

ISSN 0038—5069

# Советская геология

Представляем

ВЕДУЩИЙ  
ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ  
ВУЗ  
СТРАНЫ

МГРИ

6/1991

# МОСКОВСКИЙ ГЕОЛОГО- РАЗВЕДОЧНЫЙ ИНСТИТУТ

МОСКОВСКИЙ ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫЙ ИНСТИТУТ готовит высококвалифицированных специалистов и ученых в области поисков, разведки, геолого-промышленной оценки, технологии и техники разведки и разработки месторождений полезных ископаемых, а также в области геофизики, гидрогеологии, инженерной геологии, экономики и управления в горной промышленности и геологоразведке.

Выпускники дневного, вечернего и заочного отделений МГРИ получают квалификацию горного инженера — геолога, геофизика, гидрогеолога, экономиста, горного инженера по технике и технологии разведки и разработки рудных и россыпных месторождений.

Студенты МГРИ обучаются на 36 кафед-

рах, в учебных, отраслевых и проблемных научно-исследовательских лабораториях, в инженерно-техническом центре института, пользуются библиотеками и уникальными музеями, проходят практики на учебно-производственных базах в Подмоскowie, Прибалтике, Северном Кавказе и в Крыму, в экспедициях и на рудниках, участвуют в экскурсиях по нашей стране, а также в зарубежных, работают в студенческих научных кружках и СКБ, НИИ АН СССР и отраслевых министерств.

В рамках геологических и горных специальностей институт готовит специалистов по таким новейшим направлениям науки и техники, как океаногeотехнология, геммология, геотехнология, математическое моделирование в геологии.

Адрес института: 117485, Москва,  
ул. Миклухо-Маклая, 23. Телефон приемной  
комиссии 433-55-77





# Советская геология

Ежемесячный научный журнал

Министерства геологии СССР  
Всесоюзного научно-технического  
геологического общества

**6/1991**

Основан в марте 1933 года

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор **А. И. КРИВЦОВ**

*Ю. И. Бакулин, Г. Р. Бекжанов, Э. К. Буренков, В. С. Быкадоров, Н. Н. Ведерников, И. Ф. Глумов, И. С. Грамберг, Т. В. Джанелидзе, Р. В. Добровольская (зам. главного редактора), А. Н. Еремеев, В. А. Ерхов, А. И. Жамойда, А. Н. Золотов, Е. Н. Исаев, А. Б. Каждан, В. И. Казанский, Л. И. Красный, Н. В. Межеловский, В. А. Нарсеев, Л. Д. Овчининская (отв. секретарь), В. А. Петров, Д. А. Родионов, А. Ю. Розанов, Г. В. Ручкин, Е. И. Семенов, В. В. Семенович, В. С. Сурков, К. И. Сычев, В. П. Федорчук, А. А. Шпак, А. Д. Щеглов (зам. главного редактора), В. А. Ярмолук*



МОСКВА, «НЕДРА»

# Содержание

|                                                                |   |
|----------------------------------------------------------------|---|
| Швец В. М.                                                     |   |
| Подготовка инженеров для геологической службы страны . . . . . | 4 |
| Собин О. А.                                                    |   |
| Факультет повышения квалификации . . . . .                     | 8 |

## РЕГИОНАЛЬНАЯ ГЕОЛОГИЯ И ТЕКТНИКА

|                                                                                                              |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Соколовский А. К., Гольдин А. Е.                                                                             |    |
| Актуальные вопросы геотектоники на XXVIII сессии Международного геологического конгресса . . . . .           | 10 |
| Гаврикова С. Н., Соколовский А. К., Галанин А. В., Николаева Л. Л., Орлов В. Н., Федчук В. Я., Баранов Ю. Б. |    |
| Особенности строения фундамента Становой складчатой области . . . . .                                        | 14 |
| Костенко Н. П., Корчуганова Н. И.                                                                            |    |
| Позднеорогенные структуры Корякского региона . . . . .                                                       | 20 |

## ГЕОФИЗИКА

|                                                                                                                                 |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Каменецкая Р. М., Каменецкий Ф. М., Мамаев В. А., Озолина Т. Р., Тимофеев В. М.                                                 |    |
| Применение аэроэлектроразведки при прогнозировании нефтеперспективных участков . . . . .                                        | 24 |
| Плюснин М. И., Билибин С. И., Бабков-Эстеркин С. В.                                                                             |    |
| Совершенствование методики и техники измерений магнитной восприимчивости пород . . . . .                                        | 28 |
| Новик О. Б., Шимелевич М. И.                                                                                                    |    |
| Нелинейные и оптимизационные математические методы анализа геолого-геофизических полей и их взаимодействия . . . . .            | 32 |
| Демура Г. В., Клюев Ю. А., Лыхин А. А., Никаноров В. В., Никитин А. А., Петров А. В.                                            |    |
| Программно-алгоритмическое обеспечение обработки геолого-геофизических данных при выделении слабоконтрастных объектов . . . . . | 39 |
| Попов Ю. А., Коростелев В. М., Березин В. В., Ромушкевич Р. А.                                                                  |    |
| Теплофизические исследования горных пород и руд . . . . .                                                                       | 43 |

## МИНЕРАЛОГИЯ, ПЕТРОГРАФИЯ, ЛИТОЛОГИЯ

|                                                                                        |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Бардина Н. Ю., Попов В. С.                                                             |    |
| Систематика метасоматических горных пород и фаций метасоматизма малых глубин . . . . . | 48 |
| Макаров В. П.                                                                          |    |
| Особенности распределения относительных содержаний изотопов свинца . . . . .           | 56 |
| Оникиенко Л. Д.                                                                        |    |
| О богатых гипогенных железных рудах Михайловского месторождения КМА . . . . .          | 62 |

## МЕТОДОЛОГИЯ, ЭКОНОМИКА, ОРГАНИЗАЦИЯ

|                                                                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Викентьев В. А., Будрик В. С., Воронцов В. А., Ильин В. В., Кушнарев П. И., Шумилин М. В., Ясковский П. П.               |    |
| Методические аспекты повышения эффективности разведочных работ . . . . .                                                 | 65 |
| Каждан А. Б., Пахомов В. И.                                                                                              |    |
| Методологические основы системного анализа разноуровневой геологической информации в прогнозно-поисковых целях . . . . . | 72 |
| Булыгин Р. М., Гуськов О. И.                                                                                             |    |
| Оценка балансовой принадлежности запасов полезных ископаемых на ранних стадиях разведки месторождений . . . . .          | 80 |
| Кобахидзе Л. П., Борисович В. Т., Горюшнянский И. В.                                                                     |    |
| О цене разведанных запасов полезных ископаемых . . . . .                                                                 | 82 |
| Алексеев В. В., Наугольнов С. И., Селезнев С. А.                                                                         |    |
| Экономика топливно-энергетических ресурсов . . . . .                                                                     | 85 |

## ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ

|                                                                                              |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Бондарик Г. К., Невечера В. Л., Пендин В. В.                                                 |    |
| Прогнозирование состояния природно-технических систем криолитозоны Западной Сибири . . . . . | 86 |

## ДИСКУССИИ, ОБСУЖДЕНИЯ

|                                                                   |    |
|-------------------------------------------------------------------|----|
| Панкратов А. В., Швец В. М.                                       |    |
| Гидрогеохимический аспект защиты от парникового эффекта . . . . . | 91 |

Художественный редактор А. А. Хромова  
Технический редактор С. Г. Веселкина  
Корректор Е. М. Федорова

Сдано в набор 24.04.91. Подписано в печать 28.05.91.  
Формат 70×108<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага книжно-журнальная. Печать высокая.  
Усл. печ. л. 8,4. Усл. кр.-отт. 9,1. Уч.-изд. л. 10,28. Тираж 1990 экз.  
Заказ № 755. Цена 1 р. 60 к.

Адрес редакции: 123812, Москва, Бол. Грузинская, 4/6  
Телефоны: 254-60-72, 254-29-56  
Ленинградская картографическая фабрика ВСЕГЕИ  
199178, Ленинград, Средний пр., 72

© Издательство «Недра», «Советская геология», 1991

В 1918 г. была создана Московская горная академия (МГА). В начале 1919 г. она начала функционировать. В составе данной академии был и геологоразведочный факультет.

В развитие геологоразведочного образования МГА внесли большой вклад такие крупные ученые как И. М. Губкин, А. Д. Архангельский, В. А. Обручев, А. П. Павлов, В. И. Вернадский, М. В. Павлова, А. П. Карпинский, А. Е. Ферсман, С. С. Смирнов, А. Н. Заварицкий, И. В. Мушкетов и многие другие.

В апреле 1930 г. на базе МГА было создано шесть самостоятельных институтов, в том числе Московский геологоразведочный (МГРИ).

До Великой Отечественной войны во МГРИ учеными-геологами В. В. Меннером, В. М. Крейтером, А. А. Якжиным, Е. Е. Захаровым, П. В. Калинин, В. Н. Павлиновым, Е. В. Шанцером, А. И. Кравцовым, Н. И. Куличихиным, Б. И. Воздвиженским, А. А. Трофимовым, Л. М. Альпиным, Н. В. Коломенским, А. Г. Тарховым, Б. Я. Меренковым, А. М. Овчинниковым и др. было подготовлено около 1300 специалистов и 18 кандидатов геолого-минералогических наук.

В 1947 г. во МГРИ появилась новая специальность, а затем и факультет техники разведки месторождений полезных ископаемых. С осени 1963 г. в институт влилась горно-геологическая школа Московского института цветных металлов и золота, которая функционировала еще в МГА. В результате объединения двух школ образовался единственный в стране институт, в котором осуществляется подготовка и переподготовка специалистов по всему комплексу проблем, связанных с поисками, разведкой и разработкой месторождений полезных ископаемых.

За вклад в подготовку инженерных и научно-педагогических кадров, а также в развитие научных исследований Указом Президиума Верховного Совета СССР от 12 мая 1969 г. МГРИ был награжден орденом Трудового Красного Знамени.

В настоящее время МГРИ — это 3500 студентов дневного, вечернего и заочного отделений, в том числе 400 иностранных учащихся из 42 стран мира; 470 аспирантов и соискателей, 800 научных сотрудников; 370 преподавателей (почти 80 % доктора и кандидаты наук); 500 человек — обслуживающий персонал и отделы.

За 70 лет институт выпустил более 20 000 специалистов и подготовил свыше 250 докторов наук, 1600 кандидатов.

На базе МГРИ функционирует учебно-методическое объединение Гособразования СССР, которое возглавляет перестройку учебного процесса по геологическому образованию в инженерно-технических вузах. Институт постепенно отходит от жестких пятилетних учебных планов, делает их более гибкими, согласованными с требованиями народного хозяйства и науки. С переходом на контрактную систему обучения студентов теряют смысл планы приема и распределения, но большой интерес приобретает подготовка малыми группами или по индивидуальным планам.

При МГРИ создан учебный комплекс, включающий кроме института ряд геологоразведочных техникумов, средних школ, учебно-производственных комбинатов. Все это позволяет вести интенсивную довузовскую подготовку и профориентацию молодежи.

При МГРИ успешно функционирует специализированное отделение научно-учебного комплекса АН СССР: Космос — наукам о Земле.

Институт участвует во внешнеэкономической деятельности. Получено право самостоятельного выхода на внешний рынок. Продана технология СГД (группа проф. Н. И. Бабичева) в Югославию и США; ведутся переговоры с Японскими фирмами. Завершается оформление нескольких СП (ФРГ, Вьетнам, Китай).



При институте действует инженерно-технический центр, ведущий серийный выпуск ряда изделий, поступающих и на внешний рынок. Недавно создано малое предприятие «Экогеоцентр», пайщиками которого являются Черемушкинский райисполком и Минатомэнерго.

Значительно возрос объем научных исследований. Он уже близок к 8 млн руб.

Профессора и преподаватели МГРИ написали около 1000 учебников, учебных пособий и монографий, многие из которых переведены на иностранные языки, и используются студентами и учеными за рубежом.

В институте ведется большая работа по подготовке научных кадров. Функционирует 11 специализированных советов, на которых ежегодно защищают докторские и кандидатские диссертации около 70 ученых.

Во всех начинаниях коллектива института принимают активное участие студенты, высокое качество подготовки которых признано не только в СССР, но и за рубежом. Студенты занимаются научной и изобретательской работой, участвуют в работе Совета института, Ученого совета и т. д.

Расширяется материально-техническая база института. В 1990 г. институт переехал в новое здание; продолжается строительство и оборудование полигонов МГРИ в Загорске, Крыму, Севастополе и на Северном Кавказе; закончилось проектирование и начинается строительство еще одного корпуса общежития в Беляево; строится техническая база и помещение для научных исследований, на очереди еще одно общежитие, спортивный центр и учебно-научный корпус.

Значительно расширилась сфера взаимодействия коллектива института с предприятиями Москвы и Московской области. При одном из предприятий Главмосинжстроя действует филиал кафедры горного дела. Большие работы выполняет инженерно-технический центр для Главмоспромстройматериалов.

© В. М. Швец, 1991

## Подготовка инженеров для геологической службы страны

В. М. ШВЕЦ

При подготовке специалистов для горно-геологических отраслей народного хозяйства следует учитывать общемировые тенденции сокращения темпов роста использования полезных ископаемых в связи с переходом промышленности на безотходное производство, внедрением ресурсосберегающих технологий, возрастанием потребления вторичных ресурсов, быстрым развитием технологий новых искусственных материалов и др. Исключение, очевидно, составят драгоценные металлы, полуделочные и драгоценные камни, подземные воды питьевого назначения, топливные ресурсы.

Учитывая резкое ухудшение природной среды обитания человека, большое значение приобретают геолого-экологические проблемы. Уже сейчас встает вопрос о широкой подготовке специалистов по геоэкологии. Кроме того,

следует учитывать необходимость развития фундаментальных теоретических проблем геологии, участие геологов в разработке международных научных программ, таких как изучение глубинного строения Земли системами геотраверсов, сверхглубокое бурение на континентах и глубоководное бурение в морях и океанах, охрана геологической среды и др.

Переход к рыночной экономике требует от вузов подготовки таких специалистов, которые бы могли быстро приспосабливаться к изменению конъюнктуры рынка. В условиях конкуренции должна быть резко повышена требовательность к уровню профессиональной подготовки специалистов, уровню экономических знаний, управленческой деятельности, умению свободно пользоваться вычислительной техникой, современными информаци-

онными системами, владению новейшими методами изучения вещества, дистанционными методами и др.

В 1988—1989 гг. в МГРИ были составлены новые квалификационные характеристики горных инженеров геологов, гидрогеологов, геофизиков, специалистов по технике разведки и разработке месторождений. Эти характеристики предъявляют новые высокие требования к качеству подготовки инженеров. Специалист не должен замыкаться в узких рамках личной деятельности, он должен уметь анализировать проблемы и тенденции мирового развития, уметь диалектически мыслить, владеть навыками коллективной профессиональной и социальной деятельности.

Перед высшей технической школой стоит важная задача гуманитаризации инженерного образования. Большое значение при этом имеет подготовка специалистов нового мышления. Особую актуальность приобретает его всесторонняя грамотность и культура, знание как минимум одного иностранного языка.

В связи с перестройкой экономики народного хозяйства страны и, в частности, геологоразведочной службы, с переходом предприятий на хозрасчет существенно изменились задачи МГРИ (как и других вузов) по подготовке молодых специалистов.

Так, уже в 1989/1990 учебном году многие специалисты были распределены по месту их работы на основании прямых договоров с производственными, проектными и научными организациями. Такие договора сейчас заключены до 1995 г. со 152 организациями, что полностью обеспечивает распределение выпускников.

В настоящее время МГРИ готовит специалистов по 7 специальностям, 23 специализациям и 23 индивидуальным планам (включая целевую интенсивную подготовку). Эти специальности и специализации следующие.

*Специальность 0801.* «Геологическая съемка, поиски и разведка», включающая следующие специализации: геологическое картирование и поиски месторождений полезных ископаемых; геология и разведка месторождений металлических, неметаллических полезных ископаемых и стройматериалов; геология и разведка месторождений редких и радиоактивных элемен-

тов; автоматизированные системы обработки информации в геологоразведке.

*Специальность 0802.* «Геофизические методы поисков и разведки». В рамках этой специальности готовятся инженеры-геологи, физики по специализациям: структурная геофизика; геофизические методы поисков и разведки твердых полезных ископаемых; геофизические методы поисков и разведки месторождений редких и радиоактивных элементов; геофизические исследования скважин; геофизическая информатика и математическое моделирование.

*Специальность 0803.* «Геохимия, минералогия и петрология», по которой из МГРИ выходят специалисты по «Прикладной минералогии алмазов, цветных, драгоценных и поделочных камней».

*Специальность 0804.* «Гидрогеология и инженерная геология включает три специализации: охрана геологической среды; геотехнологическая гидрогеология; специальная инженерная геология и гидрогеология.

*Специальность 0806.* «Технология и техника разведки месторождений полезных ископаемых» с пятью специализациями: технология и техника разведочного бурения; технология и техника бурения и оборудования геотехнологических скважин; технология и техника проведения горно-разведочных выработок; технология и техника разведки месторождений полезных ископаемых на морском дне; эксплуатация и ремонт геологоразведочного оборудования.

*Специальность 0714.* «Экономика и управление в горной промышленности и геологоразведке». Эта специальность имеет три специализации: экономика и планирование геологоразведочных работ; экономика и планирование горного производства; организация и планирование внешнеэкономических связей предприятия.

