нормированное бортовое содержание	доля (%) запасов в рудах при содержании выше бортового	доля (%) запасов, приходящихся на интервал содержания	отношение среднего содержания к бортовому	доля (%) запасов в рудах при содержании выше бортового	доля (%) запасов, приходящихся на интервал содержания
$m_0=100$	20	20—25	-0,747	77,3	1,5	5,0	99	0,5
$\sigma=107$	25	25—30	-0,701	75,8	1,6	4,0	98,5	2,5
$\sigma_{in}=1,067$	30	30—40	-0,654	74,2	3,2	3,3	96,0	3,0
	40	—	-0,561	71,0	—	2,5	93,0	—

Таблица 12

Расчет общих ресурсов продуктивного металла в рудах месторождения 104

Данные разведки руд				Прогнозная оценка общих балансовых запасов (>40) по данным разведки с учетом вида модели распределения				Среднее увеличение запасов (число раз) при модели распределения	
балансовых		забалансовых		нормального		логнормального		нормального	логнормального
борт-вое со-дер-жание	запасы, усл. ед.	интервал содержания	запасы, усл. ед.	усл. ед.	ув. в число раз	усл. ед.	ув. в число раз		
Окисленные руды									
20	602,5	20—25	14,8	700,5	1,29	2752,8	5,06	1,33±0,13	2,3±0,63
25	587,7	25—30	21,4	949,6	1,74	796,1	1,46		
30	566,3	30—40	22,19	492,3	0,90	687,9	1,26		
40	544,11	20—30	36,2	829,1	1,53	1122,2	2,06		
	—	20—40	58,39	658,05	1,21	905,0	1,66		

Смешанные руды

20	568,45	20—25	22,55	1067,4	2,13	4194,3	8,38	1,67±0,14	3,2±0,17
25	545,9	25—30	18,0	798,7	1,60	669,6	1,34		
30	527,9	30—40	27,4	607,9	1,21	849,4	1,70		
40	500,5	20—30	40,55	928,7	1,86	1257,0	2,51		
	—	20—40	67,95	765,8	1,53	1053,2	2,10		

Сульфидные руды

20	1100,2	20—25	3,6	170,4	0,16	669,2	0,64	0,58±0,13	0,79±0,04
25	1096,6	25—30	22,4	994,0	0,95	833,3	0,80		
30	1074,2	30—40	30,4	674,5	0,65	942,4	0,90		
40	1043,8	20—30	25,6	586,3	0,56	793,6	0,76		
	—	20—40	56,0	631,1	0,60	868,0	0,83		

Руды C₁

20	971	20—25	20	946,6	1,04	3720,0	4,08	0,71±0,11	1,52±0,58
25	951	25—30	14	621,3	0,68	520,8	0,57		
30	937	30—40	27	304,3	0,33	837,0	0,92		
40	910	20—30	34	778,7	0,85	1054,0	1,15		
	—	20—40	51	574,8	0,63	790,5	0,87		

Руды C₂

20	1100	20—25	10	473,3	0,45	1860	1,79	0,73±0,14	1,11±0,18
25	1090	25—30	30	1331,2	1,28	1116	1,07		
30	1060	30—40	20	458,1	0,44	620	0,60		
40	1040	20—30	40	916,1	0,81	1239	1,19		
	—	20—40	60	676,1	0,65	930	0,89		

Расчет долей запасов продуктивного металла, приходящихся на определенные интервалы его содержания в рудах месторождения II

Рудная зона и месторождение в целом	Параметры распределения содержания	Минимальное бортовое содержание	Расчет на основе нормальной модели				Расчет на основе логнормальной модели			
			нормированное бортовое содержание	доля (%) запасов в рудах при содержании выше бортовых	интервал содержания	доля (%) запасов, приходящихся на интервал содержания	отношения среднего содержания к бортовому	доля (%) запасов в рудах при содержании выше бортового	интервал содержания	доля (%) запасов, приходящихся на интервал содержания
I	$m_0^*=1,351$ $\sigma=1,136$ $\sigma_{in}=0,661$	0,5	-0,749	77,34	0,5-0,8	9,34	2,7	94	0,5-0,8	9,0
		0,8	-0,485	68,0	0,8-1,2	13,0	1,69	85	0,8-1,2	9,0
		1,2	-0,133	55,0	—	—	1,13	76	—	—
II	$m_0=2,161$ $\sigma=1,693$ $\sigma_{in}=0,889$	0,5	-0,891	81,0	0,5-0,8	2,19	4,32	97	0,5-0,8	3,0
		0,8	-0,803	78,81	0,8-1,2	7,81	2,70	94	0,8-1,2	8,0
		1,2	-0,567	71,0	—	—	1,80	86	—	—
III	$m_0=1,875$ $\sigma=1,455$ $\sigma_{in}=0,646$	0,5	-0,945	82,8	0,5-0,8	—	3,75	95	0,5-0,8	4,0
		0,8	-0,739	77,0	0,8-1,2	5,8	2,34	91	0,8-1,2	8,0
		1,2	-0,464	68,0	—	9,0	1,56	83	—	—
Месторождение в целом	$m_0=1,8$ $\sigma=1,4$ $\sigma_{in}=0,7$	0,5	-0,929	82,0	0,5-0,8	6,0	3,60	97	0,5-0,8	6,0
		0,8	-0,714	76,0	0,8-1,2	9,5	2,25	91	0,8-1,2	9,0
		1,2	-0,428	66,5	—	—	1,50	82	—	—

Расчет общих ресурсов продуктивного металла в рудах месторождения II

Рудная зона или месторождение в целом	Интервал содержания	Запасы, приходящиеся на интервал, по данным разведки, усл. ед.	Прогнозная оценка общих запасов при содержании по данным разведки и с учетом вида модели распределения				Среднее увеличение запасов (число раз) при модели распределения	
			нормального		логнормального		нормальной	логнормальной
			усл. ед.	ув. в число раз	усл. ед.	ув. в число раз		
I	0,5-0,8 0,8-1,2 >1,2	2,1	12,37	1,16	17,73	1,65	} 0,99±0,13	1,65
		2,1	8,88	0,83	17,73	1,65		
		10,7	10,34	0,97	17,73	1,65		
II	0,5-0,8 0,8-1,2 >1,2	5,6	181,55	11,94	56,3	3,70	} 6,77±2,16	4,39±0,52
		5,4	49,09	3,23	58,05	3,82		
		15,2	78,10	5,14	86,0	5,66		
III	0,5-0,8 0,8-1,2 >1,2	1,0	11,72	2,30	20,75	4,06	} 1,94±0,23	3,05±0,44
		1,1	8,31	1,63	11,41	2,24		
		5,1	9,64	1,89	14,53	2,85		
Месторождение в целом	0,5-0,8 0,8-1,2 >1,2	8,7	96,42	3,11	118,9	3,84	} 2,54±0,5	3,14±0,31
		8,6	60,20	1,94	78,36	2,53		
		31,0	79,40	2,56	94,57	3,05		

Параметры распределения содержания свинца и барита (вес. %) в рудах и околорудных породах месторождения XIV