*Специальность 0902.* «Подземная разработка месторождений полезных ископаемых» с тремя специализациями: разработка месторождений геотехнологическими методами; подземная разработка месторождений цветных, редких и радиоактивных металлов; комбинированная разработка редких месторождений.

*«Специальность 0905. «Открытые горные работы».* МГРИ готовит специалистов по одной специализации — разработка россыпных месторождений.

Среди наиболее интересных и перспективных направлений индивидуальной подготовки специалистов можно назвать следующие. По договору с объединением «Камчатгеология» — геодинамическое картирование, крупномасштабная геологическая съемка вулкано-огненных поясов, поиски и разведка месторождений геотермальных вод. По договору с НПО «Недра» — комплексное исследование глубоких и сверхглубоких скважин. По договору с МНТК «Геос» — автоматизированные системы комплексной интерпретации геофизических данных. По договору с Мосинжстроем — технология и техника проведения выработки неглубокого заложения. По договору с Джезказганским ГМК — подземная разработка пластовых месторождений.

За последние 2—3 года после переезда МГРИ в новое учебно-лабораторное здание площадью более 30 тыс. м<sup>2</sup> существенно улучшились условия для организации учебного процесса: кафедры получили дополнительные рабочие помещения, организовали новые лаборатории, приобрели современные приборы и оборудование, в том числе вычислительную технику, создан информационно-вычислительный центр на 100 дисплейных мест. Сейчас общая стоимость имеющейся во МГРИ вычислительной техники составляет более 10 млн руб. За 5 лет обучения каждый студент имеет возможность использовать около 300 ч дисплейного времени. Именно столько времени занимались на дисплеях в 1990 г. все студенты геофизического факультета. Для других факультетов время работы студентов на ЭВМ за 5 лет составляет 100—150 ч.

В настоящее время компьютеризация образования — одна из важнейших задач МГРИ. Специалисты должны уметь выбирать варианты решений стоящих перед ними задач, т. е. искать наиболее эффективное решение, что невозможно без знания методов математического моделирования с использованием ЭВМ.

Применение ЭВМ в практической инженерной деятельности — это уже обязательное принципиальное условие подготовки современного специалиста.

Например в Хьюстонском университете в 1986 г. работало более 9 тыс. персональных компьютеров, т. е. примерно 1 компьютер на трех студентов, что позволяет каждому студенту работать за дисплеем по 4—5 ч в день. МГРИ должен готовить таких специалистов, которые не мыслили бы своей профессиональной деятельности без постоянного применения компьютеров. Они должны быть психологически и профессионально подготовлены к использованию ЭВМ в проектировании, производстве и управлении. Поэтому в учебном процессе основное назначение компьютеров должно заключаться в следующем:

быть инструментом получения знаний и навыков по инженерным, геологическим и физико-математическим дисциплинам;

использоваться для выполнения и оформления самостоятельных, домашних, лабораторных, курсовых и дипломных работ;

научить студента творческому подходу к использованию ЭВМ, в частности, к поиску новых, экономически и технически выгодных сфер применения компьютеров в их будущей профессиональной деятельности.

В подготовке молодых специалистов важное место занимает вопрос: как учить студентов? В нашем высшем образовании преобладает обычно информативный подход и чаще всего мы задаем вопросы: что?, где?, когда? И меньше: как? и почему? Поэтому выпускники вузов, придя на производство, часто не подготовлены к решению конкретных практических задач. Сейчас общая тенденция в мире — не заставлять студента учиться, а научить его учиться. Вот для этого и нужны компьютеры, и кроме того, новые хорошие учебники, модульное построение курсов, новые методы контроля знаний, тестирование и другие новые методы обучения. Особенно они важны для организации самостоятельной работы студентов. Нужен и новый подход к лекционным занятиям — на лекциях разбираются лишь самые сложные вопросы, даются самые последние сведения, не вошедшие в учебники.

Во МГРИ все большее место занимает модульный принцип построения курсов — прохождение по разделам (темам) курса с контрольными испытаниями по каждому из них: освоил



студент один модуль, выдержал контрольное испытание — переходит к следующему модулю.

Хочется обратить внимание на применение новой системы оценки знаний студентов. В американских университетах применяется система «пойнтрайтинг», или индивидуальный кумулятивный индекс студента. Смысл этой системы заключается в том, что все результаты текущего, промежуточного и итогового контроля оцениваются в баллах (не по посещаемости!). В семестре накапливается 10—12 оценок (в том числе домашних заданий, практических и курсовых работ). Через 3—4 модуля проводится испытание промежуточного уровня — это контрольная работа в аудитории в присутствии преподавателя, разрешающего пользоваться любыми материалами — книгами, справочниками, лекциями и т. п. Экзаменационная сессия во многих университетах США и Канады не имеет обучающей функции, как у нас. Там экзамены сдают через день и даже ежедневно, практически без подготовки, т. к. учитывается рейтинг студента. Смысл новой системы — стимулировать повседневную систематическую работу студента. При этом практически снижается роль случайности при сдаче экзаменов. Во МГРИ уже имеется некоторый опыт модульной системы обучения и рейтинговой системы оценки знаний. Его, безусловно, нужно накапливать, совершенствовать и применять значительно шире, т. е. переводить учебный процесс на эту новую систему. Проведенный в 1990 и 1991 гг. во МГРИ Госэкзамен по специальности, опыт бессессионного обучения на 4 и 5 курсах показал, что наши студенты не приучены учиться систематически. Это, естественно, не дает глубоких и прочных знаний, умений и навыков. Кроме того, студенты не умеют творчески мыслить, не научены правильно использовать полученные теоретические знания для решения практических профессиональных задач. Отсюда задача преподавателей — не заполнять память студента, а научить активному применению знаний. Что для этого нужно?

Шире практиковать проблемные лекции, семинары — дискуссии, лабораторно-практические занятия исследовательского характера, решение ситуационных задач, деловые игры, ком-

плексные курсовые и дипломные проекты по реальной тематике, самостоятельные занятия студентов с использованием ЭВМ (со свободным к ним доступом).

В Постановлении ЦК КПСС и СМ СССР № 325 от 13.03.87 г. «О мерах по коренному улучшению качества подготовки и использования специалистов с высшим образованием в народном хозяйстве» поставлена задача обеспечить переход к подготовке специалистов широкого профиля на основе сочетания фундаментальных общенаучных, общепрофессиональных знаний и направлений практической подготовки. В соответствии с этим постановлением в вузах вводится аттестация студентов дневных отделений по завершении изучения ими общенаучных и общепрофессиональных дисциплин. Цель аттестации — повышение персональной ответственности каждого студента за результаты своей работы по всем изучаемым предметам в целом, создание фундамента для последующего овладения специальными знаниями, умениями и навыками, необходимыми в практической трудовой деятельности по окончании вуза. Это очень большая задача, которую коллектив профессоров и преподавателей МГРИ должен решить в ближайшие 2 года, разработать научную методику такой аттестации. Одновременно стоит задача повышения квалификации преподавателей МГРИ в области научной организации тестирования, как прогрессивного метода обучения и контроля знаний студентов. В институте необходимо разработать автоматизированные контрольно-обучающие курсы, что могут выполнить преподаватели, владеющие методикой тестирования.

В заключение следует сказать о необходимости гуманитаризации во МГРИ. Без решения этой задачи нельзя говорить о полноценной подготовке специалиста. Перестраивают свои курсы кафедры общественных наук. Изменяется преподавание философии — наибольшее внимание уделяется человеку. Введен новый курс «Социально-политические учения», а также факультативы по этике, эстетике, логике. Подготовлены новые курсы по выбору: история изобразительного искусства, история религии, история рус-

ской философии, политология, социальная психология и др. На первом курсе в рамках основных часов читается новый курс «История русской культуры».

Таким образом, перед профессорско-преподавательским коллективом МГРИ

стоит задача — готовить таких специалистов, которые бы удовлетворяли новым требованиям нашего обновляющегося народного хозяйства и общества. Это сочетание высокого профессионализма с высокой общечеловеческой культурой.

© О. А. Собин, 1991

## **Факультет повышения квалификации**

О. А. СОБИН

Решение важнейшей задачи по укреплению и расширению минерально-сырьевой базы страны во многом зависит от обеспеченности геологоразведочного производства квалифицированными кадрами. В Мингео СССР постоянно ведется работа по обучению руководящих работников и специалистов в учебных заведениях и подразделениях отраслевой системы повышения квалификации. К таким учебным заведениям относится факультет повышения квалификации руководящих работников и специалистов Министерства геологии СССР, организованный в 1969 г.

За двадцать лет на ФПК института повысило квалификацию более 8 тыс. человек. В настоящее время за год на факультете проходят обучение до 600 человек.

С 1988 г. ведется работа по расширению факультета и увеличению числа слушателей за счет применения форм обучения с частичным отрывом их от работы. Группы с такой формой обучения комплектуются из специалистов, работающих на предприятиях Мингео СССР, расположенных в г. Москва.

С 1989 г. факультет формирует контингент слушателей на основе фактических заявок организаций и предприятий Мингео СССР на повышение квалификации своих специалистов на ФПК МГРИ.

На ФПК МГРИ повышают квалификацию с полным и частичным отрывом от производства руководящие работники и специалисты Мингео СССР, имеющие высшее образование. Продолжительность обучения с отрывом от производства один месяц.

Цель работы ФПК — пропаганда и распространение передового опыта и

научно-технических достижений ведущих предприятий Министерства и других отраслей народного хозяйства среди руководящих работников и специалистов Мингео СССР.

Учебная работа факультета ведется на основе конкретизации целей обучения за счет освоения слушателями новых профессиональных знаний, направленных на решение конкретных производственных проблем, повышения практической направленности учебного процесса применительно к определенным должностным категориям слушателей.

Учебно-материальная база ФПК, хотя в целом и соответствует целям и задачам повышения квалификации руководящих работников и специалистов геологоразведочного производства, однако постоянно укрепляется по мере совершенствования учебно-материальной базы института.

Повышение квалификации руководящих работников и специалистов Мингео СССР осуществляется по специализированным профилям: новейшие методы технологии поисков и разведки месторождений полезных ископаемых (геофизические методы поисков и разведки, геология и новейшие методы поисков и разведки черных и цветных металлов, горнохимического сырья); техника и технология геологоразведочных работ (бурение геологоразведочных скважин, совершенствование техники и технологии бурения скважин на воду, механизация и энергоснабжение, (горноразведочные работы); экономика и планирование геологоразведочных работ в условиях нового хозяйственного механизма (экономика и планирование, совершенствование труда и заработ-

ной платы, совершенствование финансирования и кредитования, оценка качества и надежности геологоразведочных работ).

Перевод факультета на хозрасчет потребовал большой целевой направленности в учебной работе за счет организации целевых групп по новым специализациям на основе заявок организаций Мингео СССР и других отраслей народного хозяйства, предложений преподавателей и специалистов.

К таким специализациям можно отнести: организация управления производством геологоразведочных работ (менеджмент в геологии); инженерная геология и методика инженерно-геологических исследований; геoinформатика при прогнозировании, поисках, разведке и оценке месторождений полезных ископаемых; современное состояние и пути развития геодезическо-маркшейдерских работ при поисках и разведке месторождений полезных ископаемых.

Учебные планы и программы на ФКП предусматривают изучение следующих дисциплин: специализация (в соответствии со специализацией); общественно-политический раздел; техника и технология геологоразведочных работ, в т. ч. охрана окружающей среды; экономика и управление; использование вычислительной техники в геологии; трудовое и хозяйственное законодательство.

Учебный процесс включает лекционные, практические и семинарские занятия, обмен опытом, научно-практические конференции, выездные занятия на передовых предприятиях, в минералогических и геологических музеях Москвы, павильоне «Геология» ВДНХ СССР.

В процессе учебы слушатели пишут реферат на одну из актуальных тем геологоразведочного производства (материалы для написания реферата слушателям рекомендуется брать в организации, где они работают).

Особенностью организации учебного процесса на ФКП является то, что актуальность разрабатываемых учебных программ и уровень их реализации (в содержательной части) обеспечивают кафедры института, которые курируют конкретные специализации.

В учебном процессе на факультете повышения квалификации участвуют

ведущие профессора и доценты профилирующих кафедр МГРИ, известные ученые и ведущие специалисты научно-исследовательских и проектно-конструкторских и производственных организаций Министерства геологии СССР. В 1989 г. число ученых и специалистов, привлеченных к участию в учебном процессе на ФПК, составило 130 человек, из них около 40 % докторов наук. Такая система преподавания способствует обогащению современными знаниями как преподавателей МГРИ, так и специалистов-производственников.

По завершении занятий среди слушателей факультета проводится анкетирование. В абсолютном большинстве анкет учебный процесс как по уровню его организации, так и по его результатам оценивается положительно.

Слушатели ФКП могут пользоваться библиотекой института, которая обеспечена литературой по всем специализациям. Практически слушатели имеют возможность ознакомиться с большинством литературных источников, которые рекомендуют преподаватели. Они знакомятся не только с последними научно-техническими достижениями и производственным опытом передовых организаций и предприятий Мингео СССР и других отраслей народного хозяйства, но также посещают театры, музеи, выставки, памятные места Москвы.

На факультете постоянно ведутся учебно- и научно-методические работы по повышению качества учебного процесса. ФПК принимает участие в работах института по разработке тестов различных дисциплин, что является первым этапом подготовки и перехода к новым информационным технологиям обучения и повышения квалификации.

В настоящее время коллектив факультета решает важные задачи по повышению эффективности и качества учебного процесса: ориентация на оперативное овладение руководящими работниками и специалистами организаций и предприятий Мингео СССР новейшими достижениями науки, техники и технологии геологоразведочного производства, рационального и комплексного природопользования, бережного использования трудовых и материальных ресурсов; более широкое использование активных методов обуче-



ния, усиление его направленности за счет формирования у слушателей умения и навыков активного применения полученных знаний для решения практических задач; постоянное совершенствование учебно-материальной базы факультета; участие ведущих ученых и специалистов отрасли в разработке и реализации учебных программ; тщательный подбор для учебного процес-

са преподавателей из числа ведущих ученых и специалистов отрасли и наиболее квалифицированных преподавателей МГРИ; разработка и реализация мероприятий по повышению эффективности учебного процесса на основе анализа предложений, содержащихся в выходных анкетах слушателей, на основе результатов входного контроля знаний слушателей.

## Региональная геология и тектоника

УДК 551.24(042)

© А. К. Соколовский, А. Е. Гольдин, 1991

### Актуальные вопросы геотектоники на XXVIII сессии Международного геологического конгресса

А. К. СОКОЛОВСКИЙ, А. Е. ГОЛЬДИН

На XXVIII сессии МГК (Вашингтон, 1989 г.) рассмотрены основные достижения в области геологии за прошедшие пять лет, выделены и проанализированы наиболее интересные из них, намечены важнейшие направления развития геологической науки.

Участники конгресса получили немало новой информации из самых разных областей геологии. Так, в докладе комиссии по стратиграфии МСГН сообщалось о том, что в отдельные интервалы мелового периода средняя поверхностная температура на Земле была примерно на 10 °С выше, чем в настоящее время. Теплолюбивые растения могли произрастать и в высоких широтах, что, безусловно, должно учитываться при палинпастических реконструкциях. Подкомиссия по стратиграфии докембрия довела до сведения делегатов схему чисто хронометрических подразделений докембрия, где границы определяются абсолютным временем без привязки к геологическим телам.

В ряде докладов было еще раз обращено внимание на импактное кратерирование (широко распространенное на ранних стадиях эволюции нашей планеты), следы которого все более стираются из-за постоянного обновления поверхности.

На форуме стал очевидным существенный прогресс в геологической интерпретации результатов глубинного сейсмопрофилирования (проекты «Ecors»,

«COCORP», «Lithoprobe» и др.). Подчеркнуты большие возможности объемного трехмерного анализа континентальной литосферы, трехмерного картирования и моделирования.

В ряде сообщений показано, что значительная часть континентальной коры сформировалась на ранних этапах развития Земли. Вместе с тем со средним протерозоем связывается возникновение коры в Северной и Южной Америке. В Скандинавии, Канаде и Сибири установлены офиолиты возрастом порядка 2 млрд лет.

Было подчеркнуто, что геология все более становится количественной наукой, геологи все чаще обращаются к информатике и моделированию. Об этом свидетельствуют, по словам президента МСГН У. Г. Кардани, компьютерный анализ развития осадочных бассейнов, сейсмическая томография Земли, численная стимуляция разработки нефтяных и рудных месторождений, цифровые банки данных, цифровая картография и т. д.

А каковы на общем фоне развития геологии особенности современной геотектоники? Какие проблемы обсуждались на сессии наиболее активно? Какие аспекты этой важнейшей геологической дисциплины выдвинуты на первый план? Участие в работе конгресса и анализ тезисов докладов позволили нам выделить три основные темы: тектоника террейнов, граница Мохо и глубинное строение Земли,

проблема задуговых бассейнов (ЗДБ). Несколько меньше внимания, на наш взгляд, было уделено сравнительной планетологии, ударным процессам и некоторым другим вопросам.

Проблема террейнов — безусловно наиболее яркая и интересная — буквально в течение нескольких лет приковывала к себе внимание тектонистов и была в той или иной мере затронута в большинстве докладов. Ряд сообщений был посвящен принципам выделения террейнов и их границ, обработке информации по террейнам и обозначению их на картах. Так, М. Б. Стефенс (Швеция) провел тщательный тектонический анализ каледонид Скандинавии с позиций тектоники террейнов. В пределах террейнов он предложил выделять блоки континентального и океанского происхождения, а также метаморфиты. Каждому террейну на карте и в легенде присваивается номер и для каждого из них составляется подробная таблица, которая включает три графы (стратиграфию, плутизм, деформации и метаморфизм) и, по существу, отражает историю геологического развития террейна. Схема восстановления истории террейнов предложена также в докладе К. М. Уилсона, К. Н. Волда с соавторами (США), где указывается на необходимость изучения фауны, офиолитов, коллизионных гранитов; обращено внимание на важность палеомагнитных исследований и датировку сутур. Практически в каждом докладе, посвященном рассматриваемой проблеме, подчеркивалось, что террейны ограничены тектоническими швами или сутурами.

Касаясь вопроса выделения границ террейнов, Р. А. Гибб, А. Г. Грин и М. Д. Томас (Канада) отмечают, что если палеомагнетизм — ключ к миграции террейнов, то анализ поля силы тяжести — один из важнейших методов выделения блоков и коллизионных швов. Особенно хорошо, по их мнению, коллизионные швы фиксируются по аэромагнитным аномалиям. При выделении коллизионных границ «континентальных коровых блоков» на юго-востоке Азии Н. И. Филатова (СССР) предлагает в качестве индикаторов учитывать: тектонические аллохтоны, представленные островодужными, окраинно-морскими и иногда офиолитовыми комплексами; метаморфические пояса зеленосланцевых и амфиболито-

вых фаций; цепочки анатектических гранитных плутонов; олистостромы; коллизионные депрессии, связанные с надвигами и выполненные молассаами.

Удачный пример совместного анализа палеомагнитных и палеоклиматических данных, позволившего проследить перемещение террейна в палеозое, привел в своем сообщении С. Ни (КНР). Выводы о палеоклиматических условиях сделаны им на основании изучения известняков, доломитов, рифовых построек, тиллитов и углей.

В докладе Х. Лапьерре (Франция) сделан обзор плейт-тектонических моделей геодинамической эволюции Кордильер в палеозое и мезозое и показано, что западная окраина Северной Америки представляет собой мозаику континентальных и (или) океанских фрагментов, претерпевших в мезокайнозойскую коллизию с Северо-Американским кратоном. Расхождения между предложенными моделями заключаются только в датировке коллизионных событий. Приведены данные о пяти орогенных эпизодах, однако их увязка с геологическими процессами кратонической части Северной Америки не проведена. Каждое из орогенных событий (экзотическое по отношению к континенту) представляет собой коллизию островной дуги и закрытие океанического и (или) задугового бассейна в  $O_3-S_1$ ,  $D_3$ ,  $P_3-T_1$ ,  $T_3-J_1$  и  $J_3$ .

О том, что в вопросе принципов выделения террейнов нет полной ясности и единого подхода свидетельствует материал по террейнам Северных Аппалачей, предложенный Дж. Д. Кеппие и Р. Д. Даллмейером (Канада, США). Разработанная ими классификация включает шесть довольно разнородных групп. Это: североамериканские террейны с гренвилевским основанием; тектонический меланж — блоки офиолитов, океанических и островодужных пород, заключенных в основную массу материала поднятия; террейны, сложенные образованиями позднедокембрийского континентального поднятия и кембрийско-ордовикской океанской литосферы, надвинутые на террейны первой группы; террейны, сложенные материалом магматических дуг; докембрийские террейны, представленные метаморфическими и вулканогенными образованиями; террейны Мегума — кембрийско-ордовикские турбидиты.

Переходя к краткому обзору докладов, посвященных докембрийским террейнам, следует отметить, что применимость механизма тектоники литосферных плит к докембрию оценивается (особенно в СССР) неоднозначно. Одни исследователи отрицают такую возможность, другие допускают включение этого механизма примерно 2 млрд лет назад. В. Е. Хайн и Дж. Лекорхе называют срок 2,5—3 млрд лет назад.

Р. А. Гибб, А. Г. Грин и М. Д. Томас подчеркивают, что если для 70-х годов характерен скепсис в отношении распространения постулатов тектоники литосферных плит на докембрий, то в 80-е годы получен материал в поддержку такой возможности. Ими установлен офиолитовый комплекс Кейп-Смит-Белт возрастом 1,9 млрд лет. С помощью геотраверса в провинции оз. Гурон выявлен характер границы архейских и протерозойских образований на глубине, напоминающей континентальную окраину. Северная часть Гренвильского фронта (нижняя кора с субгоризонтальными отражающими границами) интерпретируется как растянутая кора кратонической окраины провинции оз. Верхнее. Горизонты, залегающие выше, рассматриваются как поверхности срыва, возникшие в результате сжатия в пенокийское время (1,8 млрд лет назад). Еще выше развиты осадки континентального склона и шельфа, а также экзотические террейны.

Рассматривая тектонику северной части Северной Америки (Канада и Гренландия), П. Ф. Хофман (Канада) полагает, что этот кратон — продукт раннепротерозойской конвергенции плит, вызвавшей агрегирование группы архейских микроконтинентов, с которыми граничат аккрецированные раннепротерозойские террейны. Прото-кратон — агрегат архейских блоков, «спаянных» коллизионными зонами. Коллизионные зоны характеризуются наличием форландов (передовых частей), ограниченных складчато-надвиговыми поясами, включающими пассивные окраины и осадочные клинья передовых прогибов, и хинтерландов (тыловых частей), ограниченных магматическими (щелочными) поясами и зонами сдвигов и надвигов.

К близким выводам в отношении Балтийского щита пришел Р. Горбачев

(Швеция). Он предполагает, что к концу архея данный щит представлял собой кратон, состоящий из ряда контрастных террейнов. Так, Карельский террейн — стабильное ядро щита, типичный архейский гранит-зеленокаменный террейн. Беломорский пояс — высокометаморфизованный гнейсовый террейн с линейными складками. Кольский блок на ранних стадиях развития имел сходство с Карельским, но затем в ходе формирования крупных тектонических швов (сутур) и магматических процессов был преобразован и приобрел свою специфику. Аккреция новой коры происходила 2,6—2 млрд лет назад, рифтогенез обусловил отделение ряда окраинных блоков. Возраст офиолитов (1,97 млрд лет) близок к возрасту офиолитов Канадского щита. Аналогичных представлений о тектонике Балтийского щита, как следует из доклада, придерживается Г. Гаал (Финляндия).

Дж. П. Лекорхе (Франция) в сообщении «Аккреционная история террейнов Северо-Западной Африки» подчеркивает, что Западно-Африканский кратон «притягивал» к себе террейны с позднего протерозоя до палеозоя. Он полагает, что процесс начался 3 млрд лет назад и обусловил формирование части самого обширного щита архейского возраста. Вокруг кратона происходило аккрецирование островодужных и континентально-дуговых террейнов.

Материалы геотраверса через окраину гранулитового террейна Лимпопо позволили К. Роерингу с соавторами (ЮАР) предложить свою интерпретацию геологического развития этой части Африканского континента. Они полагают, что метаморфизм высокой степени имел здесь место 2,7 млрд лет назад и по времени совпал с орогенией, которая могла быть вызвана коллизией Зимбабвийского и Капваальского кратонов. Как гранулитовая область, так и примыкающий к ней гранит-зеленокаменный террейн прорваны поздние и посторогеническими плутонами гранодиоритов возрастом 2,2—2,4 млрд лет.

Согласно А. Кронеру (ФРГ), имеющиеся палеомагнитные данные по архейским и протерозойским кратонам свидетельствует о том, что континентальные плиты с раннего архея перемещались со средними скоростями, со-



поставимыми с современными. Наличие высокометаморфизованных гнейсовых комплексов возрастом 3,9 млрд лет говорит о существовании мощных подкоровых корней, которые экранировали в раннем архее континенты от теплового потока мантии. Тектонические особенности раннеархейских гнейсо-зеленокаменно-гранитных террейнов определяются ранней горизонтальной тектоникой, сходной с таковой современных коллизионных поясов. Вместе с тем сейчас отсутствуют данные, надежно подтверждающие наличие настоящей океанской коры в архее.

Высокая скорость роста коры в архее, которую трудно объяснить только аккрецией, по мнению А. Кронера, способствует популярности гипотезы магматического андерплейтинга, связанного с субдукцией или мантийными струями. Зеленокаменные пояса развивались около континентов (либо в их пределах) в виде рифтов или короткоживущих окраинных бассейнов. Высокая плавучесть ультраметаморфической коры обуславливает их обдукцию и является важнейшей причиной хорошей сохранности зеленокаменных поясов. Большая же часть океанской коры архейского возраста была субдуцирована и не сохранилась. Наличие протяженных подвижных поясов в конце раннего протерозоя (2,1 млрд лет назад), в частности на континентах Гондваны, свидетельствует о расчленении суперконтинента на фрагменты, которые затем вновь коллизировались с образованием подвижных поясов, фиксируемых в настоящее время.

В докладе «Структура коры Кордильер в западной части США по данным «COCORP» Э. Хойзер (США) сообщает о том, что вдоль линии разреза установлены плоскости срыва, переходящие в широкие отражающие зоны, которые в свою очередь переходят в границу Мохо. В связи с этим делается важнейший вывод о том, что граница Мохо по своей природе — поверхность срыва.

Как вытекает из доклада К. Д. Нелсона (США) «Динамичное континентальное Мохо; наблюдения, полученные МОВ», континентальная граница Мохо динамична, а океанская — стабильна. Этот вывод следует из сопоставления активных в настоящее время колли-

зионных орогенов с палеозойскими. В активных поясах (Альпы, Пиренеи, Гималаи) данные, полученные с помощью МОВ, свидетельствуют о наличии глубоких коровых корней, а граница Мохо, ограничивающая эти корни, имеет перепады более 10 км. Под палеозойскими орогенами кора тонкая (30—35 км против 50—70 км) с перепадами не более 3 км.

Переходя к третьей важнейшей проблеме геотектоники, обсуждавшейся на конгрессе, — задуговым бассейнам, следует в первую очередь отметить доклад Дж. В. Хаукинса (США) «Задуговые бассейны — их эволюция, геологические характеристики и важность в эволюции коры», в котором делается попытка показать, что ЗДБ являются местом формирования новой океанской коры в результате подъема мантийного материала, частичного плавления мантийных диапиров и внедрения толеитовых базальтов в линейные зоны растяжения. Тектономагматические процессы, а также геохимия формируемых коровых пород близки таковым в срединно-океанских спрединговых центрах. Многие из этих бассейнов располагаются над следами сейсмических зон, интерпретируемых как следы субдуцирования плит океанской литосферы. Большинство бассейнов, по мнению Дж. В. Хаукинса, существуют не более 7—10 млн лет, что говорит о их нестабильности. Химизм магм ЗДБ не обязательно предполагает непосредственное поступление материала из субдуцируемой литосферной плиты или мантийного источника, питающего островную дугу. Селективное обогащение некоторых бассейнов свинцом и стронцием может быть связано со смешением материала старой субдуцируемой литосферы и мантии.

Задуговые бассейны, наряду с островными дугами, являются важными районами генерации новой коры в океанской обстановке и, что особенно важно, служат источником образования многих (если не большинства) офиолитовых комплексов. Офиолитовая обдукция может быть обусловлена коллизией дуг и ЗДБ в случае, когда субдукция блокирована, но конвергенция плит продолжается.

П. Фрайер (США) в докладе, посвященном эволюции Марианского ЗДБ отмечает, что последний испытывает

активный спрединг, начавшийся 6,5 млн лет назад. Установлены структуры «протыкания» в заполненном осадками грабене, что, вероятно, свидетельствует о недавнем процессе вулканизма. Сложный состав магмы может быть следствием участия в ее формировании остатков существовавшей ранее островной дуги.

Значительная часть офиолитов Тетиса, судя по сообщению Дж. Малпаса (Канада), сформирована в результате растяжения коры над субдуцируемой плитой. Процесс аккреции океанской коры в обстановке окраинных бассейнов сопровождался образовани-

ем многочисленных независимых друг от друга магматических камер, содержащих магмы, возникшие за счет частичного плавления мантийного источника при различной степени депле-тирования.

Заключая краткий обзор важнейших докладов по геотектонике на XXVIII сессии МГК, следует отметить, что они послужат новым импульсом в изучении проблем, связанных с тектоникой террейнов, глубинным строением Земли и границы Мохо, задуговых бассейнов, т. е. проблем, к которым приковано пристальное внимание мировой геологической общественности.

УДК 551.242.055

© Коллектив авторов, 1991

## **Особенности строения фундамента Становой складчатой области**

С. Н. ГАВРИКОВА, А. К. СОКОЛОВСКИЙ, А. В. ГАЛАНИН,  
Л. Л. НИКОЛАЕВА, В. Н. ОРЛОВ, В. Я. ФЕДЧУК, Ю. Б. БАРАНОВ

Регионы Становой складчатой области многие годы поставляют ценные полезные ископаемые, среди которых особого упоминания заслуживают золото и молибден. Это обусловило пристальное внимание геологов к регионам, в результате чего получены данные о детально изученных различных структурно-вещественных комплексах, их соотношениях и эволюции континентальной коры от раннего докембрия до позднего мезозоя. Интерпретация строения фундамента Становой области (Становика) у разных исследователей весьма противоречива, что вызвано чрезвычайно сложным строением нижнего докембрия, а также недостаточным количеством геохронологических определений. Анализ мировой литературы последних лет по регионам раннего докембрия показал, что накопление геохронологических определений различных событий в раннем докембрии позволило выстроить детальные схемы развития отдельных регионов, показать их значительную неоднородность и присутствие в них многочисленных террейнов. Это побудило нас выполнить геохронологические определения для наиболее крупных комплексов пород центральной части Становика и на основе датировок рассмотреть особенности строения фундамента в ней.

Большинство исследователей Восточной Сибири включают Становую складчатую область в состав Алданского (Алдано-Станового) щита Сибирской платформы [3, 5]. На севере она отделена от Олекмо-Алданского региона Становым глубинным разломом, на юге по Монголо-Охотскому глубинному разлому граничит с Монголо-Охотской складчатой областью. На западе границей служит Витимский глубинный разлом, а на востоке она соприкасается с Джугджурской складчатой областью.

Сложность расшифровки неоднократных метаморфических событий, в которые были вовлечены структурно-вещественные комплексы, иллюстрируется наличием различных представлений о строении нижнего докембрия Становой области. Д. С. Коржинский (1939) одним из первых установил присутствие реликтов архейских регрессивно измененных гранулитовых комплексов в условиях амфиболитовой фации метаморфизма. Позднее С. П. Кориковский (1967) проиллюстрировал данный процесс сменой соответствующих парагенезисов минералов. В то же время оба исследователя отмечали присутствие прогрессивно метаморфизованных вулканогенно-осадочных отложений нижнего протерозоя, т. е. широко распространенный на Ста-

новике становой комплекс (становая серия) ими рассматривался как раннеархейский гранулитовый комплекс, регрессивно измененный в позднем архее. Последнее положение неоднократно дискутировалось в литературе. Так, Ю. К. Дзевановский (1958) полагал, что становой комплекс — это прогрессивно метаморфизованные вулканогенно-осадочные отложения. В. И. Шульдинер, Е. П. Миронюк и В. М. Кастрыкина показали, что регрессивный метаморфизм преобразовывает породы гранулитовой фации, в то же время известны случаи фациальной метаморфической зональности — смены по вертикали гранулитового метаморфизма амфиболитовым. В центральной части Становика установлено неоднократное проявление метаморфизма амфиболитовой фации. В одном случае он синхронен гранулитовому, в другом — амфиболитовый метаморфизм является регрессивным по отношению к гранулитовому.

В различных тектонических схемах Становая область характеризуется трехъярусным строением, отражающим три главных этапа ее развития. В основании залегают наиболее древние (по данным большинства исследователей — нижнеархейские) гранулиты, которые наблюдаются в виде отдельных выступов. Второй ярус сложен широко распространенными породами амфиболитовой фации (как правило, верхнеархейскими), третий — представлениями образованиями «трогового комплекса» (нижнепротерозойскими или верхнеархейско-нижнепротерозойскими), переработанными в эпидот-амфиболитовой и зеленосланцевой фациях.

Опираясь на изложенные выше выводы исследователей Восточной Сибири, мы выделили в центральной части Становика два полигона для детального изучения петрографии и геохимии пород и проведения геологического картирования с последующим отбором проб для геохронологических измерений. Один из них расположен в Могочинском районе, другой, включающий два участка, — в нижнем течении р. Гилуй и вблизи ст. Бельнякая на трассе БАМ — Тында — Нерюнгри. Результаты поэтапных исследований частично опубликованы [1, 6].

Установлено существенное различие в составе, структуре, типе метамор-

физма и возрасте пород фундамента полигонов, что послужило основанием для выделения в центральной части Становика двух раннедокембрийских геоблоков — Восточного и Западного, разделенных Джелтулакским разломом (рисунок).

Опубликованные в последнее время данные по Алданскому кратону и его обрамлению [3, 4, 5] свидетельствуют о значительном сходстве Восточного геоблока с южным обрамлением Алданского кратона. В то же время фундамент Западного геоблока резко отличается от такового как в сопряженном Восточном геоблоке, так и в других областях Алданского щита.