Металл или минерал	Число измерений	Средняя величина	Стандарт	Коэффициент вариации	Асимметрия	Экссесс	Ошибка асимметрии	Ошибка эксцесса	Интервал колебаний		Вид распределения	Параметры распределения		Оценки		Критерий χ^2	Степень свободы	
									min	max		M(α)	S(β)	математического ожидания	дисперсии			
Свинец	29	5,844	4,420	0,756	1,463	2,082	0,821	0,829	0,80	20,25	Н	5,844	4,42	5,844	19,54	3,69	2	
												Л	1,502	7,627	6,004	28,45	1,04	2
												В	11,758	1,332	5,844	19,54	39,59	2
Свинец	120	2,898	3,907	1,348	2,630	8,291	0,357	0,572	0,10	24,68	Н	2,898	3,908	2,898	15,27	28,44	2	
												Л	0,426	1,116	2,853	20,12	1,63	2
												В	1,958	0,753	2,898	15,27	204,8	2
Барит	89	31,18	30,54	0,979	0,748	-0,996	3,238	1,622	0,08	90,24	Н	31,18	30,54	31,18	932,87	16,09	2	
												Л	2,65	1,59	50,49	296,74	10,98	2
												В	34,11	1,02	31,18	932,87	119,1	2

Таблица 16

Расчет доли запасов свинца и барита в рудах месторождения XIV при содержании выше бортового и нормальном его распределении

Продуктивный компонент	Нормированное бортовое содержание		Доля (%) запасов в рудах при содержании выше бортового		Интервал содержания, вес. %	Доля (%) запасов, приходящихся на интервал содержания
	относительно низкое *	относительно высокое **	относительно низкого *	относительно высокого *		
Свинец	-1,208	-1,095	88,6	86,4	0,5—1,0	2,2
Барит	-0,614	-0,486	72,8	69,2	0,5—1,0	3,6
Барит	-0,366	-0,202	64,0	58,0	20—25	6,0

* Для свинца — 0,5, для барита — 20 %.

** Для свинца — 1,0, для барита — 25 %.

Таблица 17

Расчет доли запасов свинца и барита в рудах месторождения XIV при содержании выше бортового и логарифмически-нормальном его распределении

Продуктивный компонент	Среднее содержание, вес. %	Дисперсия логарифмическая	Отношение среднего содержания к бортовому		Доля (%) запасов в рудах при содержании выше бортового		Интервал содержания, вес. %	Доля (%) запасов, приходящихся на интервал содержания
			относительно низкому *	относительно высокому **	относительно низкого *	относительно высокого **		
Свинец	2,90	1,24	5,80	2,90	95,5	93,0	0,5—1,0	2,5
Барит	31,18	2,53	1,56	1,25	86,5	83,0	20—25	3,5

* Для свинца — 0,5, для барита — 20 %.

** Для свинца — 1,0, для барита — 25 %.

Оценка ресурсов свинца и барита в рудах месторождения XIV по балансовым запасам

Сорт руды, категория запасов	Данные разведки						Оценка общих запасов по величине балансовых и предположении о распределении				Среднее увеличение запасов (число раз) при модели распределения	
	характеристика балансовых руд			характеристика забалансовых руд			нормальном		логнормальном		нормальной	логнормальной
	бортвое содержание, вес. %	среднее содержание, вес. %	запасы металла, усл. ед.	интервал содержания, вес. %	среднее содержание, вес. %	запасы металла, усл. ед.	усл. ед.	число раз	усл. ед.	число раз		
Свинец												
I, BC ₁	1,0	3,0	27,88	0,5—1,0	0,61	1,99	38,25	1,37	74,03	2,65	1,26±0,15	2,45±0,28
I, C ₂	1,0	2,53	16,85	0,5—1,0	0,63	1,02	19,61	1,16	37,94	2,25		
II, BC ₁	0,5—1,0	0,57	2,16	—	—	—	41,5	19,21	80,4	37,22	19,12±0,12	37,18±0,07
II, C ₂	0,5—1,0	0,64	0,21	—	—	—	4,0	19,04	7,8	37,14		
Барит												
I, BC ₁	25,0	48,2	447,17	<25	12,81	38,29	370,1	0,83	908,0	2,03	1,68±1,1	4,11±2,94
I, C ₂	25,0	45,73	103,38	<25	16,89	27,02	261,2	2,53	640,75	6,19		
II, BC ₁	20,0	37,2	118,75	—	—	—	1147,9	9,63	2816,1	23,7	9,62±0,4	23,7±0,01
II, C ₂	20,0	43,09	14,09	—	—	—	136,2	9,65	334,13	23,7		

дения. На их основе рассчитаны величины общих ресурсов месторождения и их погрешности. Здесь так же, как и в предыдущем случае, оценки при логнормальном распределении выше, чем при нормальном. Погрешность оценок балансовых ресурсов составляет 15—90 % от оценки общих запасов свинца и барита месторождения и 60—150 % от величины прогнозных ресурсов. Следовательно, возможная ошибка оценки прогнозных ресурсов для этой модификации метода достаточно велика. Особо следует отметить, что оценки и их погрешности при использовании данных о запасах разных категорий (B+C₁ и C₂) чаще всего мало различаются между собой.

В целом видно, что оценка прогнозных ресурсов, полученная на основе распределения содержания продуктивных компонентов в рудах, страдает значительной погрешностью, достигающей 100 %, но в среднем, судя по имеющимся данным, равной 50—60 % от величины самой оценки.

Погрешность определенной модификации геолого-экономической экстраполяции определялась на материалах оценки прогнозных ресурсов бокситоносности одного из регионов мира (табл. 19). В качестве исходных данных были использованы затраты средств на открытие запасов бокситов в регионе. Геологоразведочные работы были начаты в 1976 г. и продолжаются в настоящее время, но данные по приросту запасов нам известны только по 1984 г. По этим данным получены ежегодные значения прироста запасов на единицу затрачиваемых средств. Варьируя исходными данными на начало и окончание периода, по которому рассчитываются [Неженский И. А., Булкин Г. А., 1987 г.] оценки общих и прогнозных ресурсов бокситов в регионе, мы получаем серию цифр. Для них легко найти среднюю величину оценки и ее погрешность. Параллельно по тем же данным рассчитывается величина Q_S разведанных запасов к началу 1984 г. По соответствующей графе табл. 19 видим, что оценки разведанных запасов изменяются от 13 до 174 усл. ед. Средняя оценка и ее погрешность Q_S=75,9±55,1 при разведанных запасах, равных 82,1 усл. ед.

Таким образом, средняя оценка запасов, полученная с помощью геолого-экономической экстраполяции, статистически не отличается от действительной величины разведанных запасов, хотя ее неопределенность и пределы колебаний достаточно велики.

Суммарные оценки ресурсов региона (т. е. известные плюс прогнозные) колеблются в пределах 58—255 усл. ед., равняясь в среднем Q_∞=154 усл. ед.

Таким образом, расчетные ресурсы региона почти в 2 раза выше разведанных.

Оценки прогнозных ресурсов бокситов колеблются от 43 до 106 усл. ед., равняясь в среднем Q_∞=78,2±20,5.

Оценка прогнозных ресурсов бокситовых

Год	Затраты (усл. ед.) dS	Нарастающие затраты (усл. ед.) ΣS	Прирост запасов (усл. ед.) dQ	Нарастаю- щие запасы (усл. ед.) ΣQ	Прирост запасов на единицу затрат, dQ/dS	Общий прирост запасов на единицу общих зат- рат. $\Sigma Q/\Sigma S$
1976	3,89	3,89	20,89	20,87	5,37	5,37
1977	2,68	6,57	15,68	36,57	5,85	5,85
1978	4,10	10,67	—	36,57	—	—
1979	3,80	14,47	13,00	49,57	3,42	2,20
1980	3,80	18,27	13,90	63,47	3,65	3,47
1981	3,40	21,67	2,92	66,39	0,85	3,06
1982	3,46	25,13	7,81	74,20	2,25	2,95
1983	3,17	28,30	7,94	82,12	2,50	2,90
1984	3,39	31,69	—	—	—	2,59

руд одного из регионов мира

Сравнение данных по годам (начало— окончание)	Сравнение оценок прироста запасов на единицу затрат		a	Q_S	Q_∞	Q_{np}
	начало	окончание				
1976—1983	5,37	2,50	0,027	92,46	198,85	106,39
1977—1982	5,85	2,25	0,034	67,28	157,93	90,65
1977—1981	5,85	0,85	0,077	13,10	69,70	56,60
1976—1980	5,37	3,65	0,021	174,11	255,66	81,55
1979—1982	3,42	2,25	0,029	89,43	185,15	95,72
1977—1983	5,85	2,90	0,029	81,40	185,15	103,62
1977—1979	5,85	2,20	0,092	15,41	58,37	42,92
1977—1981	5,85	3,06	0,061	23,41	88,01	64,60
1976—1980	5,37	3,65	0,021	174,11	255,66	81,56
1976—1980	5,37	2,20	0,062	27,89	86,66	58,83
	$Q_S =$ =75,9 ± ± 55,1	$Q_\infty =$ =154,11	$Q_{np} =$ =78,2 ± ± 20,5			

Погрешность средней величины не достигает 30 % прогнозируемых ресурсов.

Для выявления погрешности одной из реализаций метода рангового ряда в условиях крупного рудного региона вернемся к табл. 4 и рис. 2, где было показано развитие во времени эмпирического рангового ряда, построенного по убыванию запасов месторождений региона. Как уже говорилось, с помощью рангового ряда можно найти нижний предел величины прогнозных ресурсов, но с момента фиксации (открытия и разведки) самых крупных объектов региона оценка суммарных — разведанных и прогнозных — ресурсов начинает «сходиться» к одной величине (на табл. 4 это 10—11 тыс. усл. ед.). В таком случае можно для различных оценок рассчитать среднюю величину и ее погрешность: $\bar{Q} = 11180 \pm 82$. Как видно, эта погрешность здесь меньше 1 %.

Для определения погрешности конкретного метода оценки прогнозных ресурсов необходимо получить результат с помощью нескольких модификаций одного и того же метода. Подобная работа для метода рангового ряда была проведена в одном из крупных геологических регионов (табл. 20) для свинца, цинка и меди [13].

Здесь с помощью шести модификаций (перечислены в табл. 20), представляющих метод или вытекающих из него, получен набор значений суммарных ресурсов этих металлов.

Как видно из таблицы, наибольшее увеличение ресурсов вероятно для меди, где оно в среднем составляет 192 % при стандартном отклонении 77 %. Здесь видно, что погрешность средней оценки прогнозных ресурсов каждого из трех металлов практически достигает величины оценки. То же относится и к среднему результату по трем металлам.

Подобная же количественная оценка восьми металлов получена в одном из регионов, характеризующихся достаточно широким комплексом полезных ископаемых. Здесь применялось несколько модификаций метода рангового ряда (табл. 21). Первая из них найдена по рядам, составленным на основе примерных величин запасов месторождений и рудопроявлений одного металла (полученных из кадастра). В логарифмической системе координат эти ранговые ряды представлены на рис. 10. На графиках видно, что с уменьшением запасов линии эмпирических запасов все более приближаются к вертикали и отклоняются от линий теоретических запасов. Для таких металлов, как молибден, медь, висмут и др., увеличение наклона начинается от запасов наибольшего месторождения; для вольфрама, цинка, свинца это увеличение начинается от точки запасов второго или третьего месторождения, так что на графиках имеется четкий перегиб, и можно полагать, что месторождение с наибольшими запасами либо неизвестно, либо недоразведано («пропущено» в ряду). По углам наклона графиков легко вычислить их котангенсы, которые и показывают [16], во сколько раз суммарные

Сравнение оценок прироста ресурсов меди, свинца

Металл	Реальные запасы, усл. ед.	Во сколько раз они могут быть		
		рангового ряда по		
		запасах известных месторождений	соотношении числа крупных, средних и малых месторождений	запасах, приведенных к усл. ед. свинца
Медь	2296	1,69	1,87	1,73
Свинец	2315	1,51	2,57	1,73
Цинк	6900	1,76	2,62	1,73

и цинка методом рангового ряда (по [13])

увеличены по расчету			Среднее значение	Погрешность среднего значения	
данным о	эмпирической зависимости от наибольшего месторождения				
	запасах наибольшего месторождения	расчетно			графически
	0,57	2,76	2,87	1,92	±0,77
	1,19	1,15	1,23	1,56	±0,49
	1,48	0,65	1,05	1,54	±0,62
				1,67±0,59	

Таблица 21

Оценка возможного увеличения ресурсов

Металл	По данным о запасах известных месторождений	По данным о числе крупных средних и малых объектов на карте полезных ископаемых	По эквивалентам запасов (усл. ед. свинца) в едином ранговом ряду месторождений	По разведанным запасам наибольшего месторождения		
				(1)*	(2)*	
				Вольфрам	2,14	1,54
Молибден	3,73	1,38	4,54	2,11		
Медь	4,70	1,20	3,83	6,28		
Свинец	1,80	1,27	—	1,17		
Цинк	2,80	1,53	1,03	1,14		
Висмут	3,48	2,30	4,70	8,36		
Серебро	1,43	1,26	3,13	2,22		
Золото	2,14	1,40	1,30	4,17		
	2,78±1,04	1,48±0,35		2,91±1,41	3,63±2,57	

* По указанным в тексте формулам (1) и (2) соответственно.

** Среднее увеличение за вычетом единицы (известные запасы) и погрешности.

ресурсы могут возрасти относительно уже известных сейчас запасов (см. табл. 21, вторая колонка).