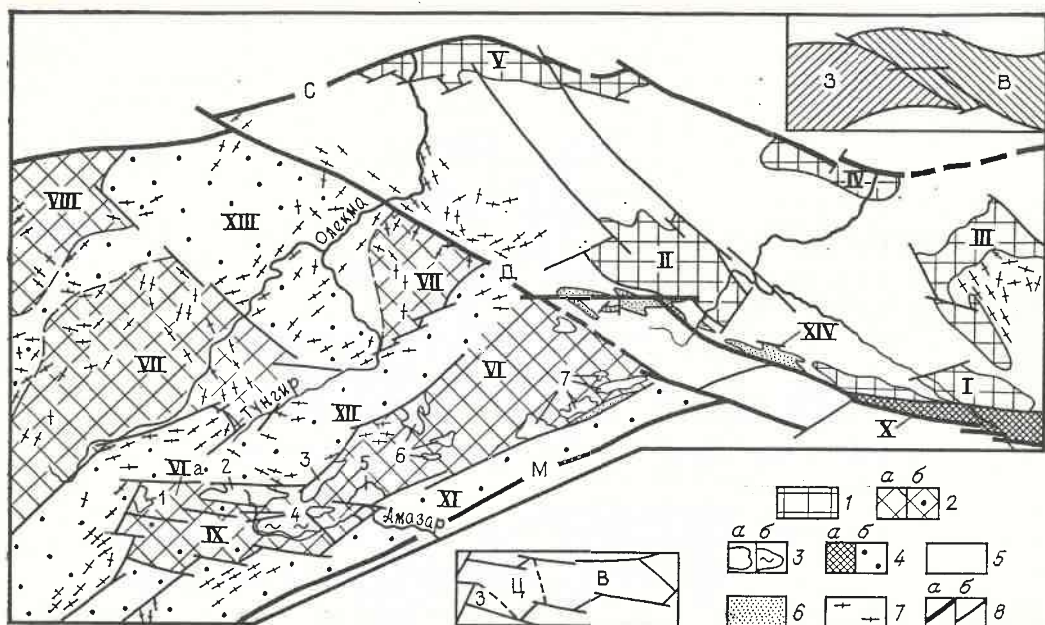
Рассмотрим черты сходства и отличия геоблоков более детально. Итак, в Восточном геоблоке, точнее в его центральной и восточной частях, наиболее древними породами являются вулканогенно-осадочные отложения, метаморфизованные в условиях гранулитовой фации. Существенный объем разреза составляют метapelиты — биотит-гранатовые с кордиеритом гнейсы с прослоями двупироксен-гранатовых кристаллических сланцев. Эта часть разреза известна в качестве зверевской серии, сходство которой с курультинской, развитой в юго-западном обрамлении Алданского кратона, подчеркивалось В. М. Кастрыкиной (1981) и позднее другими исследователями [5]. Отложения зверевской серии прослеживаются в виде небольших выступов вдоль р. Гилуй, известных как дамбукинская серия, в центральной части Становика.

В настоящее время возраст пород зверевской серии в пределах Становика достоверно неизвестен. Однако в результате геохронологических исследований, проведенных коллегами из Института геологии и геохронологии докембрия АН СССР совместно с зарубежными учеными, на площади развития курультинской серии (р. Олекма) установлен возраст гранатовых амфиболитов курультинской серии  $3,13 \pm 0,18$  млрд лет [7].

Как показали петрографические исследования на полигоне Восточного геоблока, гранулитовые породы зверевской серии неоднократно подвергались регрессивному метаморфизму различных *P-T* параметров.

В то же время были изучены наиболее древние породы Западного геобло-





**Схема тектонического строения фундамента:** позднеархейские структуры: 1 — выступы фундамента с фрагментами тоналитовой коры (I — Дамбукинский, II — Ларбинский, III — Брянтинский, IV — Верхнегилюйский, V — Зверевский); раннепротерозойские структуры: 2 — выступы фундамента, сложенные породами гранулитовой (а) и амфиболитовой (б) фаций метаморфизма (VI — Могоча-Урушанский гранулитовый пояс, VIa — Могочинский выступ его западной части, VII — Моклаканский, VIII — Каларский, IX — Амазарский выступ амфиболитов и биотит-амфиболовых кристаллосланцев Урюмского зеленокаменного пояса); 3 — выходы: а — гранулитовых пород (1 — Итакинский, 2 — Урюмский, 3 — Шуругинский, 4 — Чадорский, 5 — Амазарский, 6 — Кулин-

ская и 7 — Урушанская группы выходов); б — амфиболитов и биотит-амфиболовых кристаллосланцев; 4 — прогибы: а — зеленокаменные (X — Усть-Гилюйский), б — вулканогенно-осадочные неясной специфики (XI — Давенда-Урканский, XII — Тунгирский, XIII — Олекминский); 5 — нерасчлененные тектонические структуры; 6 — трюги (XIV — Желтулакский); 7 — гранитизация; 8 — разломы (а — глубинные: М — Монголо-Охотский, С — Становой, Д — Желтулакский), б — региональные и прочие разломы, ограничивающие тектонические структуры; на врезках: сверху — Восточный (В) и Западный (З) геоблоки; внизу — Западная (З), Центральная (Ц), Восточная (В) зоны Амазарского амфиболитового выступа

ка. Как указывали геологи-съемщики Могочинского района (В. П. Кирилюк, А. Ф. Озерский, В. И. Шульдинер, В. С. Алкин и др.) древнейшие образования здесь — это метаморфизованные в гранулитовой фации осадочно-вулканогенные породы, выделенные в могочинскую серию. На основании исследования циркона из различных пород могочинской серии нами вместе с Е. В. Бибиковой, а затем с А. Натманом (сотрудником Австралийского университета, Канберра) установлен возраст гранулитового метаморфизма в Могочинском блоке — 1,9 млрд лет [6]. Таким образом, фундамент геоблоков в Становой области имеет разный возраст: раннепротерозойский (гранулитовые породы) — в Западном, раннеархейский (гранулитовые породы) — в Восточном геоблоках.

В среднем течении р. Гилюй выявлено угловое и азимутальное несогласие между гранулитовыми породами зверевской серии и перекрывающими их вулканогенными отложениями, метаморфизованными в условиях амфиболитовой фации, известными как иликанская серия. Гранулитовые породы основания претерпели существенные регрессивные изменения (устные сообщения В. И. Фонарева и Д. Султанова). В верхней части разреза иликанской серии отмечаются горизонты высокоглиноземистых пород, превращенных в условиях высокотемпературной ступени амфиболитовой фации в биотит-гранатовые гнейсы с прослоями гранатосодержащих амфиболитов. По внешнему облику они напоминают регрессивно измененные породы зверевской серии. Только комплекс микро-

зондовых исследований в сочетании со структурными наблюдениями позволил их различить. Итак, метаморфизованные в условиях амфиболитовой фации отложения иликанской серии, которую Л. П. Корсаков (1985) включает в становой комплекс, представляют более верхние уровни метаморфизованной континентальной коры.

В среднем течении р. Гиллой нами выделен еще один существенно новый для Становика комплекс — тоналит-трондьемитовый. В результате геологического картирования установлено, что породы комплекса слагали достаточно крупные субвулканические и небольшие плутонические массивы, которые прорывали отложения иликанской серии. Авторами вместе с А. Натманом исследован циркон из метаморфизованных тоналитов. Как показало U-Pb изотопное изучение, возраст цирконов, кристаллизующихся из тоналитовых расплавов, составляет 2,8 млрд лет [6]. Следовательно, отложения иликанской серии (становой комплекс) древнее. Значительный интерес для тектонических и геодинамических построений представляют закономерности распространения тоналит-трондьемитовых пород. К сожалению, в настоящее время это сделать достаточно сложно, поскольку мы не располагаем надежной информацией о развитии комплекса в пределах Восточного геоблока. Однако подчеркнем, что южная его часть наиболее им насыщена.

Породы иликанской серии (становой комплекс), как и тоналит-трондьемитовый комплекс, испытали единый во времени и *P-T* параметрам высокотемпературный амфиболитовый метаморфизм. К сожалению, чрезвычайно трудно оценить возраст метаморфизма. Многократно предпринятые нами попытки оценки возраста метаморфизма по цирконам U-Pb методом пока не дали результата. Необходимо лишь отметить, что более поздние мигматиты, интенсивно развитые в тоналитовом комплексе, также были привлечены к U-Pb высокоточным измерениям. Как показал А. Натман, возраст мигматитов и сопряженного с ними регрессивного метаморфизма соответствует 1,94 млрд лет [6]. Если напомнить в возрастном порядке геологические события в Западном геоблоке,

то этой дате близок метаморфизм гранулитовой фации.

Таким образом, возрастные параллели между двумя блоками можно проводить только начиная с раннего протерозоя. В краевой части Восточного геоблока установлен протяженный вулканогенный прогиб, известный как Усть-Гилюйский зеленокаменный пояс. Точных датировок по вулканогенным породам пояса пока не получено. Однако геолого-структурные и петрографические наблюдения показывают, что образования Усть-Гилюйского зеленокаменного пояса, несомненно, формировались значительно позднее, чем тоналит-трондьемитовый комплекс. При сопоставлении мигматитов метаморфизованных пород пояса и мигматитов тоналитового комплекса существенных различий между ними не наблюдается. Вероятно, Усть-Гилюйский пояс сформировался до развития мигматитов, имеющих возраст 1,94 млрд лет.

В то же время метаморфизм пород Усть-Гилюйского пояса соответствует эпидот-амфиболитовой фации. Нет достаточных данных, свидетельствующих о метаморфической зональности от бортов пояса в глубь континента. Современные границы пояса — тектонические, осложненные пологими надвигами пластин на породы иликанской серии и тоналит-трондьемитового комплекса. Исходя из этого можно предположить раннепротерозойский возраст Усть-Гилюйского зеленокаменного пояса.

Отметим, что главные простирания тектонических структур в Восточном геоблоке — северо-западные, веерообразно расходящиеся в том же направлении.

В Западном геоблоке породы фундамента перекрываются вулканогенно-осадочными отложениями тунгирской серии, метаморфизованными в условиях среднетемпературной ступени амфиболитовой фации. Главнейшая ориентировка прогибов, выполненных тунгирской серией, северо-восточная (см. рисунок). Это направление унаследовано приразломными депрессиями и в мезозое. Последние, как правило, не выходят за пределы Западного геоблока и как бы экранированы Джелтулакским разломом.

Различия в строении геоблоков прослеживаются и в геофизических полях.



Так, судя по сейсмическим данным, полученным Н. К. Булиным и др. (1972), особенностью глубинного строения земной коры в пределах Западного геоблока, ограниченного Монголо-Охотским и Желтулакским разломами, является аномально-слабая расчлененность, выражающаяся в отсутствии здесь коррелируемых сейсмических границ обмена на глубине 12—32 и 42—46 км. Это свидетельствует о большей гомогенности коры по сравнению с Восточным геоблоком. Исходя из геофизических данных (Н. К. Булин и др., 1972), Западный геоблок характеризуется большей мощностью земной коры (до 40 км) по сравнению с сопредельными геоблоками.

Рассмотрим более внимательно структуру, разделяющую геоблоки. Желтулакский разлом глубокого заложения по сейсмическим данным представлен серией субвертикальных тектонических швов, проникающих до глубины 50—55 км и смещающих с небольшой амплитудой отдельные глубинные поверхности разделов внутри земной коры. В результате интерпретации гравиметрических данных установлено, что по зоне разлома происходит изменение мощности земной коры, причем Западный геоблок, расположенный к югу от разлома, характеризуется большей мощностью коры.

Хронологическое сопоставление геологических событий в двух геоблоках в настоящее время практически невозможно из-за недостатка геохронологических определений. Однако геологические соотношения различных комплексов, установленные в двух геоблоках при геологическом картировании, позволяют охарактеризовать основные структурные элементы, которые они слагают. Наиболее изучен Западный геоблок. В нем выявлено три крупных выступа гранулитового фундамента — Могоча-Урушанский, Моклаканский и Каларский (см. рисунок). Между ними расположены Давенда-Урканский, Тунгирский и Олекминский прогибы, сложенные существенно осадочными породами, метаморфизованными в мусковит-биотит-ортоклаз-силлиманитовой субфации амфиболитовой фации.

Могоча-Урушанский гранулитовый выступ имеет форму пояса, который вытянут в северо-восточном направлении и объединяет группу разобщенных выходов гранулитовых пород. Эту

структуру можно назвать Могоча-Урушанским гранулитовым поясом, складчатые формы в котором имеют преимущественно северо-западное простирание, несколько варьирующее в центральной и восточной частях. Северо-западная ориентировка складчатых форм слегка «просвечивает» в гранитизированных полях Моклаканского выступа.

Западная часть пояса известна в литературе как Могочинский выступ гранулитов, объединяющий Итакинский, Урюмский и Шуругинский выходы. На юго-западе пояс контактирует по субширотному разлому (отчетливо интерпретируемому по гравиметрическим данным) с Амазарским выступом амфиболитов. Последний приурочен к северо-восточному флангу Урюмского зеленокаменного пояса [2].

Однотипность складчатых форм в сопряженных поясах, намечающаяся тенденция к метаморфической зональности (от выступа амфиболитов в направлении к гранулитовому поясу), а также проявление в двух структурах разновозрастной раннепротерозойской гранитизации, преобразовавшей в мигматиты как породы гранулитовой, так и амфиболитовой фаций, позволяют предположить (как это сделал В. И. Шульдинер, 1969), что эти структуры претерпели синхронный метаморфизм и складчатость в раннем протерозое под влиянием одних и тех же, возможно синаккреционных, процессов. Нами проведено геохимическое изучение наиболее представительных пород в сопряженных поясах [1, 2]. В результате установлено сходство метабазальтов Могоча-Урушанского пояса с базальтами толеитовой и известково-щелочной серий, причем наиболее распространены первые из них. Интересно отметить, что в разрезе могочинской серии присутствуют метабазальты, подобные толеитам краевых морей, в частности моря Скоша. В целом разрез пород Могоча-Урушанского пояса сформировался в шельфовой обстановке, возможно, переходящей в окраинное море (доля метабазальтов в разрезе увеличивается в юго-западном направлении).

Метабазальты Урюмского зеленокаменного пояса, изученные главным образом на примере Амазарского выступа амфиболитов, сопоставляются с базальтами основания островных дуг,



особенно близки они толентам Алеутской дуги. Отсюда следует предположение, что Урюмский зеленокаменный пояс в прошлом представлял собой островную дугу. Что же касается высокотемпературного метаморфизма пород пояса, то можно предположить, что это результат синаккреционных процессов.

Итак, в фундаменте Западного блока можно выделить типичные для раннедокембрийских областей структуры — гранулитовый и зеленокаменный пояса.

Характерная особенность геологического строения Западного блока — насыщенность его продуктами гранитизации. Как показали петрографические исследования, процессы гранитизации в регионе происходили, по крайней мере, дважды. Ранний из них сопряжен с гранулитовым и амфиболитовым метаморфизмом соответственно в Могоча-Урушанском и Урюмском поясах. Более поздний процесс гранитизации протекал с большей интенсивностью, в результате сформировались крупные гранито-гнейсовые массивы нередко в виде куполов. Процессы поздней гранитизации преобразовали также субстрат тунгирской и никиткинской серий.

В целом, несмотря на возрастное различие, процесс гранитизации включает следующие стадии: поступление воднощелочного флюида; взаимодействие флюида с веществом коры на разных глубинах, обусловившее образование метасоматических зон фельдшпатизации; парциальное плавление метасоматитов в присутствии флюида с образованием гранитных расплавов; сегрегация мелких капель расплава в более крупные обособления, перемещение их в ослабленные зоны с элементами магматического замещения окружающей среды.

Установлено, что с омоложением процессов гранитизации их интенсивность нарастает. Причин этой тенденции может быть несколько. В течение предшествующей гранитизации континентальная кора все более становится кремнекислой, способствует выплавлению гранитной эвтектики. Не менее важен состав флюида и его количество в континентальной коре. Учитывая экспериментальные и расчетные данные моделирования процесса гра-

нитизации, проведенного В. А. Жариковым с сотрудниками (1989), можно полагать, что больший объем плавления субстрата определяют существенно водный состав флюида и его количество.

Однако для создания тектонической модели гранитизации нужны дополнительные геохимические и геологические исследования. Можно лишь подчеркнуть, что чрезвычайно широкое проявление гранитизации в рассматриваемых геоблоках требует пристального внимания в тектоническом аспекте.

Итак, мы попытались предложить вниманию читателей, прибегнув к конспективной форме, главные особенности строения фундамента в центральной части Становой складчатой области: его неоднородность и разновозрастность, своеобразие проявления различных структурных форм в нем. Установленная блоковая неоднородность может быть отражением террейновой тектоники, завуалированной последующими процессами.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гаврикова С. Н., Галанин А. В., Николаева Л. Л. Петрология и геохимия гранулитов Олекминского Становика (Северо-Восточное Забайкалье)//Изв. АН СССР. Сер. геол. 1985. № 7. С. 28—39.
2. Гаврикова С. Н., Галанин А. В., Николаева Л. Л. Раннедокембрийский основной магматизм южного края Сибирской платформы (на примере Амазаро-Гильюйского прогиба)//Геохимия. 1988. № 8. С. 1097—1101.
3. Дук В. Л., Кицул В. И. Основные черты тектоники раннего докембрия Алданского щита//Тектоника и вопросы металлогении раннего докембрия. М., 1986. С. 27—43.
4. Кастрыкина В. М., Ельянов А. А. Стратиграфия станового комплекса Нюкжинско-Тындинского междуречья и проблема структурно-фацальной зональности Джугджуро-Становой складчатой области//Ранний докембрий Алданского массива и его обрамления. Л., 1985. С. 69—91.
5. Эволюция раннедокембрийской литосферы Алдано-Станового региона/Под ред. Ф. П. Митрофанова.— Л.: Наука, 1987.
6. Gavrikova S. N., Nutman A. P., Chernyshev J. V. Geochemistry and SHRIMP U-Pb zircon geochronology of tonalites and mafic rocks from the Gilyny area, Stanovik, U. S. S. R.//Third international archaean symposium. Perth. Abstracts. 1990. P. 127—130.
7. Jahn B.-M., Gruau G., Bernard-Griffiths J. et al. The Aldan Shield, Siberia: geochemical characterisation, ages, petrogenesis and comparison with the Sino-Korean Craton//Third international archaean symposium. Perth. Abstracts. 1990. P. 179—181.