Вторая модификация метода заключается в использовании данных с карт полезных ископаемых региона, где обозначены местоположение и масштабы месторождений. С помощью количеств объектов разных масштабов и граничных запасов при отнесении объекта к разным масштабам строятся ранговые ряды

в одном из комплексных регионов

По расчетным запасам наибольшего месторождения				Среднее увеличение ресурсов и его погрешность	Минимальная оценка прогнозных ресурсов (%)**
из данных о запасах рангового ряда		из данных о числе объектов на карте			
(1)*	(2)*	(1)*	(2)*		
4,07	1,47	4,07	1,47	2,25±1,00	25
5,74	2,36	—	—	2,93±1,46	47
35,63	14,21	—	—	8,68±5,52	214
3,09	2,41	1,82	1,95	1,90±0,54	36
2,04	1,48	1,81	1,41	1,68±0,46	22
60,92	—	—	—	11,91±20,12	—
7,96	—	1,10	—	2,59±2,12	—
2,26	7,29	4,64	—	2,98±2,02	—
15,21±20,15	4,87±4,62	2,69±1,40	1,61±0,24		

в логарифмической системе координат. Для этого граничные запасы и центры каждой масштабной категории месторождений выражаются в логарифмах, а центрам ставятся в соответствие нарастающие количества месторождений ряда, начиная с самых крупных, и эти количества также выражаются в логарифмах [11]. По логарифмам центров и нарастающих количеств находятся точки обобщенных ранговых рядов запасов на графиках

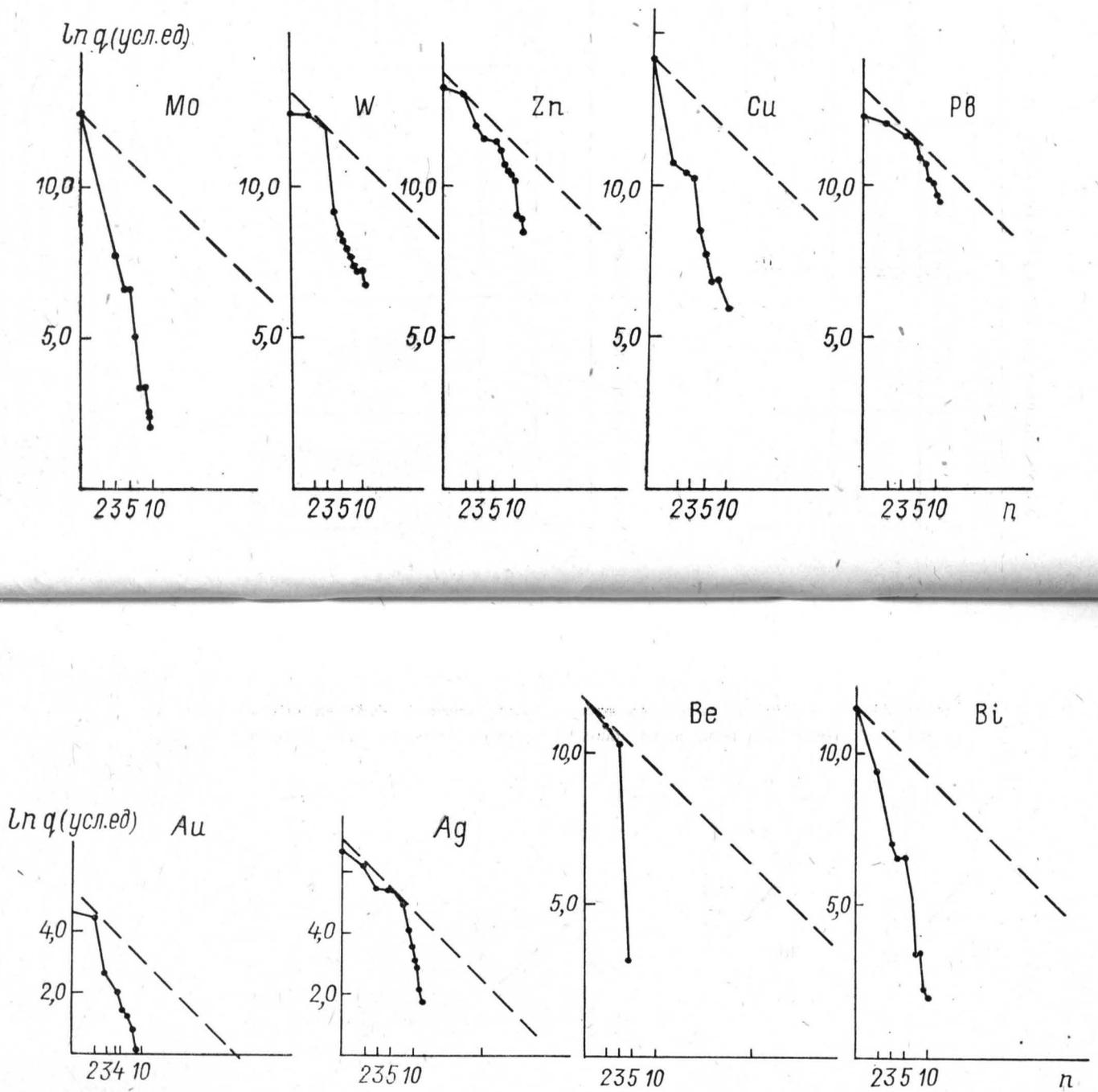


Рис. 10. Ранговые ряды месторождений и рудопроявлений Центрального Казахстана, построенные по карте полезных ископаемых региона масштаба 1 : 500 000.

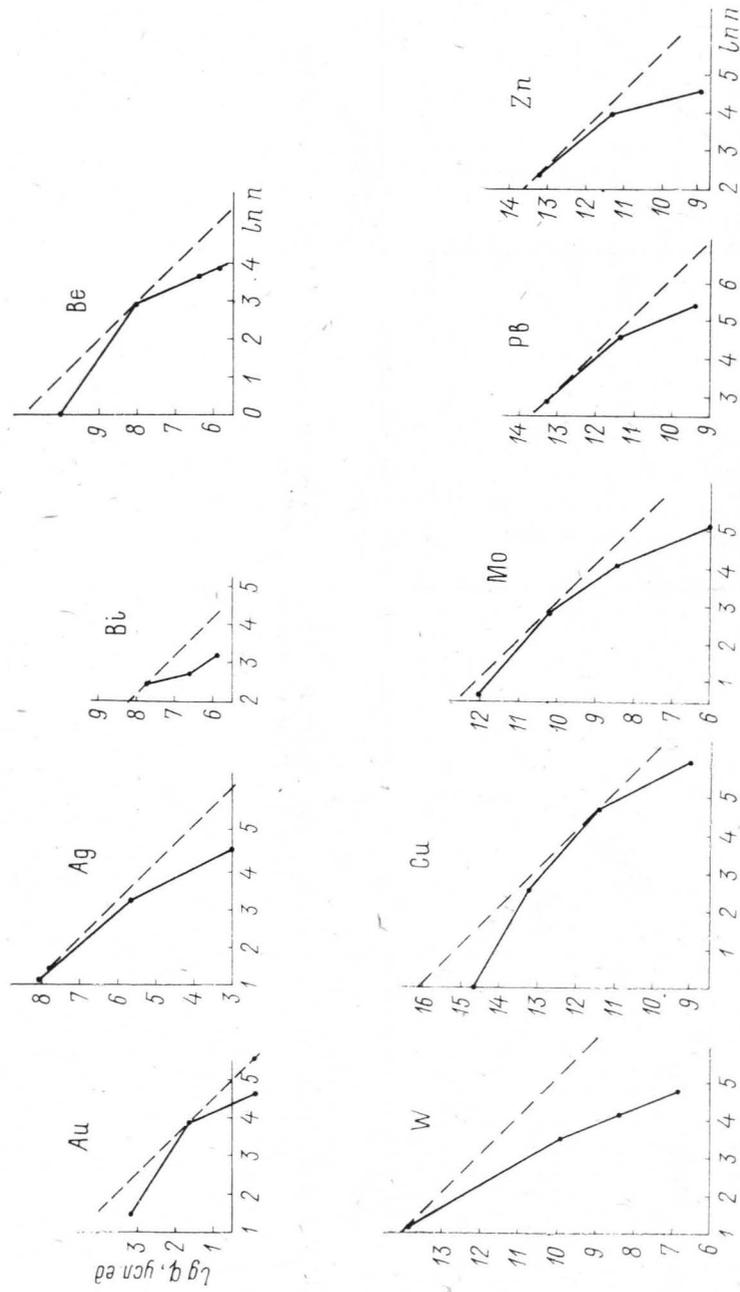


Рис. 11. Ранговые ряды наиболее крупных месторождений мира для девяти металлов.
 q — запасы, n — ранговый номер. Сплошная линия — эмпирические запасы, прерывистая — теоретические.