## Позднеорогенные структуры Корякского региона

Н. П. КОСТЕНКО, Н. И. КОРЧУГАНОВА

Нами рассматривается последний отрезок геологической летописи Корякского региона, занимающий весьма малую часть неогена, но имеющий большое практическое значение. В неогене выделены три типа тектонического режима. Первый — платформенный — характеризуется постоянством знаков вертикальных движений и незначительными скоростями, длительным периодом развития. Второй — геосинклинальный (в традиционной терминологии) — отличается мобильностью, преобладанием отрицательных тектонических движений, большими скоростями и масштабами вертикальных и горизонтальных перемещений, интенсивной складчатостью и магматизмом. Третий — орогенный — мобильный, с высокой контрастностью тектонических движений, часто с интенсивным эффузивным магматизмом. Если разновозрастные платформы и складчатые области можно изучать по геологическим разрезам, то орогенный режим в областях денудации известен только для неотектонического этапа и поэтому его характеристики ограничиваются кайнозойским отрезком времени.

Под термином «орогенный» нами понимается тектонический режим, обуславливающий формирование рельефа горных стран. Последний представляет собой системы поднятий и впадин, выполненных молассами, взаимосвязанные в своем развитии в пространстве и времени. В случае полного развития орогена (Н. П. Костенко, 1985) можно выделить равноценные структурные формы первого порядка: горное сооружение, состоящее из хребтов-поднятий и горных впадин, и сопряженные с ним межгорные и предгорные впадины. Межгорная впадина отделяет одно горное сооружение от другого, а предгорная находится на границе окраинного (по отношению к данной области горообразования) горного сооружения и равнин платформенных областей.

Орогены формируются как на разновозрастных платформах (эпиплатформенные), так и в складчатых областях (эпигеосинклинальные) [5]. В их

развитии выделяются ранний и поздний этапы. На первом этапе (преимущественно олигоцен — ранний миоцен) зарождаются орогенные деформации, на втором (поздний плиоцен — четвертичный период) происходит их дальнейшее развитие.

Изучение орогенных деформаций и рельефа различных регионов (Н. П. Костенко, 1972) позволяет сделать ряд уточнений. К раннеорогенному этапу (олигоцен — миоцен) относится зарождение и становление основных областей конседиментационных прогибаний и преимущественно кондендационных поднятий с преобладанием первых. На главном этапе (поздний миоцен — ранний плиоцен) формировались конэрозионные поднятия, было достигнуто примерное равенство положительных и отрицательных деформаций как по площади, так и по скорости развития. Заключительный этап, или позднеорогенный (поздний плиоцен — антропоген), отличается значительным расширением площади поднятий за счет сопредельных впадин. В наиболее крупных отрицательных структурах первого порядка — межгорных и предгорных впадинах — наблюдается воздымание их краевых частей с образованием предгорий и расчленением единой седиментационной депрессии внутридепрессионными поднятиями на ряд частных остаточных впадин. В области общего поднятия — горного сооружения — происходит полное или значительное отмирание всех горных впадин. Заключительный позднеорогенный этап находится в начале своего развития. В дальнейшем процесс отмирания впадин, вероятно, будет продолжаться на фоне уменьшения интенсивности воздымания и закончится общим снижением горного сооружения и выравниванием рельефа.

В Корякском регионе появлению конэрозионных структур, по-видимому, предшествовало общее выравнивание, в результате которого, согласно Ю. П. Барановой, С. Ф. Бискэ (1964), в первой половине плиоцена сформировалась региональная поверхность. В горах она поднята на высоту более







мационным зонам (Корякско-Западно-Камчатской, Корякской и Олюторско-Восточно-Камчатской [1]) или меловому аккреционному комплексу Охотско-Чукотского окраинно-континентального вулканического пояса (включая фронтальную невулканическую дугу) и позднемеловому — палеогеновому обдукционному офиолитовому комплексу Олюторской зоны [4].

В Корякском горном сооружении ярко выражена продольная зональность орогенных структур. Крупные зоны поднятий 7—10 северо-восточного простирания представлены Западной зоной, состоящей из двух мегаблоков, Центральной, которая отличается небольшими плановыми и высотными характеристиками, и Восточной, протягивающейся неширокой полосой вдоль Берингова моря.

Пенжинско-Анадырская межгорная впадина сформировалась в пределах одноименной структурно-формационной зоны [1] или Пенжинско-Анадырской и Таловско-Пекульнейской зон [7]. К современной эпохе впадина значительно сократилась, что отразилось на строении рельефа. В ее пределах выделены краевые и центральные плейстоценовые поднятия (имеется в виду время их становления в рельефе). Центральные представлены внутридепрессийными грядами, которым соответствуют кулисно подстраивающиеся складки северо-восточного простирания 5. Краевые поднятия генетически и морфологически связаны с горным обрамлением и формируют обширные зоны предгорий. Суммарные амплитуды поднятий составляют 300—900 м.

Корякское горное сооружение и Пенжинско-Анадырская межгорная впадина разделены Рекиннинско-Майнским разломом. Последний на значительном протяжении наследует простирание региональных и локальных разрывов более древнего заложения, отличается прямолинейностью в плане и сопровождается мелкими впадинами, косо ориентированными поднятиями, зонами трещиноватости и разрывов, обуславливающими структурный рисунок, характерный для сдвигов. Вертикальная составляющая по разлому достигает 500 м и более. По-видимому, формирование этого разлома — передового фаса Корякского горного сооружения — происходило при релаксации

тектонических напряжений на границе «поднятия—впадина». На это указывают структурный рисунок разлома на его северо-восточном отрезке в виде «конского хвоста», ориентированные по направлению движения окраинно-депрессийные поднятия, а также крупная кольцевая структура тектономагматического генезиса, расположенная на юго-западном погружении. Такие данные позволяют с большой степенью вероятности относить Рекиннинско-Майнский разлом к левостороннему сбросо-сдвигу.

Вывенско-Хатырский трансрегиональный разлом разделяет Центральную и Западную зоны поднятий. Его юго-западный отрезок совпадает с глубинным разломом доорогенного возраста, а северо-восточный — с разломами регионального ранга, фрагменты которых избирательно адаптированы к орогенному полю тектонических напряжений и создали новый структурный рисунок. Апуцкий разлом разграничивает Центральную и Восточную зоны поднятий и трассируется структурно-предопределенной долиной р. Апука субпараллельно береговой линии.

Корякскому горному сооружению свойственны мозаичность, неоднородный характер позднеорогенных разломов. Последние состоят из фрагментов разломов, как возникших в позднеорогенный этап, так и реанимированных в процессе горообразования. На космоснимках и топокартах наиболее отчетливо прослеживаются разломы, к которым приурочены орогенные долинообразные грабены, расчленяющие мегаблоковые поднятия. Краевые разломы горного сооружения менее четко выражены в связи с миграцией общего поднятия и формированием зоны предгорий.

Помимо продольной зональности, для Корякского горного сооружения характерна поперечная зональность, предопределенная секущими трансорогенными разломами северо-западного простирания — Дежневским, Олюторско-Окланским и др. (см. рисунок). Дежневский разлом тянется через Корякское горное сооружение в Пенжинско-Анадырскую межгорную впадину. Олюторско-Окланский линеамент неодинаково отчетливо прослеживается от Олюторского залива к Пылговаямской и Вывенской горным впа-

динам и через верховья р. Таловка в область Пенжинско-Анадырской межгорной впадины. Здесь он маркируется прямолинейным отрезком долины р. Белая. В пределах Ичигемской системы поднятий на продолжении линеймента расположена долина р. Оклан. На участке между указанными разрывами существенно изменяются высотные характеристики и строение мегаблоков. Центральный мегаблок отличается наибольшими абсолютными отметками (более 2000 м), северо-восточный (до 1000 м) испытывает виргацию структурных форм, юго-западный понижается в направлении к Олюторскому заливу, разделен на ряд узких и низких блоков.

Таким образом, зональность Корякского горного сооружения обусловлена диагональной системой трансрегиональных разломов. Согласно продольные разломы северо-восточного простирания определяют границы основных орогенных поднятий и впадин, секущие (северо-западные) — дискретное изменение высоты мегаблоков и виргацию.

Формирование современной тектонической структуры Корякского региона, по мнению ряда исследователей [3, 6], происходило в обстановке сближения Евразийского континента с океаническими плитами, которое сопровождалось аккрецией островодужных комплексов к окраине континента и образованием сложных покровно-чешуйчатых структур.

В результате сравнения выделенных орогенных и доорогенных структурных форм установлены автономность нового тектонического плана и существенное изменение характера деформаций. Автономность заключается не только в возникновении зон мегаблоков, но и в частичном отмирании древних, хотя и весьма крупных разломов. Орогенные поднятия и впадины формируются в пределах разновозрастных структурно-формационных зон, а широко распространенные покровно-складчатые деформации служат основанием для новых структурных форм.

Корякский регион отличается от внутриконтинентальных орогенов (Тянь-Шаньского, Байкальского, Алтайского) проявлением в кайнозой интенсивной региональной вулканической деятельности, сопровождающейся ростом горного сооружения. Раннекайнозой-

ские вулканические структуры в целом дискордантны по отношению к позднеорогенным, хотя их отдельные элементы, особенно самые молодые вулканические образования, имеют рельефообразующее значение.

Из позднеорогенных структур исследуемого региона следует отметить трансконтинентальные субширотные и субмеридиональные линейменты и линейментные зоны. Субширотная линейментная зона [2] представлена субпараллельно и кулисно подстраивающимися структурными формами. Это Пареньская впадина, субширотные сегменты Пенжинской губы и одноименного прогиба 4, аномальный разворот структур в Пусторецком прогибе 6, а в Корякском горном сооружении — северная фронтальная граница Ватынского покрова. Значительная протяженность линейментной зоны, характер ее проявления в рельефе и структуре, приуроченность к ней центров дочетвертичных потухших вулканов среднего и основного состава, подворот к западу границ сводово-глыбовых поднятий Ичигемского горного сооружения, коленообразный изгиб границы аномальных геофизических полей позволяют интерпретировать западную часть данной зоны в качестве правового сдвига глубинного (верхнемантийного?) заложения с амплитудой смещения не менее 50 км.

Субмеридиональный линеймент, с которым связано образование северного сегмента Пенжинской губы, простирается к шельфу Берингова моря. Другой трансконтинентальный линеймент, установленный по геолого-геофизическим и дистанционным материалам [4], пересекает Пенжинско-Анадырскую межгорную впадину и Корякское горное сооружение. К нему приурочены наиболее высокие мегаблоки, меридионально ориентированные п-ов Олюторский и подводная возвышенность Ширишова. В приповерхностной позднеорогенной структуре линеймент проявлен фрагментарно.

Ортогональная сетка трансконтинентальных линейментов и линейментных зон, возможно, является отражением глубинного (верхнемантийного или верхнемантийного — нижнекорового) структурного плана, который «просвечивает» через орогенный структурный план. Последний характеризуется северо-восточным простиранием основ-

ных позднеорогенных структур, осложненных секущими трансрегиональными разломами северо-западной ориентировки. «Перекрестный» структурный план, очевидно, обусловлен наличием различных полей напряжений на коровом и верхнемантийном (нижнекоровом — верхнемантийном) уровнях. Общее северо-восточное простирание позднеорогенных структур Корякского региона, по всей вероятности, объясняется давлением со стороны Тихоокеанской плиты, продолжающимся в антропогене. Однако не все особенности строения орогена и прежде всего общая направленность формирования структурных форм, сопровождающегося расширением площади поднятий в процессе воздымания и отмирания отрицательных структур, обусловлены влиянием исключительно этого процесса.

Итак, позднеорогенные структуры Корякского региона характеризуются автономностью и во многом дискордантны по отношению к доорогенным структурам. Активные разломы неоднородны и состоят из новообразован-

ных и древних реанимированных фрагментов. Существование в новейший этап разновозрастных, но различных структурных планов (ортогонального и диагонального), по-видимому, свидетельствует о тектонической расслоенности литосферы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Геологическая карта СССР. Р-58, 59/Отв. ред. В. В. Ковалева.— Л.: ВСЕГЕИ, 1986.
2. Использование материалов космических съемок при региональных геологических исследованиях/Под ред. Н. В. Межеловского. М.: Недра, 1985.
3. Колтыгин А. В. Палеогеодинамический анализ строения и развития земной коры южной части Корякского нагорья: Автореф. дис. канд. геол.-минер. наук.— М., 1988.
4. Космогеология СССР/Н. С. Афанасьева, В. И. Башилов, В. Н. Брюханов и др. М.: Недра, 1987.
5. Николаев Н. И. Новейшая тектоника и геодинамика литосферы.— М.: Недра, 1988.
6. Тектоническая аккреция Северо-Востока СССР/Ю. М. Пушаровский, А. О. Мазарович, С. Д. Соколов, Н. В. Цуканов//Тектонические процессы. М., 1989. С. 89—100.
7. Шапиро М. Н. Проблемы аллохтонных блоков в структуре Северо-Востока СССР//Тектонические процессы. М., 1989. С. 101—112.

## Геофизика

УДК 550.837.83 : 553.98

© Коллектив авторов, 1991

### Применение аэроэлектроразведки при прогнозировании нефтеперспективных участков

[Р. М. КАМЕНЕЦКАЯ], Ф. М. КАМЕНЕЦКИЙ, В. А. МАМАЕВ,  
Т. Р. ОЗОЛИНА, В. М. ТИМОФЕЕВ

Электромагнитные геофизические методы, реализуемые при помощи установок, размещаемых на борту летательных аппаратов, широко применяются в мировой практике, особенно при поисках минерального сырья на обширных труднодоступных и удаленных территориях, требующих неприемлемых затрат труда и времени. На долю одного из ведущих — импульсного индукционного метода, известного как аэровариант метода переходных процессов (АМПП), — приходится около 70 % мирового объема аэроэлектроразведочных работ. Метод реализуется в основном с использованием канадской станции ИНПУТ [6].

Отечественный вариант АМПП разработан в лаборатории электромагнит-

ных геофизических методов МГРИ совместно с Физико-механическим институтом АН УССР и объединением Центрgeoфизика Мингео СССР. Первоначально за рубежом и в СССР АМПП применялся главным образом для поисков месторождения хорошо проводящих массивных руд цветных и черных металлов, а затем и других твердых полезных ископаемых. Около 10 лет две аналоговые станции АМПП, размещаемые на вертолетах Ка-26, использовались Центрgeoфизикой при поисках сульфидных руд и кимберлитов в северных районах страны [1, 2, 3].

Дальнейшее развитие теории и практики применения АМПП показало, что этим методом может осуществляться



также картирование слабоконтрастных неоднородностей повышенного электрического сопротивления в проводящем разрезе. В 1985 г. Центр геофизической совместно с МГРИ проведены первые опытные работы по применению АМПП для прогнозирования нефтеносных площадей в Удмуртии [4].

Имеются многочисленные данные об использовании наземной электроразведки для выявления нефтеносных площадей. Однако аэроэлектроразведочные работы, по-видимому, были поставлены впервые. Во всяком случае, авторам не известны какие-либо советские или зарубежные публикации по этому вопросу. Между тем, по нашему мнению, в данном случае аэрометоды электроразведки имеют, по крайней мере, два явных преимущества по сравнению с наземными: подъем установки в воздух резко ослабляет влияние поверхностных неоднородностей, а высокая производительность и низкая стоимость позволяют выполнять площадные съемки с недоступной наземным методом детальностью.

Работы проводились в масштабе 1 : 50 000, т. е. расстояние между маршрутами 500 м. Такая густота сети обеспечивает надежность выявления аномалий, несмотря на то что нефтяные залежи в Удмуртии имеют сравнительно небольшие размеры. За полевой сезон средней продолжительности (примерно 4 мес.) с одним комплектом аппаратуры исследуется площадь 8—10 тыс. км<sup>2</sup>; стоимость работ — около 50 р./км<sup>2</sup>. Отметим также, что в отличие от исследований наземными методами съемка АМПП экологически чистая, т. к. производится без контакта с земной поверхностью.

Предпосылкой постановки работ АМПП для названной цели явились представления о физико-геологической модели нефтегазового месторождения, сформировавшиеся в ходе развития методики прямых поисков месторождений нефти и газа геофизическими и геохимическими методами [5 и др.]. Эта модель включает собственно залежь углеводородов и сопровождающий ее ореол эпигенетически измененных пород надпродуктивной толщи. Главные виды эпигенетических изменений — кальцитизация, доломитизация, окварцевание, во многих случаях также сульфидизация (чаще пиритизация) пород. Залечивание пор и тре-

щин высокоомными минеральными новообразованиями приводит к повышению электрического сопротивления пород на 30—50%, а вторичная сульфидная минерализация — к проявлению эффектов вызванной поляризации.

Таким образом, можно говорить о геоэлектрическом ореоле залежи УВ, который распространяется над ней, охватывая верхнюю часть разреза и нередко достигая поверхности. Оба названных фактора (увеличение сопротивления и вызванная поляризация) приводят к уменьшению сигнала АМПП — аномалиям АМПП над залежами УВ. Под воздействием тектонических и других факторов эпигенетические изменения пород могут развиваться не только над сводовой частью залежи, но и по ослабленным периферическим зонам или по секущему залежь разлому. Тогда могут возникать аномалии кольцевого или линейного типа и будет фиксироваться их смещение в плане.