(рис. 11). По последним определяются углы наклона и их тангенсы, т. е. увеличение ресурсов соответствующего металла. Здесь так же, как и в предыдущем случае, есть металлы, для которых касание с теоретической линией рангового ряда происходит в области крупнейших объектов (вольфрам, свинец, цинк, серебро, висмут), и металлы, для которых это касание приходится на область средних по запасам объектов (молибден, медь, золото и бериллий). Это, как и в предыдущей модификации, означает, что наиболее крупные объекты соответствующих металлов либо неизвестны, либо недоразведаны. Их размеры могут быть примерно определены по пересечению линии теоретического ряда с вертикальной осью.

Отмечающееся для некоторых металлов различие в форме графиков, построенных с помощью разной информации, связано с погрешностью метода, выявляемой с помощью его разных модификаций.

Следующий способ прогнозирования полезных ископаемых региона исходит из того, что каждое из его месторождений или рудопоявлений есть результат энергетического воздействия, проявляющегося в процессе геологического развития региона. Можно предположить, что все энергетические затраты, ведущие к созданию запасов цветных, редких и благородных металлов, в определенной степени составляют единую статистическую совокупность и в качестве таковой могут рассматриваться как единый ранговый ряд запасов. Трудность заключается в отсутствии энергетического эквивалента, позволяющего запасы разных металлов привести к единому ряду. В качестве такого эквивалента могут быть использованы прямые энергетические затраты на получение тонны соответствующего металла [Булкин Г. А., 1982 г.] и соотношения между ними для разных металлов. Расчеты энергии рудообразования, по Н. И. Сафронову, здесь малопригодны, поскольку его условная единица энергии одинакова для разных металлов, что не соответствует действительному положению [Булкин Г. А., 1982 г.]. Как нам кажется, в качестве некоторого примерного эквивалента могут быть использованы цены металла на мировом рынке, которые, согласно Л. Н. Овчинникову и Р. И. Лутенкову [35], зависят от геохимических, а следовательно, и энергетических свойств металла. С помощью цены (в долларах) на интересующие нас металлы найдены переводные эквиваленты, которые позволили запасы месторождений привести к запасам свинца. Например, если месторождение золота имеет запасы в 100 т, а его цена в $1125/0,35 = 3214,28$ раз выше цены свинца, то при переводе его запасы равны 321428 т условного свинца. Таким образом, найден обобщенный ранговый ряд для условного свинца, который в логарифмической системе координат представлен на рис. 12. Его анализ показал, что $\angle \delta = 28^\circ$; $\text{ctg } \delta = 1,88$, откуда вытекает, что общие запасы месторождений региона, приведенные к единицам условного свинца,

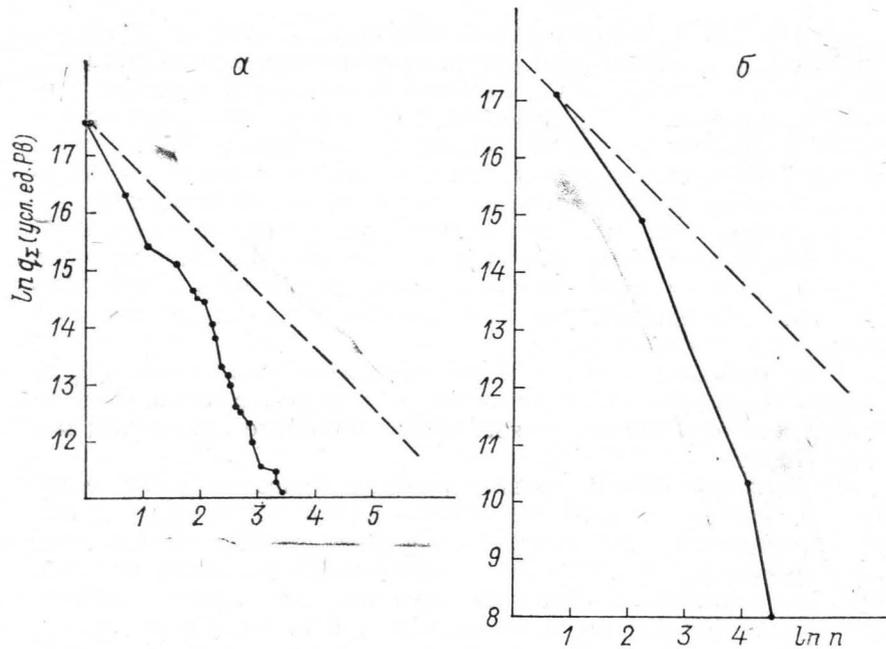


Рис. 12. Ранговые ряды месторождений Центрального Казахстана (запасы даны в усл. ед. свинца, эквиваленты введены по ценам мирового рынка). а — построенные по крупнейшим объектам, б — по группам месторождений. Сплошная линия — эмпирические запасы, прерывистая — теоретические.

могут быть увеличены на 88 %. Примерно таковы же результаты (73 %) и в случае, если все месторождения (в тех же единицах запасов) разбить на несколько градаций по запасам (см. рис. 12), а затем нанести центры градаций запасов и соответствующего им нарастающего числа месторождений (в логарифмах).

Далее по двум формулам расчета суммарных ресурсов:

$$Q = q_{\max} \ln \frac{q_{\max}}{q_0},$$

где q_{\max} и q_0 — запасы наибольшего и наименьшего промышленного месторождения, и

$$\ln Q = \alpha \ln q_{\max} + \beta,$$

где α и β — коэффициенты линейной связи суммарных запасов региона и запасов наибольшего месторождения [10, 14], находим оценки суммарных ресурсов по разведанным запасам наибольшего объекта, а также по его расчетным ресурсам.

Комплекс расчетов суммарных ресурсов восьми металлов показал, что эти ресурсы относительно разведанных запасов могут

быть увеличены в 1,5—10 раз. При этом погрешность оценок достигает 100 % величины прогнозных ресурсов, а в одном случае (висмут) значительно ее превышает. Абсолютная величина погрешности велика для оценки ресурсов меди, золота и серебра. Сравнение погрешностей для разных модификаций метода рангового ряда (см. табл. 21) показывает, что расчеты по графикам более надежны, чем по запасам наибольшего месторождения, причем если эти запасы сами получены в результате расчетов, то надежность метода, как и следовало ожидать, еще более снижается.

Как видно из экспериментального изучения модификаций и методов в условиях отдельных объектов и регионов, стандартные отклонения средней оценки прогнозных ресурсов достаточно велики, что приводит к необходимости находить оценку прогнозных ресурсов несколькими независимыми методами, тем самым повышая надежность оценки и уменьшая ее возможную погрешность. Такого рода работы были проведены в нескольких регионах Средней Азии.

В одном из этих регионов проводились оценки прогнозных ресурсов двух металлов. Первый металл оценивался четырьмя модификациями двух независимых методов:

методом рангового ряда	
по запасам наибольшего месторождения	2,95
по карте полезных ископаемых для объектов	
крупных	1,05
средних	2,74
малых	3,73
в целом	3,24
по эмпирической зависимости суммарных запасов от запасов наибольшего месторождения	3,05
по пределу развития линии рангового ряда по времени (см. табл. 4)	4,00

Экспертная оценка местных геологов составляет 5,0—6,0, а средняя оценка — $3,08 \pm 0,05$. Согласно подсчетам методом рангового ряда ([10, 32], Неженский И. А., Булкин Г. А., и др., 1987 г.), который применим в регионе благодаря эволюционному единству месторождений оцениваемого металла, увеличение его ресурсов возможно в 3—4 раза по сравнению с суммарными запасами на 1976 г. Но метод также показывает, что реальное увеличение запасов возможно главным образом для средних и малых объектов (в 2,74 и 3,73 раза соответственно), причем из средних объектов, которые по запасам составляют от 10 до 30 % крупнейшего месторождения, примерно десять неизвестно или не разведано окончательно, и их ресурсы в сумме составляют величину, равную уже разведанным в регионе запасам.

Таким образом, ресурсы региона по результатам комплексной оценки могут быть увеличены в $3,0 \pm 0,05$ раза (категория P_2). Стандартное отклонение результата говорит об удовлетво-

Таблица 22

Оценка прогнозных ресурсов рудных объектов

Объект	Метод рангового ряда		Метод определения по статистическому распределению содержания		Оценка по категории P_1	Средняя величина оценки
	по карте полезных ископаемых	по массе металла в геохимических аномалиях	нормальному	логнормальному		
Первый металл						
XIII	1,5	—	1,7	1,0	—	1,4±0,1
III	7,0	—	2,0±0,5	1,9±0,5	5,8	4,4±1,8
II	—	3,3	3,1±0,3	3,1±0,3	—	3,0±0,3
V	1,4	—	—	—	—	1,4
X	1,6	—	—	—	—	1,6
Второй металл						
III	5,2	—	—	—	2,0	3,6±1,6
II	—	2,7	—	—	—	2,7

Оценка увеличения суммарных ресурсов

Месторождение	Металл	Метод рангового ряда по		
		запасам в логарифмических координатах	запасам наибольшего рудного тела	постоянной рангового ряда
XV	Вольфрам	2,4	1,2—1,9	1,39
"	Молибден	1,9	2,7—3,1	1,54
XVI	Вольфрам	1,50 } 1,43	1,38 } 1,66	1,48 } 1,74
"	"	1,33 } 1,46	1,27 } 2,33	2,0 } 1,74
"	"	1,46 } 1,14	2,33 } 1,26	2,0 } 1,55
"	Молибден	1,28 } 1,14	1,20 } 1,26	1,55
"	"	1,00 } 1,14	1,32 } 1,26	1,55
XVII	Свинец	1,4	1,09—2,03	1,09
"	Цинк	2,4	1,42—4,05	2,27
Средняя оценка и погрешность метода на изученных объектах		1,78±0,49	1,94±0,61	1,60±0,36

* Рассчитана так же, как в табл. 10, 11.

рительной формальной надежности. По экспертной оценке местных геологов-производственников увеличение ресурсов возможно в 5—6 раз, что на основе наших оценок представляется преувеличенным.

В табл. 22 даны оценки прогнозных ресурсов некоторых месторождений по результатам одного, двух или трех независимых методов. Ресурсы объектов V и X могут быть увеличены на 40—60 % (надежность оценки низкая — только одним методом), объекта XIII — на 40 %, объекта II — в $3,0 \pm 1,3$ раза (средняя надежность — два метода), объекта III — в $4,4 \pm 1,8$ раз (высокая надежность — три метода). Широкие границы колебаний оценки в последнем случае связаны с тем, что результат по методу рангового ряда и подсчеты запасов при разведке по категории P_1 , совпадая между собой, заметно отличаются от результата по методу статистического распределения руд.

Ресурсы другого металла на объекте II могут быть увеличены в 2,7 (один метод), а на объекте III — в 5,2 раза, но здесь оценка по методу рангового ряда расходится с оценкой по категории P_1 при разведке, когда последняя, вероятно, была занижена. При сравнении оценок для разных объектов следует помнить, что их разведанные запасы, относительно которых определялся прирост ресурсов, неодинаковы.

Таблица 23

на трех крупных месторождениях мира

Метод геолого-экономической экстраполяции	Метод распределения содержания в рудах на основе модели		Среднее значение оценки и его погрешность	Минимальная оценка прогнозных ресурсов, %*	
	наивероятный результат по временному интервалу	средний результат			нормальной
1,73	2,21	3,91	2,4	2,14±0,79	35
3,08	2,54	1,34	3,92	2,52±0,86	66
2,0	2,08	3,06	4,04	2,20±0,86	43
2,65	3,87	—	—	2,09±1,03	6
1,30	—	—	—	1,38±0,17	21
1,30	—	—	—	2,29±0,54	75
2,01±0,70	2,68±0,71	2,77±1,07	3,45±0,75	—	—

Широкий комплекс методов оценки прогнозных ресурсов был применен к трем крупным месторождениям (табл. 23) мира, по которым нам удалось найти необходимую для расчетов информацию. Здесь применялись три основных метода: рангового ряда, геолого-экономической экстраполяции и распределения содержания металла в рудах — при двух или нескольких возможных модификациях.

Из таблицы видно, что общие ресурсы молибден-вольфрамовых месторождений примерно в 2 раза больше разведанных к настоящему времени, причем погрешность оценки ресурсов вольфрама ниже, чем погрешность оценки молибдена, но обе достигают 60—100 % величины прогнозных ресурсов. Примерно те же результаты получены для свинцово-цинкового месторождения. Сравнение погрешностей по методам и их модификациям показывает, что метод рангового ряда более точен, чем метод геолого-экономической экстраполяции.

Заключение

Рассмотрены вопросы контроля оценок прогнозных ресурсов, определения погрешностей различных методов, достоверности оценок ресурсов на различных стадиях геологоразведочного процесса.

Приведена полная система связи объектов прогнозной оценки, их прогнозных ресурсов и запасов со стадийностью геологоразведочных работ и сформулированы требования к достоверности оценок ресурсов разных категорий на соответствующих стадиях геологоразведочного процесса; дан анализ погрешностей конкретных методов оценок прогнозных ресурсов и характера этих оценок (минимально возможные, максимально возможные, средние, наиболее вероятные, неопределенные); обсуждены научные основы и принципы контроля оценок прогнозных ресурсов, а также влияние на них различных граничных параметров (геологических и экономических); приведены примеры экспериментального выявления погрешностей оценок.