Работы АМПП проведены в 1985—1989 гг. в Удмуртии и на прилегающих площадях Кировской области в объеме 38,09 тыс. км<sup>2</sup>. Промышленные залежи нефти приурочены здесь к девонским и каменноугольным отложениям, среди которых выделяется шесть основных нефтеносных комплексов (терригенных и карбонатных) мощностью от единиц до 40—60 м на глубинах 1—2 км. Среди структур первого порядка важнейшее значение в нефтеносном отношении имеет Верхнекамская впадина, занимающая восточную часть исследованной площади. Большая часть месторождений приурочена к структурам второго порядка, в пределах которых расположены наиболее крупные органогенно-карбонатные массивы — Чутырский, Мишкинский, Киянгопский и др. Размеры месторождений в плане — от одного до 10—15 км. Наиболее изучена южная часть Верхнекамской впадины, однако ее перспективные ресурсы в значительной мере исчерпаны. Поэтому актуально исследование северных частей впадины и прилегающего к ней с запада Татарского свода. Верхняя часть разреза (ВЧР) представлена кайнозойскими отложениями мощностью 0,5—30 м, под которыми залегают песчано-глинисто-карбонатные отложения перми (либо триаса и юры на северо-западе) общей мощностью 400—600 м.

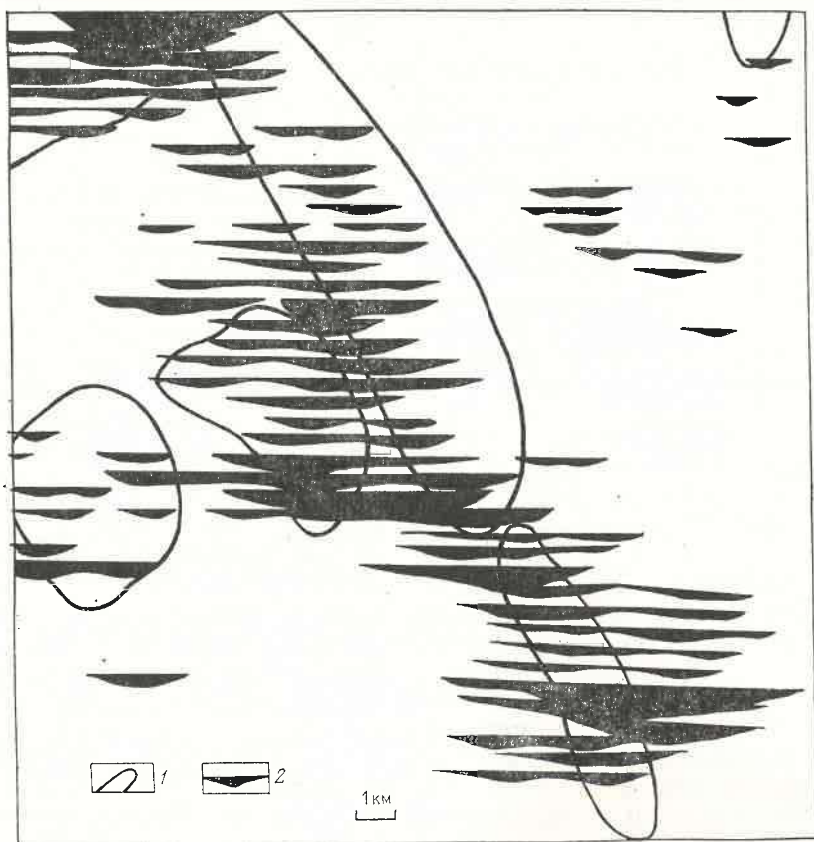


Рис. 1. Пример сопоставления аномалий АМПП с контурами месторождений нефти по данным бурения:

1 — контуры нефтеносности; 2 — аномалии АМПП, 20 мкВ/мм

Удельное сопротивление пород ВЧР изменяется в пределах 10—100 Ом·м, причем на большей части площади они однородны по этому параметру: 20—30 Ом·м — по данным ВЭЗ. Из материалов ВЭЗ над известными месторождениями нефти в районе следует также, что ореол в надпродуктивной толще распространяется на ВЧР, где сопротивление пород повышается на 40—50 %. Такие изменения могут вызывать заметные аномалии сигнала АМПП.

В 1985 г. была исследована Киенгоская площадь (3,38 тыс. км<sup>2</sup>), которая наиболее полно изучена сейсморазведкой и бурением. В ее пределах известны 22 нефтяных месторождения и 86 структур, подготовленных по сейсморазведочным данным. Эта площадь была выбрана в качестве опытного полигона для оценки эффективности метода [4]. Карты графиков аномалий АМПП по Киенгоской площади сопоставлены с контурами месторождений нефти, полученными по

данным бурения. Фрагмент такой карты показан на рисунке. Качественная корреляция данных АМПП и бурения очевидна. В целом аномалиями АМПП на Киенгоской площади отмечаются 18 из 22 известных месторождений (82 %) и 53 из 86 выявленных сейсморазведкой структур (62 %).

Эти данные можно дополнить вероятностными характеристиками. Введем обозначения; М — наличие месторождения,  $\bar{M}$  — отсутствие месторождения, А — наличие аномалии,  $\bar{A}$  — отсутствие аномалии, (М·А) — перекрытие аномалии и месторождения.

Вероятности  $p(A) = 0,25$ ,  $p(M) = 0,21$ ;  $p(M \cdot A) = 0,09$  рассчитаны по фактическим данным, т. е. по контурам аномалий и месторождений. По ним определены следующие параметры.

1. Отношение

$$\frac{p(A \cdot M)}{p(A) \cdot p(M)} = 1,71,$$

которое почти вдвое больше единицы, из чего следует, что А и М не есть не-

# Сравнение данных по опытной и общей площадям съемки АМПП

| Площадь съемки, км <sup>2</sup> | Объект исследования | Число месторождений и структур | В том числе подтверждены аномалиями АМПП | Процент совпадения |
|---------------------------------|---------------------|--------------------------------|------------------------------------------|--------------------|
| Опытная, 3380                   | Месторождения       | 22                             | 18                                       | 82                 |
|                                 | Структуры (с)       | 86                             | 53                                       | 62                 |
| Общая, 28 860                   | Месторождения       | 40                             | 27                                       | 68                 |
|                                 | Структуры (с+б+к)   | 294                            | 150                                      | 51                 |

Примечание: Структуры по данным: с — сейсморазведки, б — структурного бурения, к — космических снимков.

зависимые события, т.е. появление аномалии в большинстве случаев обусловлено наличием месторождения. Отметим, что здесь и далее фактическая вероятность  $p(A \cdot M)$  существенно занижена из-за естественного для любых геофизических и геохимических методов расхождения формы и смещения в плане контура аномалии относительно проекции залежи на поверхность (см. рисунок). Это обстоятельство ухудшает приводимые вероятностные характеристики.

2. Вероятность ошибки первого рода (пропуск месторождения)

$$p(M/\bar{A}) = \frac{p(\bar{A} \cdot M)}{p(\bar{A})} = \frac{p(M) - p(A \cdot M)}{1 - p(A)} = 0,16,$$

что значительно ниже 0,5.

3. Вероятность ошибки второго рода (ложная аномалия)

$$p(A/\bar{M}) = \frac{p(A \cdot \bar{M})}{p(\bar{M})} = \frac{p(A) - p(A \cdot M)}{1 - p(M)} = 0,20,$$

что также значительно ниже 0,5.

4. Частный коэффициент правдоподобия аномалий — отношение вероятностей истинной и ложной аномалий

$$\frac{p(A/M)}{p(A/\bar{M})} = \frac{p(A \cdot M)}{p(M)} : p(A/\bar{M}) = 2,15,$$

что значительно больше единицы.

Таким образом, вероятностные значения характеризуют высокую эффективность съемки АМПП по данным, полученным на хорошо изученной площади, несмотря на отмеченное в п. 1 обстоятельство, которое ухудшает эти оценки.

Как видно из сравнения данных по опытной и по общей площадям съем-

ки АМПП (таблица), процент совпадения аномалий с месторождениями и структурами по всей площади съемки несколько меньше, чем по опытной, но по-прежнему очень высокий для месторождений и ниже для структур. Однако не отмечаются, как правило, мелкие структуры. Кроме того, часть структур могут оказаться «пустыми».

Всего по результатам съемки выделено 332 аномалии АМПП. Одна аномалия приходится в среднем примерно на 115 км<sup>2</sup> как для опытной площади, так и для всей площади съемки. Значительная часть аномалий объединены в локальные, кольцевые и линейные группы.

В качестве наиболее перспективных площадей на слабоизученной части территории съемки АМПП в Удмуртии выделены: северная область интенсивных аномалий, приуроченных к Глазовскому и Неопольскому валам и продолжающихся на юг-юго-восток до пересечения с Карасавейским валом, где начинается зона известных месторождений на востоке Удмуртии (Пызепское, Кезское, Поломское и т. д.); северо-западная группа аномалий, большая часть которых формирует северо-западные и субмеридиональные линейные зоны в районе Унинского вала и к северо-западу от него.

В юго-восточной хорошо изученной части территории фиксируется ряд аномалий АМПП, совпадающих с сейсмическими структурами, которые могут быть рекомендованы к постановке глубокого бурения.

В 1990 г. опытные работы АМПП проведены на глубоко залегающем месторождении Тенгиз в Восточном Прикаспии. Получена четкая кольцевая аномалия, охватывающая месторождение Тенгиз, Королевское и Западно-



Королевскую нефтеносную структуру. Форма аномалии определяется солянокупольной тектоникой, формирующей преимущественно направления миграции углеводородов.

Таким образом, полученные количественные, в т. ч. вероятностные, оценки свидетельствуют о достаточно высокой эффективности применения АМПП для прогнозирования нефтегазоносных площадей путем картирования геоэлектрических ореолов над залежами УВ. При этом АМПП может быть применен на разных стадиях геологоразведочных работ: при региональных исследованиях — в качестве опережающего метода подготовки перспективных площадей для постановки наземных работ и при поисковых сейсморазведочных работах — в качестве дополнительного метода прямого поиска для оценки перспективности выявляемых объектов.

Перспективы дальнейшего развития АМПП и его применения в комплексе геофизических работ на нефть и газ связаны с созданием и внедрением полностью компьютеризированной технологии. Эта работа ведется совместно НПО Сибгео, МГРИ и Центр геофизикой. Переход от аналоговой регистрации данных АМПП к цифровой позволит улучшить метрологические ха-

рактеристики аппаратуры, увеличить глубинность исследований и перейти от профилирования к непрерывному зондированию верхней части разреза, а в результате — повысить достоверность прогнозирования месторождений нефти и газа по их геоэлектрическим ореолам.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каменецкая Р. М., Мамаев В. А. Аэроэлектроразведочные работы МПП//Разведка и охрана недр. 1978. № 6. С. 40—43.
2. Каменецкий Ф. М., Тимофеев В. М., Мамаев В. А. Аэроэлектроразведка методом переходных процессов. — М.: Недра, 1978.
3. Опыт применения аэроэлектроразведки методом переходных процессов в комплексе с квантовой магнитометрией//Ф. М. Каменецкий, В. М. Тимофеев, В. А. Мамаев и др. Экспресс-информация ВИЭМС. Сер. Разведочная геофизика. 1985. Вып. 9. С. 15—21.
4. Применение аэроэлектроразведки методом переходных процессов при прогнозировании нефтеносных площадей//Р. М. Каменецкая, Ф. М. Каменецкий, В. А. Мамаев и др.//Изв. вузов. Геология и разведка. 1988. № 9. С. 139—141.
5. Михальцов В. А., Киричек М. А., Петухов А. В. Прямое прогнозирование месторождений нефти и газа с применением комплекса геофизических и геохимических методов//Тр. XXVIII МГК. 1984. Секция 08. Т. 8. С. 134—152.
6. Konings M., Lagenby P. G., Becker A. Helicopter INPUT-two years of experience Abstracts of 46-th Meeting EAEG, London. UK, 1984.

УДК 550.838.4

© М. И. Плюснин, С. И. Билибин,  
С. В. Бабков-Эстеркин, 1991

## Совершенствование методики и техники измерений магнитной восприимчивости пород

М. И. ПЛЮСНИН, С. И. БИЛИБИН, С. В. БАБКОВ-ЭСТЕРКИН

Для измерения магнитной восприимчивости пород используются серийные скважинные и лабораторные приборы, обеспечивающие точность  $5 \cdot 10^{-4}$  СИ. Однако для исследования горных пород и руд с низкими значениями параметра эти приборы оказались не пригодными.

По результатам измерений на образцах была установлена связь между литологической и фациальной изменчивостью осадочных пород и их магнитной восприимчивостью. Но до недавнего времени эти исследования не проводились в связи с отсутствием аппаратуры. Магнитная восприимчивость

осадочных, метаморфических и других слабомагнитных пород изменяется в диапазоне  $1 \cdot 10^{-4}$ — $10^{-2}$  СИ. Поэтому чувствительность аппаратуры для измерений на образцах должна составлять  $1 \cdot 10^{-6}$ , а для скважинных  $3 \cdot 10^{-6}$ — $5 \cdot 10^{-6}$  СИ.

Во МГРИ разрабатывается комплексный аппаратный ряд высокоточных измерителей магнитной восприимчивости, обеспечивающих возможность получения данных на всех стадиях геофизических работ. Он включает высокоточную аппаратуру для измерения образцов и керна, аппаратуру для непрерывного измерения

магнитной восприимчивости шлама, приборы для измерения в скважинах, на поверхности или по стенкам горных выработок.

Основные требования к аппаратуре следующие.

Для лабораторных измерителей магнитной восприимчивости керна должна быть обеспечена возможность исследования образцов любой формы без их специальной подготовки. Измеренное значение должно отражать среднее представительное значение параметра для всего образца в целом.

Для проточных датчиков магнитной восприимчивости шлама, получаемого при бурении с гидротранспортом, должны быть обеспечены непрерывность измерений, термостабильность, помехозащищенность от внешних электрических и магнитных полей.

Для скважинных приборов каротажа магнитной восприимчивости необходимо минимизировать влияние переменного диаметра скважины, металлической крошки на стенке скважины, температуры и т. д.

При разработке комплексного ряда аппаратуры использован единый подход к измерительным преобразователям-датчикам. Все датчики представляют собой глубоко компенсированные индукционные системы, состоящие из генераторных, измерительных и компенсационных катушек. Решены вопросы оптимизации геометрических условий измерений, проведены опытно-конструкторские разработки, изготовлены действующие приборы, проведены полевые испытания в различных условиях.

С 1983 г. разрабатывается аппаратура высокочастотного каротажа магнитной восприимчивости (ВКМВ) и проводится ее опробование в скважинах различного назначения. Ранее для КМВ использовались одно- и двухкатушечные дипольные зонды, которыми измеряется напряженность поля магнитного диполя, а кажущаяся магнитная восприимчивость подвержена влиянию локальных неоднородностей. Это создает высокий уровень помех от самой скважины и ближней зоны. В разработанной аппаратуре использован новый тип измерительных преобразований — соленоидный зонд. Главное отличие соленоидного зонда от дипольного в том, что он состоит из двух соосных длинных катушек — ге-

нераторной и измерительной, и расположенной между ними короткой компенсационной катушки, включенной встречно-последовательно в цепь измерительной, причем расстояние между генераторной и измерительной катушками (длина зонда) намного меньше их длины. Генераторная катушка питается переменным током с частотой около 1 кГц, в системе измерительной и компенсационной катушек измеряется наведенная ЭДС. Использование такого зонда для ВКМВ позволяет перейти к измерению более однородного магнитного поля, а сам соленоидный зонд рассматривать как совокупность восьми «магнитных» потенциал-зондов, образованных точечными магнитными полюсами, расположенными на концах катушек. Пространственные характеристики зонда в основном определяют положение полюсов на сближенных концах генераторной и измерительной катушек. По аналогии с методом кажущегося сопротивления в соленоидных зондах осуществлен переход от разностных градиент-зондов к потенциал-зондам.

Результаты расчетов и физическое моделирование показывают, что соленоидные зонды характеризуются повышенной чувствительностью к локальным неоднородностям на стенке скважины, большой радиальной глубиной исследования, благоприятной для интерпретации формой кривой, не осложненной краевыми и граничными эффектами. Благодаря малому расстоянию между измерительной и генераторной катушками соленоидный зонд имеет большой уровень полезных сигналов и высокую разрешающую способность по вертикали. Компенсационная катушка выполняет также роль фокусирующей. Это дает дополнительную возможность подбором коэффициента фокусировки добиться исключения влияния скважины.

При разработке скважинной аппаратуры на основе соленоидного зонда была обеспечена высокая стабильность системы для поддержания высокого уровня компенсации ЭДС прямого поля при механических и температурных изменениях.

Были разработаны, изготовлены и опробованы в скважинах приборы ВКМВ с соленоидными зондами различной длины и с различным параметром фокусировки (таблица). Иссле-

| Характеристики                                      | КМВ-ИК-36;<br>ШЭМК<br>Зонд $L=0,08$ м | КМВ-ВТ<br>Зонд $L=0,15$ м           |
|-----------------------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|
| <b>Технические</b>                                  |                                       |                                     |
| Чувствительность, СИ                                | $3 \cdot 10^{-6}$                     | $5 \cdot 10^{-6}$                   |
| Диапазон измерения по магнитной восприимчивости, СИ | $3 \cdot 10^{-6} - 10$                | $5 \cdot 10^{-6} - 5 \cdot 10^{-3}$ |
| Температурный диапазон, °С                          | $-10 \dots +80$                       | $-10 \dots +120$                    |
| Диаметр скважинного прибора, мм                     | 36                                    | 75                                  |
| Длина скважинного прибора, мм                       | 1700                                  | 2200                                |
| <b>Пространственные</b>                             |                                       |                                     |
| Диаметр зоны исследования, м                        | 0,5                                   | 1                                   |
| Диаметр зоны исключения, м                          | 0,1                                   | 0,17                                |
| Минимальная мощность надежно выделяемого пласта, м  | 0,15                                  | 0,25                                |
| Мощность насыщенного пласта, м                      | 0,4                                   | 0,8                                 |

дование характеристик и опробование аппаратуры позволили рекомендовать для скважин малого диаметра (до 120 мм) соленоидный зонд длиной 0,08—0,1 м, а для скважин большого диаметра — 0,12—0,15 м.

Авторами совместно с ВНИИГИС подготовлена к серийному выпуску аппаратура КМВ-ИК-36, обеспечивающая возможность записи диаграмм в масштабе  $20 \cdot 10^{-6}$  См/см. Предусмотрена возможность регистрации удельной электропроводности пород и руд в диапазоне 1—1000 См/м. Аппаратура опробована в Норильском рудном районе, на Южном Урале, в Казахстане, Якутии и др.

Прибор для измерения магнитной восприимчивости шлама (буровой пульпы) предназначен для работы в составе автоматизированного комплекса исследования скважин, пробуренных с гидротранспортом керна. Такой комплекс разрабатывается ВНИИгеоинформсистем. В связи с большой продолжительностью одного цикла измерений, высокими промышленными помехами, низкими значениями объемной магнитной восприимчивости, невозможностью эталонировки в процессе измерения была выбрана индукционная компенсированная система, включающая собственно измерительный датчик и блок компенсации. Измерительный датчик состоит из секционированных генераторных и измерительных катушек, намотанных на полый толстостенной стеклотекстолитовой трубе. По трубе движется буровая пульпа. Блок компенсации построен подобным образом и состоит из секционированных генераторных и

компенсационных катушек, расположенных на вынесенном кварцевом стержне. Особое внимание уделялось способам экранирования и качеству материала каркаса. Опробование аппаратуры проводилось сотрудниками ВНИИгеоинформсистем на скважинах в Узбекистане. По результатам полевых испытаний аппаратуры сделан вывод о том, что она должна использоваться в комплексе с гамма-плотномером для учета степени заполнения пульпопровода и влажности шлама.

Основные характеристики разработанной аппаратуры для измерения магнитной восприимчивости шлама следующие:

|                                                          |                                      |  |
|----------------------------------------------------------|--------------------------------------|--|
| <b>Технические</b>                                       |                                      |  |
| Чувствительность, СИ                                     | $5 \cdot 10^{-6}$                    |  |
| Диапазон измерения по магнитной восприимчивости, СИ      | $5 \cdot 10^{-6} - 20 \cdot 10^{-3}$ |  |
| Температурный диапазон, °С                               | $-10 \dots +50$                      |  |
| Частота тока в катушках, Гц                              | 1500                                 |  |
| Размеры датчика совместно с пультом управления, мм       | $350 \times 350 \times 500$          |  |
| Выход                                                    | На аналоговый носитель               |  |
| <b>Пространственные</b>                                  |                                      |  |
| Внутренний диаметр шламопровода, мм                      | 48                                   |  |
| Длина исследуемого образца (по 90 % вкладу в сигнал), мм | 250                                  |  |

Для петрофизических исследований, а также для увязки данных каротажа и керна был разработан лабораторный измеритель магнитной восприимчивости керна. В СССР не выпускаются специализированные приборы для кап-



паметрии керна. Ручные накладные каппаметры типа КТ-5 (Чехо-Словакия) и ИМВ-2 не предназначены для подобных целей из-за сильного влияния на измеряемую величину диаметра керна, его формы, относительного положения датчика, локальных неоднородностей и т. д. Основным недостатком аппаратуры типа KLY (Чехо-Словакия) предназначенной для измерений цилиндрических образцов, является малый объем исследования — до 40 см<sup>3</sup> при максимально возможном диаметре 40 мм. Кроме того, довольно низкая скорость измерений — одно измерение длится около 3 мин.

Разработанная во МГРИ аппаратура свободна от этих недостатков. Порог чувствительности составляет  $1 \times 10^{-6}$  СИ, при необходимости можно добиться  $1 \cdot 10^{-7}$  СИ. Максимальный диаметр образца 95 мм, минимальный 30 мм. Для получения истинной магнитной восприимчивости измеряемое значение нормируется на объем образца. В более общем случае вводятся поправки за диаметр и высоту образца, а также за влияние косых сколов. Для введения поправок получены необходимые зависимости и палетки.

Аппаратура состоит из пульта управления и двух выносных датчиков, для кернов диаметром до 43 и 95 мм. Датчики построены на основе моста взаимной индуктивности. Коаксиально с генераторной катушкой внутри нее находятся включенные встречно-последовательно измерительная и компенсационная катушки. Чтобы измерения проводились в однородном поле, диаметры измерительной и компенсационной катушек в два раза меньше диаметра генераторной. Для обеспечения глубокого уровня компенсации (порядка  $10^{-6}$  раз) между измерительной и компенсационной катушками размещены дополнительные обмотки для точной компенсации активной и реактивной составляющих ЭДС. Для уменьшения емкостных связей применено специальное электростатическое экранирование.

При проведении измерений образец породы помещается внутрь измерительной катушки. На выходе системы катушек появляется ЭДС раскомпенсации, поступающая на пульт управления и измерения. Индикация показаний производится в единицах маг-

нитной восприимчивости в цифровой форме.

Основные характеристики аппаратуры следующие:

#### Технические

|                                                                   |                                         |
|-------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|
| Чувствительность, СИ                                              | 10 <sup>-6</sup>                        |
| Диапазон измерения магнитной восприимчивости (линейный выход), СИ | 10 <sup>-6</sup> —0,1 (5 поддиапазонов) |
| Температурный диапазон, °С                                        | —10 ... +85                             |
| Размеры, мм:                                                      |                                         |
| пульт управления                                                  | 300×320×180                             |
| датчик для образцов диаметром до 95                               | 220, высота 450                         |
| датчик для образцов диаметром до 43                               | 120, высота 180                         |
| Время измерения одного образца, с                                 | Не более 30                             |

#### Пространственные

|                                  |       |
|----------------------------------|-------|
| Диаметр образцов, м              |       |
| для малого датчика               | 30—43 |
| для большого датчика             | 40—95 |
| Минимальная высота образцов, мм: |       |
| для малого датчика               | 12    |
| для большого датчика             | 20    |

Аппаратура была опробована в полевых условиях в Западном Казахстане. Принятый диапазон измерения и чувствительность оказываются достаточными для определения магнитной восприимчивости всех осадочных горных пород.

Электронная часть всего описанного ряда аппаратуры унифицирована, отличается только конструктивно и размерами электронных плат.

Кроме собственно аппаратуры, авторами разработана система метрологического обеспечения, эталонировочные устройства и способы проверки и градуировки приборов. Эти средства включают индукционные имитаторы магнитной среды, а также эталонные образцы с использованием магнитных жидкостей.

На основе широкого опробования аппаратуры в полевых условиях выявлен ряд геологических задач, при решении которых могут быть использованы высокоточные измерения магнитной восприимчивости. Это литолого-стратиграфическое расчленение разреза осадочных пород. По значениям магнитной восприимчивости также можно судить о геохимической обстановке осадконакопления или ее изменении в процессе диагенеза. Имеется материал, свидетельствующий о тесной корреляционной связи между магнитной восприимчивостью и содержанием

глинистой компоненты. Кроме того, в некоторых литотипах наблюдается ее связь с открытой пористостью.

Данные высокоточных измерений магнитной восприимчивости успешно применяются для корреляции разрезов скважин. Новые возможности эти измерения дают на рудных месторож-

дениях: по ним выделяются рудные подсечения, зоны околорудных изменений, проводятся оценка качества руд, разделение руд по составу, поиски палеовулканов и т. д. Область использования магнитной восприимчивости при изучении пород может быть существенно расширена.

УДК 550.83.01

© О. Б. Новик, М. И. Шимелевич, 1991

## **Нелинейные и оптимизационные математические методы анализа геолого-геофизических полей и их взаимодействия**

О. Б. НОВИК, М. И. ШИМЕЛЕВИЧ

Энергетический баланс эндогенных процессов, определяющих образование и миграцию углеводородов, формирование рудных тел, складывается в основном за счет взаимодействия механических, гидрогеохимических и тепловых полей, локализованных в литосфере.

Взаимодействие полей обуславливает тепловое расширение блоков и создание значительных термонапряжений в неидеально упругой среде зон субдукции. Период предшоковой подготовки землетрясения тектонического типа сопровождается, в частности, температурными и электромагнитными возмущениями.

Стремление приблизиться к количественной трактовке указанных фундаментальных проблем геодинамики, генезиса поиска и разведки месторождений определяло направление работ Межфакультетской научно-исследовательской лаборатории математического анализа интенсивных геолого-геофизических полей (МНИЛ МАИГП) МГРИ.

Изложим кратко результаты математического и численного исследования упомянутых полей в отдельности (разведочные и промысловые задачи) и в процессе их взаимодействия (геодинамические задачи), а также методы получения численной информации о характеристиках сред, в которых локализованы изучаемые поля (задачи обработки и интерпретации данных полевых измерений, разработки алгоритмов и программ ИПС и АСОД).

**Гидрогеологические задачи.** В связи с проблемами мелиоративной гидрогеологии (засоление, дренаж) рассма-

тривалось движение растворов солей в зоне аэрации почвогрунтов. Динамика влагопереноса и конвективный член уравнения диффузии определялись путем решения начально-краевой задачи для нелинейного уравнения диффузионной модели влагопереноса (ненасыщенная фильтрация) в нестационарной области, определяемой движением линии смачивания. При экспоненциальной зависимости нелинейного коэффициента диффузии от концентрации влаги совпали результаты расчета влагопереноса и лабораторного эксперимента на колонках.

Разработанный метод решения гидродинамических задач фильтрации в области с подвижной границей использован при анализе региональной гидрогеотермии осадочных комплексов с движущейся кровлей верхнего пласта.

Рассматривается взаимодействие теплопереноса из коры (с тепловыделением в гранитондах фундамента) и верхней мантии с гидродинамическим полем в осадочных толщах и процессом их роста в ходе формирования осадочного бассейна при учете вариаций скорости осадконакопления как во времени (например, для слоев PZ, MZ—KZ, Q) так и в пространстве (т. е. в центральных и в окраинных зонах, например, на шельфе и в глубоководной впадине морского бассейна).

Отмеченные особенности, в частности нестационарность полей, вызванная указанным взаимодействием, в течение геологического времени существенно влияют на динамику геотермического поля и другие факторы, определяющие термобарические условия формирования МПИ. Так, ход изотерм

в осадочных толщах шельфа, представляющих практический интерес при поисках, в значительной степени определяется различием скорости осадконакопления на шельфе и в глубоководной впадине.

Модификации разработанной методики позволяют учесть влияние рельефа границ пластов фундамента, зависимость коэффициента теплопроводности от температуры и давления (нелинейность), взаимодействие теплопереноса с полем напряжений и другие факторы, а также приблизиться к определению мантийного теплового потока и скорости осадконакопления в данное геологическое время.

Из числа прикладных гидрогеологических задач разрабатывались методы расчета оптимальных дебитов системы водозаборов водо-бромных промышленных вод глубоких структурных горизонтов, обеспечивающих при заданном плане добычи извлекаемого сырья минимизацию затрат на подъем и перекачку воды с учетом: 1) нелинейных характеристик гидравлического режима трубопроводов; 2) взаимодействия скважин в произвольном неоднородном пласте; 3) ограничений на суммарное понижение уровней в связи с падением КПД погружных насосов при больших нагрузках. В рамках методики возможна количественная экономическая оценка влияния на минимальные затраты: 1) неточности задания фильтрационных характеристик пласта (до-разведка); 2) изменения элементов графа, определенного системой трубопроводов и скважин; 3) технологических параметров: насосного оборудования, сечений и коэффициентов шероховатости трубопроводов. Проводились также теоретические разработки по ударным режимам турбулентных течений.

Выявлялись возможности указанных разработок при решении вопросов комплексного использования промышленных гидротермальных вод и захоронений (закачки) отработанного сырья.

Указанные гидрогеологические задачи, как и определение средней скорости осадконакопления, относятся к далекой от завершения математической теории оптимального управления системами с распределенными параметрами по нелинейному критерию ка-

чества при указанной системе ограничений.

В связи с хозяйственным освоением зоны БАМ рассматривались вопросы оценки запасов подземных вод и оптимальных режимов их эксплуатации в условиях многолетней мерзлоты, в частности, определение скорости промерзания водоносных горизонтов с учетом эксплуатации месторождений. Таким образом, здесь возникает нелинейная проблема совместного рассмотрения теплового и геофильтрационного процессов и их взаимодействия.

Уравнение Фурье—Кирхгофа, описывающее процесс распространения тепла в талом грунте (область  $\Omega_T$ ), с учетом кондукции и конвекции (в котором в соответствии с законом Дарси скорость выражена через градиент напора) может быть записано в виде

$$\operatorname{div}(\lambda_T \nabla \theta) = C_T \frac{\partial \theta}{\partial t} + C_B(K \nabla H, \nabla \theta),$$

где  $\theta$  — температура грунта,  $t$  — время,  $C_T$ ,  $C_B$  — объемные теплоемкости грунта и воды соответственно,  $H$  — напор,  $\lambda_T$  — коэффициент теплопроводности,  $K$  — коэффициент фильтрации.

Это уравнение в совокупности с дифференциальным уравнением для напора в неоднородном изотропном пласте

$$\operatorname{div}(K \nabla H) = \eta \frac{\partial H}{\partial t},$$

где  $\eta$  — коэффициент упругоэластичности, и уравнением теплопроводности для температуры  $\theta$  в области мерзлых пород  $\Omega_M$

$$\operatorname{div}(\lambda_M \nabla \theta) = C_M \frac{\partial \theta}{\partial t}$$

определяют количественную взаимосвязь теплового и фильтрационного процессов в талой и мерзлой зонах.

Данная система должна быть дополнена начальными и граничными условиями, а также условиями Стефана на подвижной границе  $G_s$ . Поле напора  $H$  на границе области  $\Omega_T$  талых пород удовлетворяет граничным условиям

$$\alpha_n H + \beta_n \frac{\partial H}{\partial \vec{N}_T} = U_1(x, y, z, t);$$

$$0 \leq t \leq T;$$

$$(x, y, z) \in \partial \Omega_T; \vec{N}_T \perp \partial \Omega_T.$$



Тепловое поле  $\theta$  на границе всей области  $\Omega = \Omega_T \cup \Omega_M$  отвечает условиям

$$\alpha_\theta \theta + \beta_\theta \frac{\partial \theta}{\partial \vec{N}} = V_1(x, y, z, t);$$

$$0 \leq t \leq T;$$

$$(x, y, z) \in \partial \Omega, \vec{N} \perp \partial \Omega.$$

Поля  $H$  и  $\theta$  имеют следующие начальные условия при  $t=0$ :

$$\theta(x, y, z, 0) = \theta_0(x, y, z);$$

$$x, y, z \in \bar{\Omega};$$

$$H(x, y, z, 0) = H_0(x, y, z);$$

$$x, y, z \in \Omega_T;$$

На подвижной границе  $\Gamma_s$ :

$$S(x, y, z, t) = 0$$

выполняются условия Стефана:

$$\theta_T(x, y, z, t) = \theta_M(x, y, z, t) \equiv 0;$$

$$x, y, z \in \Gamma_s;$$

$$\lambda_M < \nabla \theta_M; \nabla S > -\lambda_T < \nabla \theta_T;$$

$$\nabla S > = \theta \frac{\partial S}{\partial t}$$

и условие непроницаемости:

$$\frac{\partial H}{\partial \vec{N}_s} = 0; \vec{N}_s \perp \Gamma_s.$$

В формулах, определяющих граничные условия, использовались обозначения:  $\lambda_T, \lambda_M$  — теплопроводности талого и мерзлого грунтов;  $C_T, C_M$  — теплоемкости талого и мерзлого грунтов;  $\theta_T, \theta_M$  — температура талого и мерзлого грунтов;  $C_B$  — объемная теплоемкость воды;  $\alpha_\theta, \beta_\theta, V_1$  — заданные функции переменных  $x, y, z, t$ , определяющие граничные условия для температурного поля;  $\alpha_H, \beta_H, U_1$  — заданные функции переменных  $x, y, z, t$ , определяющие граничные значения поля напоров;  $\theta, H$  — заданные функции переменных  $x, y, z$ , определяющие начальное распределение температур и напоров в рассматриваемых объемах;  $\theta_\Phi$  — объемная теплота фазового перехода.

Указанные уравнения в совокупности с приведенными дополнительными условиями дают количественное описание процессов теплопереноса и фильтрации в талой и мерзлой зонах с учетом их взаимодействия.

Существенно, что движущаяся фазовая граница является водонепроницаемой для фильтрационного потока. Поэтому фильтрационная, а значит, и

тепловая задачи определены в области с переменной движущейся во времени границей, причем закон движения границы, в свою очередь, связан с тепловым режимом. Это обуславливает нелинейный характер задачи, несмотря на линейные уравнения полей. Приведенная выше постановка задачи представляет практический интерес для проектирования водоснабжения в зонах многолетней мерзлоты и приведена здесь как пример нелинейного взаимодействия полей различной физической природы в промышленных задачах гидрогеотермии.