Показано, что достоверность учитываемых в настоящее время «точечных» оценок прогнозных ресурсов невелика. Для ее повышения необходимо представлять и учитывать «интервальные» оценки, т. е. указывать оценки, минимально и максимально возможные на той или иной стадии геологоразведочных работ и при применении тех или иных методов. Возникает вопрос, как перейти от уже существующих зафиксированных, апробированных и утвержденных точечных оценок к интервальному. Предлагаемая система увязки ресурсов различных категорий с возможной достоверностью их оценок позволяет через погрешность

$\Delta Q/Q$ и их ошибку ΔQ перейти от точечных оценок \bar{Q} к интервальным $\bar{Q} \pm \Delta Q$ с учетом их симметрии или асимметрии ($|\Delta Q| = |-\Delta Q|$ или $|\Delta Q| \neq |-\Delta Q|$) и особенностей погрешности у разных методов оценки, когда возможны случаи $Q_{\min} \leq \bar{Q} \leq Q_{\max}$, $Q_{\min} \leq \bar{Q}$ или $\bar{Q} \leq Q_{\max}$.

Знание величины доверительного интервала $Q_{\max} - Q_{\min} = 2\Delta Q$ и особенностей положения в нем математического ожидания оценки прогнозных ресурсов Q позволяет подойти и к решению вопроса о наиболее вероятном количестве прогнозных ресурсов на данном объекте на следующей стадии геологоразведочных работ, т. е. при переходе ресурсов в более высокие категории.

Таким образом, многие коренные вопросы контроля оценок прогнозных ресурсов и определения их достоверности рассмотрены на количественной основе и доведены до конкретного выражения для различных стадий геологоразведочных работ, категорий ресурсов и методов оценки. В дальнейшем необходимо более строгое обоснование предлагаемых рекомендаций, тесная увязка их с существующей практикой оценки прогнозных ресурсов и четкая алгоритмизация всего процесса подбора исходных данных, оценки прогнозных ресурсов и ее контроля. Важнейшей проблемой остается также «однотипный» учет экономических параметров (минимального содержания металлов в рудах и т. п.) при оценке прогнозных ресурсов на различных стадиях геологоразведочных работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агтерберг Ф. П. Вероятностный подход к прогнозированию месторождений полезных ископаемых. Геологическая служба Канады, Оттава. Принт. Новосибирск, 1977. 19 с.
2. Бабошин В. А. Мера влияния вмещающих и подстилающих пород на продуктивность слюдоносных пегматитов.— Литология и полезные ископаемые, 1974, № 5, с. 88—97.
3. Бабошин В. А. Уровень надежности количественного прогнозирования месторождений высококачественного мусковита.— Сов. геология, 1988, № 9, с. 107—113.
4. Бакиров В. А. Статистическая модель распределения месторождений нефти и газа по величине запасов.— Геология нефти и газа, 1972, № 2, с. 63—68.
5. Бекжанов Г. Р., Бугаец А. Н., Лось В. Л. Геологические модели при прогнозировании ресурсов полезных ископаемых. М., Недра, 1987. 140 с.
6. Бешелев С. Д., Гурвич Ф. Г. Математико-статистические методы экспертных оценок. М., Статистика, 1980. 263 с.
7. Богацкий В. В., Колеганов Ю. М., Суганов В. И. Пространственно-статистический анализ геологического строения и размещения полезных ископаемых. М., Недра, 1976. 105 с.
8. Богданов Ю. В., Неженский И. А. Полная система единиц учета ресурсов минерального сырья.— Разведка и охрана недр, 1987, № 1, с. 27—31.

9. Булкин Г. А. Дисперсионный анализ при оценке влияния рудоконтролирующих факторов в Никитовском рудном поле.— Геология рудн. месторождений, 1969, № 3, с. 73—83.
10. Булкин Г. А. Количественная оценка прогнозных запасов руд. М., Недра, 1984. 129 с.
11. Булкин Г. А. О мнимой невозможности количественной оценки прогнозных ресурсов с помощью закона Ципфа.— Разведка и охрана недр, 1988, № 4, с. 15—18.
12. Булкин Г. А., Лепилин О. М. О распределении некоторых элементов в Никитовском рудном поле.— Геохимия, 1964, № 11, с. 1193—1198.
13. Булкин Г. А., Мустафаев Г. В. К методике количественного прогнозирования.— Геология рудн. месторождений, 1984, № 5, с. 65—72.
14. Булкин Г. А., Неженский И. А. О взаимосвязи минеральных ресурсов рудоносных провинций и запасов наибольших месторождений.— Докл. АН СССР, 1982, т. 266, № 4, с. 931—935.
15. Булкин Г. А., Неженский И. А. Прогнозная оценка запасов руд на основе поисковых моделей.— Докл. АН СССР, 1983, т. 270, № 3, с. 660—663.
16. Булкин Г. А., Неженский И. А. Геологоразведочный фильтр и количественное прогнозирование.— Докл. АН СССР, 1984, т. 274, № 3, с. 673—677.
17. Геофизические поиски рудных месторождений. Под ред. В. А. Кличникова. Алма-Ата, 1970, т. 1. 610 с.
18. Давид М. Геостатистические методы при оценке запасов руд. Л., Недра, 1980. 360 с.
19. Захаров Е. Е., Королев Н. И. Структура рудного поля, минералогический состав и генезис Никитовского рудного поля в Донецком бассейне. М., Изд. АН СССР, 1940.
20. Инструкция по геохимическим методам поисков рудных месторождений. М., Недра, 1983. 191 с.
21. Канторович А. Е., Демин В. И. Прогноз количества и распределения по запасам месторождений нефти и газа.— Геология и геофизика, 1979, № 3, с. 26—47.
22. Классификация запасов месторождений и прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых. М., Недра, 1982. 10 с.
23. Количественная оценка прогнозных запасов и перспективных ресурсов минерального сырья при региональных металлогенических исследованиях. Гл. ред. Д. В. Рундквист. Л., 1978. 176 с.
24. Количественное прогнозирование при региональных металлогенических исследованиях. Гл. ред. Д. В. Рундквист. Л., ВСЕГЕИ, 1979. 83 с.
25. Критерии прогнозной оценки территорий на твердые полезные ископаемые. 2-е изд. Под ред. Д. В. Рундквиста. Л., Недра, 1986. 751 с.
26. Марголин А. М. Оценка запасов минерального сырья. М., Недра, 1974. 264 с.
27. Марченко В. В. Человеко-машинные методы геологического прогнозирования. М., Недра, 1988. 232 с.
28. Методические рекомендации по количественной оценке прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых. Алма-Ата, 1982. 96 с.
29. Методические рекомендации по количественной прогнозной оценке месторождений и рудопроявлений по их первичным и вторичным геохимическим ореолам. Отв. ред. С. И. Кирикилица. Симферополь, 1979. 123 с.
30. Методические указания о проведении геологоразведочных работ по стадиям (твердые полезные ископаемые). М., ВИЭМС, 1984. 22 с.
31. Мигачев И. Ф., Сальников А. Е. О невозможности количественной оценки прогнозных ресурсов с помощью закона Зипфа.— Разведка и охрана недр, 1960. 276 с.
32. Неженский И. А., Булкин Г. А. Ранговые ряды рудоносных объектов.— В кн.: Типизация рудоносных объектов при прогнозировании месторождений. Труды ВСЕГЕИ, 1985, нов. сер., т. 336, с. 23—32.
33. Неженский И. А., Рундквист Д. В. Основные методы оценки прогнозных ресурсов территорий.— В кн.: Геохимические методы при поисках скрытого оруденения. М., Наука, 1984, с. 146—162.
34. Общие принципы регионального металлогенического анализа и методика составления металлогенических карт для складчатых областей/Под ред. П. М. Татаринова, В. Ф. Грушевого, Г. С. Лабазина. М., Госгеолгиздат, 1957. 150 с.
35. Овчинников Л. Н., Лутенков Р. И. Металлы: кларки—запасы—ценны.— В кн.: Редкие элементы в геологии. М., Наука, 1982.
36. Принципы прогноза и оценки месторождений полезных ископаемых. Под ред. В. Т. Покалова. М., Недра, 1984. 437 с.
37. Прогнозно-металлогенические исследования при региональных геологосъемочных работах. Методическое пособие по геологической съемке масштаба 1:50 000, вып. 13. Под ред. В. С. Кормилицына. Л., Недра, 1985. 280 с.
38. Прогнозно-поисковые комплексы (серия брошюр ЦНИГРИ). Отв. ред. А. И. Кривцов. ЦНИГРИ, 1983.
39. Региональная геология и металлогения СССР. Под ред. Д. В. Рундквиста, А. А. Смылова. Л., Недра, 1985. 275 с.
40. Робинсон Б. В. Прогнозные ресурсы нефти как объект количественной и геолого-экономической оценки. М., ВИЭМС, 1986. 40 с.
41. Рудоносность и геологические формации структур земной коры. Под ред. Д. В. Рундквиста. Л., Недра, 1981. 423 с.
42. Рундквист Д. В., Неженский И. А. Количественное прогнозирование и некоторые вопросы теории металлогении.— Разведка и охрана недр, 1984, № 7, с. 18—29.
43. Сафронов Н. И. Основы геохимических методов поисков рудных месторождений. Л., Недра, 1978, 00 с.
44. Соловов А. П., Матвеев А. А. Геохимические методы поисков рудных месторождений. Сб. задач, изд. МГУ, 1985. 226 с.
45. Сухов Л. Г., Дуденко Л. Н., Наторхин И. А. Количественные методы прогнозирования эндогенных рудных месторождений. Л., Недра, 1981. 139 с. (Тр. НИИГА, т. 179).
46. Харченко А. Г. Принципы и методы прогнозирования минеральных ресурсов. М., Недра, 1987. 230 с.
47. Шпильман В. И. Количественный прогноз нефтегазоносности. М., Недра, 1982. 215 с.
48. Щиголов Б. М. Математическая обработка наблюдений. М., Физматгиз, 1960. 276 с.
49. Ярмач А. А. Особенности влияния состава вмещающих пород на слюдоносность пегматитов мусковитовых месторождений Северной Карелии.— Вестн. Харьковского ун-та, 1982, № 228, с. 12—14.
50. Allais M. Methode d'evaluation des perspectives economiques de la recherche miniere sur de grands espaces Application au Sahara Algerien.— Revue de l'Industr. Minerale, 1956, Janv., Rg 3, p. 329—382.
51. Bender F. An earth scientist's view of metallic resources.— Mineral Raw Materials. Stuttgart, 1977, p. 117—136.
52. Blondel F. Les lois statistiques de la Repartition Geographique des Productions Minières.— Rev. l'Industr. Minerale Rech. Miniere. 1956, Janv., Rg 2, p. 319—327.
53. Cargill S. M., Meyer F. F., Picklyk D. D., Urquidi F. Summary of resources assessment methods resulting from the International Geological Correlation Program Project 98.— Math. Geol., 1977, vol. 9, № 3, p. 211—220.
54. Cargile M., Root D. H., Baillay E. H. Resources estimation from historical data: mercury, a test case.— Math. Geol., 1980, vol. 12, № 5, p. 489—522.
55. Eastland O. R. Mineral resource appraisal and mineral deposits computer files in the Geological Survey of Canada.— Math. Geol., 1977, vol. 9, № 3, p. 235—243.

56. *Griffits J. C.* Mineral resource assessment using the unit regional value concept.— *Math. Geol.*, 1978, vol. 10, № 5, p. 441—470.

57. *Heiland D. L.* Estimation of undiscovered uranium resources.— *Evaluation of uranium resources*. Vienna, 1979, p. 231—251.

58. *Lasky S. G.* How tonnage and grade relation help predict ore reserves.— *Eng. and Min. J.*, 1951, vol. 151, № 4, p. 81—85.

59. *McKelvey V. E.* Mineral resource estimates and public policy.— *Am. Scientist*, 1972, vol. 60, № 1, p. 32—40.

60. *Principles of the mineral resource classification system of the U. S.*— *Bureau of Mines and U. S. Geol. Surv. Bull.*, 1976, 1450 A. 5 p.

61. *Singer D. A., De Young J. H.* What can grade-tonnage relations really tell us?— *Publications du 26CG1, Ressources minérales, Mémoire du BRGN*, 1980, № 106, p. 91—101.

62. *Zwartendyk J.* Economic Issues in Mineral resource adequacy and in the long-term supply of minerals.— *Econ. Geol.*, 1981, vol. 76, № 5, p. 999—1005.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение (<i>И. А. Неженский</i>)	3
Научные основы контроля оценок прогнозных ресурсов (<i>И. А. Неженский</i>)	8
Краткий обзор методов оценок прогнозных ресурсов (<i>Г. А. Булкин</i>)	32
Комплексирование методов оценки прогнозных ресурсов (<i>И. А. Неженский</i>)	33
Специфика оценок прогнозных ресурсов, полученных разными методами (<i>Г. А. Булкин</i>)	41
Представления о достоверности и надежности оценок и требования к их качеству (<i>Г. А. Булкин</i>)	45
Возможная основа расчета достоверности оценок прогнозных ресурсов (<i>И. А. Неженский</i>)	48
Достоверность оценок прогнозных ресурсов различных категорий (<i>И. А. Неженский</i>)	60
Обеспеченность результатами прямых замеров параметров рудоносных объектов как гарантия повышения надежности подсчета ресурсов полезных ископаемых (<i>В. А. Бабошин</i>)	67
Погрешность конкретных видов оценки прогнозных ресурсов (<i>Г. А. Булкин</i>)	72
Контроль оценок специальными методами (<i>Г. А. Булкин</i>)	72
Экспериментальное выявление погрешности оценок прогнозных ресурсов (<i>Г. А. Булкин</i>)	76
Заклучение (<i>И. А. Неженский</i>)	93
Список литературы	99

КОНТРОЛЬ ОЦЕНОК ПРОГНОЗНЫХ РЕСУРСОВ
РУДОНОСНЫХ ОБЪЕКТОВ

Методические рекомендации

Редактор *В. И. Гинцбург*
Технический редактор *А. А. Иванова*

Сдано в набор 03.01.90. Подписано в печать 22.10.90. Формат 60×90/16.
Бумага тип. № 1. Гарнитура литературная. Печать высокая. Усл. печ. л. 6,5.
Усл. кр.-отт. 6,85. Уч.-изд. л. 6,88. Тираж 500 экз. Заказ 7. Цена 1 руб.

Всесоюзный ордена Ленина научно-исследовательский
геологический институт им. А. П. Карпинского (ВСЕГЕИ)
199178 Ленинград, Средний пр. 74
Ленинградская картографическая фабрика ВСЕГЕИ
199178 Ленинград, Средний пр., 72