**Электромагнитные исследования.** В этой области получены результаты расчета трехмерных геопотенциальных полей в сложнопостроенных средах (прямые задачи каротажа) и решения нелинейных обратных двумерных задач электромагнитных зондирований.

С помощью разработанных программ расчета трехмерных геопотенциальных полей в сложнопостроенных средах получены характеристики работы стандартной электрокаротажной аппаратуры БК-3 в условиях трещиноватого коллектора. Аппаратура фиксирует субвертикальные (миллиметровые) трещины, частично заполненные буровым раствором в зоне проникновения, отмечая в процессе рейса вход в продуктивный пласт с подобными трещинами, отходящими от периферии скважины, уменьшением кажущегося сопротивления  $\rho_k$  в несколько раз. Если аналогично расположенные тонкие трещины протяженностью 0,1—0,2 м целиком заполнены буровым раствором,  $\rho_k$  остается практически таким же, как в пласте без трещин. Этот случай моделирует реакцию на естественное растрескивание пород, проходящих скважиной. Резкое различие реакций в первом и втором случае говорит о возможности фиксации аппаратурой БК-3 важных для промысловой практики трещиноватых коллекторов нефти и газа. Методика позволяет оценить также другие характеристики аппаратуры: реакцию на наклонные или на не пересекающие скважину трещины, на размер зоны проникновения или раскрытие трещин при различной контрастности электропроводности бурового раствора и окружающих скважину пород.

Разработанный способ можно применять также для количественного ис-

следования вопросов методики использования электрокаротажной аппаратуры, а также и для ее проектирования. Расчеты показывают, что смещение зонда БК-3 с центральной оси скважины при рейсе не приводит к существенному изменению регистрируемого  $\rho_k$ . Методика позволяет также рассмотреть вопрос об адаптации характеристик аппаратуры к особенностям исследуемого пласта. В частности, с помощью расчета поля цилиндрического электрода некруглого сечения в пачке трещиноватых пластов, содержащих скважину с буровым раствором и зонами проникновения, показано, что при электроде специальной формы увеличивается чувствительность аппаратуры к наличию трещин или других неоднородностей азимутального (по отношению к оси скважины) строения пласта.

Упомянутые электрокаротажные задачи сводятся к расчету поля стационарных токов в неоднородной области с изменением электропроводности в 100—1000 раз на контактах низкоомного бурового раствора в скважинах и трещинах с окружающими породами. При этом вычисления значительно затрудняет необходимость учитывать, с одной стороны: 1) миллиметровое раскрытие трещин; 2) форму электрода; 3) геометрию вхождения трещин в периферию скважины (наиболее интересно вычисление потенциалов на участке между электродом и областью пересечения скважины трещиной) и, с другой стороны: 4) медленное, на протяжении нескольких сот метров, затухание поля, вызванного питающим электродом. Для решения данной детерминированной задачи моделировалось случайное блуждание по неоднородной неравномерной трехмерной решетке с оценкой по статистике Вальда малой вероятности выхода марковской траектории с началом около электрода на удаленную границу.

Была получена также оценка отклонения найденного ЭВМ приближенного решения дискретизированной задачи электрокаротажа (в двумерной геометрии) от точного ее решения, основанная на корректности краевой задачи для уравнения поля и не использующая каких-либо формульных представлений решения, заведомо не суще-

ствующих при наличии трещин и других упомянутых особенностей.

Указанная методика может применяться в задачах электроразведки на постоянном токе, а также в разведочной геотермии.

Количественное определение свойств среды по геолого-геофизическим данным с математической точки зрения эквивалентно расчету коэффициентов некоторой системы дифференциальных уравнений, описывающих закон распределения данного поля в среде по значениям поля или каким-либо его характеристикам, измеренным в некоторой системе точек на поверхности Земли (обратная задача геофизики). Разрабатывается общий подход к решению проблем подобного рода для полей различной породы, основанный на применении методов нелинейного анализа и математической теории оптимизации. Реализация подхода иллюстрируется на примере решения двумерной обратной задачи электромагнитных зондирований.

Рассматривается набор из  $n$  классов двумерных геологических сред. Геоэлектрический разрез в каждом  $i$ -ом классе определяется конечным числом  $M_i$  параметров  $\alpha^i = (\alpha_1^i, \dots, \alpha_{M_i}^i)$ . Разбиение реальных геологических сред на классы проводится таким образом, чтобы, с одной стороны, каждый класс соответствовал реальному типу сред и мог быть количественно охарактеризован небольшим числом параметров, а с другой, вся совокупность классов могла отразить требуемое постановкой интерпретационной задачи многообразие реальных сред.

В каждом  $i$ -ом классе сред обратная задача электромагнитных зондирований сводится к решению системы нелинейных уравнений или нелинейной оптимизационной задачи с ограничениями на компактных подмножествах  $K_i \subset R^{M_i}$ .

Для вычисления целевой функции  $f(\alpha^i)$  вектора параметров  $\alpha^i$  или вектор-функции  $f_k(\alpha^i)$ , соответствующей системе уравнений, решается прямая задача для уравнений Максвелла в частотной области для прямоугольной двумерной области. При этом в качестве граничных условий на верхней границе области, совпадающей с поверхностью Земли, используются значения компонент наблюдаемого электромагнитного поля, нормированных

на синхронное поле в базисной точке (граничные условия I, II рода) или импедансы электромагнитных полей (условия III рода), и таким образом поле в воздухе не вычисляется. На боковых и нижней границах области ставятся либо нулевые граничные условия для аномального поля, либо условия выхода решения на нормальное поле (типа  $\frac{\partial U}{\partial N} = 0$ ;  $\vec{N}$  — внешняя нормаль к границе области).

Структура функции ограничений оптимизационной задачи определяется свойствами класса сред, в котором она решается.

Для численного решения оптимизационных задач используются квазиньютоновские методы с привлечением и без привлечения градиента целевой функции.

Можно показать, что расчет градиента целевой функции сводится к решению краевой задачи, аналогичной исходной, но с однородными граничными условиями и со специально заданной правой частью. Устанавливается связь градиента целевой функции с производной Фреше оператора прямой задачи по коэффициенту дифференциального уравнения (электропроводности среды).

Кроме того, для решения оптимизационных задач применяются методы, основанные на аппроксимации целевой функции на множестве допустимых значений выпуклыми поверхностями второго порядка.

Предлагаются методы оценки степени неединственности решения обратной задачи в данном классе сред при заданном уровне погрешности с использованием спектральных свойств матрицы Гессе целевой функции в оптимальной точке.

На основе данных методов разработаны алгоритмы и программы решения двумерных и одномерных обратных задач МТЗ. Программы реализованы на ЕС ЭВМ на языке ФОРТРАН-4,77 и опробированы на модельных данных [2, 3].

**Математические модели геодинамических процессов.** По данным реологии интенсивное физическое поле в реальной среде не может существовать изолированно, без взаимодействия с полями другой физической природы. Взаимодействие поля деформаций с тепловым и электромагнитными поля-

ми измеряется и исследуется в лабораторном и полевом эксперименте. Термомеханические эффекты следует отнести к основным компонентам энергетического баланса геодинамических процессов в зонах субдукции и спрединга. Измерения указывают также на эффекты термомеханического и сейсмoeлектрического сопряжения полей перед землетрясениями и, следовательно, на необходимость изучения возникающих нестационарных тепловых и электромагнитных полей как прогнозных признаков накопления механических напряжений. Кроме того, расчеты показывают, что эффекты взаимосвязи процессов различной физической природы накапливаются с течением геологического времени. Пренебрежение этим обстоятельством может приводить к значительным искажениям количественных характеристик термической эволюции активных зон литосферы.

Кроме анализа нестационарного взаимодействия полей различной природы в анизотропной неоднородной (с тектоническими нарушениями) среде в рамках приемлемой геодинамической модели должно быть возможно описание различных термомеханических режимов (от сдвиговых течений в нижних этажах литосферы до чисто упругого поведения и растрескивания в верхних). Также необходимо учитывать зависимость текущего термомеханического состояния от его эволюции в прошлом и палеогеодинамических обстановок («память» материала в реологии).

Указанным требованиям отвечает система уравнений динамической связанной термовязкоупругости

$$H_U + A_V = f; P_V + B_U = \varphi,$$

где  $U, V$  — искомые поля смещений и температуры, а интегродифференциальные уравнения  $H_U = f, P_V = \varphi$  (соответственно гиперболического и параболического типов) описывают поведение этих полей, если пренебречь их взаимодействием при механических объемных силах  $f$  и тепловых источниках  $\varphi$ ; операторы  $A$  и  $B$  описывают взаимное влияние полей в процессе их эволюции. При включении интенсивных электромагнитных полей слагаемые  $A_V, B_U$  приобретают вид  $A(U, V); B(U, V)$ , отражая нелинейный характер взаимодействия.



Таким образом, лишь в (вырожденном) случае отсутствия взаимодействия полей рассматриваемая система сводится к уравнениям классических типов. В существенном для геодинамики случае активного взаимодействия система уравнений не имеет какого-либо типа достаточно математически изученного, включая корректность начальных и начально-краевых задач.

В направлении математического обеспечения теории геодинамических процессов доказана корректная разрешимость начальных и начально-краевых задач для системы уравнений общей структуры, включающей и некоторые модели магнитоупругих взаимодействий. Получена оценка компонент энергетического баланса через физические параметры среды (для которых допустима зависимость от текущего и предшествующих моментов времени), а также через характеристики объемных сил, источников, краевое и начальное режима полей.

На этой основе показана устойчивость построенных дискретизаций упомянутых начально-краевых и начальных задач. Математическое исследование корректности непрерывных и дискретизированных начально-краевых и соответствующих алгоритмов является базой математического обеспечения геодинамических задач ввиду сложности рассматриваемых геологических сред и процессов в них и, в частности, невозможности опереться на совершенно иной опыт расчета эволюции невзаимодействующих в течение геологического времени полей. Отметим, что системы уравнений рассмотренной структуры встречаются при изучении затухания сейсмических волн (в этом случае оператор  $H$  отвечает системе уравнений динамической теории упругости) и в других геолого-геофизических задачах, на которых мы здесь не останавливаемся [1, 4].

Приведенные результаты получены на основе энергетических оценок в непрерывных и дискретных соболевских функциональных пространствах (в т. ч. со специальным весом в случае начальной задачи).

**Задачи разработки ИПС и АСОД.** Применение современных высокопроизводительных измерительно-цифровых комплексов, в частности, в разведочной геофизике, приводит к необходимости обрабатывать и хранить ог-

ромные объемы численной информации. Поэтому и в связи с созданием информационно-поисковых (ИПС) и автоматизированных систем обработки данных (АСОД) остро стоит вопрос о возможности выделения такой числовой информации, которая была бы по объему ощутимо меньше первичной и позволяла бы с помощью сравнительно простых алгоритмов восстановить исходную информацию в полном объеме с наперед заданной точностью. Для этой цели М. Н. Смирновой был введен в практику геолого-геофизических вычислений (1970) известный ранее в математике метод разложения функции нескольких переменных по естественным ортогональным составляющим.

В соответствии с выводами упомянутых исследователей создание сокращенного числового образа обрабатываемого массива сводится к нахождению сингулярных чисел и векторов матрицы, сопоставляемой исследуемому полю. Существенно, что такая задача имеет достаточное математическое обеспечение — большое число стандартных программ ЭВМ, решающих спектральную проблему для самосопряженных матриц.

Этим методом обрабатывались характеризующие большими градиентами гидродинамические нестационарные поля в задачах оптимального проектирования водозаборов, а также с привлечением сплайн-интерполяции обрабатывались теплофизические поля, связанные с придонным осадочным слоем Черноморской впадины.

В зависимости от гладкости обрабатываемого поля удавалось получить компактный числовой образ обрабатываемого массива, который по объему был в 2—3 раза меньше исходного поля при точности воспроизведения поля по сокращенному представлению не менее 10 %, что приемлемо для большинства массивов геолого-геофизической информации, полученной полевыми измерительными установками.

Увеличить точность воспроизведения можно за счет менее значительного сокращения, которое может быть выбрано по требуемой точности воспроизведения и отводимому объему памяти перед отправкой сокращенного образа на хранение в ИПС (чем более гладко зависит исследуемое поле от координат и/или времени и чем мень-

шая требуется точность воспроизведения, тем более компактный числовой образ поля может быть отправлен на хранение).

Эта методика в сочетании с соответствующими процедурами нелинейной интерполяции и картопостроения представляет интерес и для подсистем АСОД, занимающихся фильтрацией и сглаживанием случайных процессов и полей при обработке первичных результатов измерений.

При проведении глубинных и поисково-разведочных электромагнитных исследований методом магнитотеллурических зондирований, в основе которых лежит использование полей, обусловленных ионосферными источниками тока, возникает проблема получения характеристик электромагнитного поля, инвариантных относительно неизвестных исследователю свойств источника. Такие характеристики, называемые передаточными функциями Земли, полученные в результате специальной математической обработки измеренных естественных электромагнитных полей, в комплексе с другими геоинформационными признаками используются для решения конкретных геолого-геофизических задач.

Обработка данных магнитотеллурических зондирований сводится к решению векторного интегрального уравнения I рода:

$$\sum_{k=1}^r \int_0^T g_{ik}(\tau) H_k(t - \tau) d\tau = E_i(t);$$

$$t_1 \leq t \leq t_2,$$

где  $H_k(t)$ ,  $E_k(t)$ ,  $k=1,2$  — тангенциальные компоненты естественного электромагнитного поля Земли, возбуждаемого ионосферными источниками;  $g_{ik}(\tau)$ ,  $i, k=1,2$  — передаточная матрица — функция Земли, имеющая смысл тензора импеданса Земли или его аналога.

Разрабатываются различные подходы к решению указанного векторного уравнения, основанные на оптимизационных принципах. Отметим два главных метода, различающихся способом дискретизации исходной континуальной задачи: сеточный, основанный на аппроксимации интегралов, входящих в левую часть на заданной сетке времен  $\tau_1, \dots, \tau_n$ , и проекционный, базирующийся на аппроксимации искомых

функций  $g_{ik}(\tau)$  отрезками рядов по специально выбранной системе функций  $\varphi_l(t)$ ;  $l=1, \dots, L$  в виде

$$g_{ik}(\tau) = \sum_{l=1}^L a_l^{ik} \varphi_l(\tau).$$

Получаемые в результате конечно-мерные квадратичные оптимизационные задачи с линейными (или квадратичными) ограничениями сводятся к системам линейных алгебраических уравнений относительно дискретов искомых функций  $g_{ik}(\tau)$  или определяющих их коэффициентов  $(a_l^{ik}, l=1, \dots, L)$ .

В качестве ограничений используются условия монотонности функции  $g_{ik}(\tau)$  на больших временах или иные функциональные свойства искомых решений.

Так как исходные данные, т.е. измеренные на поверхности Земли компоненты электромагнитного поля  $H_k(t)$ ,  $E_k(t)$  заданы с некоторой погрешностью  $\delta^2$ , то определяемые тем или иным методом из векторного интегрального уравнения функции  $g_{ik}(\tau)$  также неизбежно будут содержать определенную ошибку  $\Delta g_{ik}$ . Для практических целей очень важно оценить  $\Delta g_{ik}$ . Это делается также на основе оптимизационных принципов, позволяющих численно определить максимально возможное в определенном смысле отклонение от приближенно найденного при изменениях правой части уравнения в пределах погрешности измерений  $\delta^2$ . Алгоритмы расчета передаточных функций Земли реализованы в виде комплексов программ.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Новик О. Б. Конечно-разностные схемы для задачи о термомеханическом эффекте в океанической литосфере//Геотермические исследования на дне акваторий. М., 1988.
2. Шимелевич М. И. Методы решения обратных задач электромагнитных зондирований в двумерном приближении//Геология и разведка. Деп. № 670-МГ-88. 02.12.88.
3. Шимелевич М. И. Некоторые оптимизационные алгоритмы решения обратных задач электромагнитных зондирований//Геология и разведка. Деп. № 796-МГ-89. 16.09.89.
4. Novik O. B. Thermomechanical mathematical model of heat flow in lithosphere. Thermal evolution of lithosphere and processes in Earth's interior. International symposium. Moscow. 1989.
5. Svetov B. S., Shimelevich M. I. Magnetotelluric variation processing//Survey in Geophysical. 1988.

# **Программно-алгоритмическое обеспечение обработки геолого-геофизических данных при выделении слабоконтрастных объектов**

Г. В. ДЕДУРА, Ю. А. КЛЮЕВ, А. А. ЛЫХИН, В. В. НИКАНОРОВ,  
А. А. НИКИТИН, А. В. ПЕТРОВ

В связи с необходимостью увеличения глубинности и разрешающей способности геофизических методов важную роль приобретает обработка геофизических измерений при выделении слабоконтрастных объектов. Это актуально не только при поисках и разведке месторождений полезных ископаемых, но и при решении задач инженерной геологии — обнаружение подземных полостей, карстовых образований, а также в горном деле — установление

незначительно проявленных физических явлений.

Выделение слабоконтрастных объектов сводится к обнаружению слабых аномалий на фоне интенсивных помех самой различной природы: геологической, аппаратурно-технической, методической и т. д.

Впервые проблема обнаружения слабых аномалий была поставлена А. Г. Тарховым еще в 1959 г. [8]. С тех пор в Московском геологоразведочном ин-

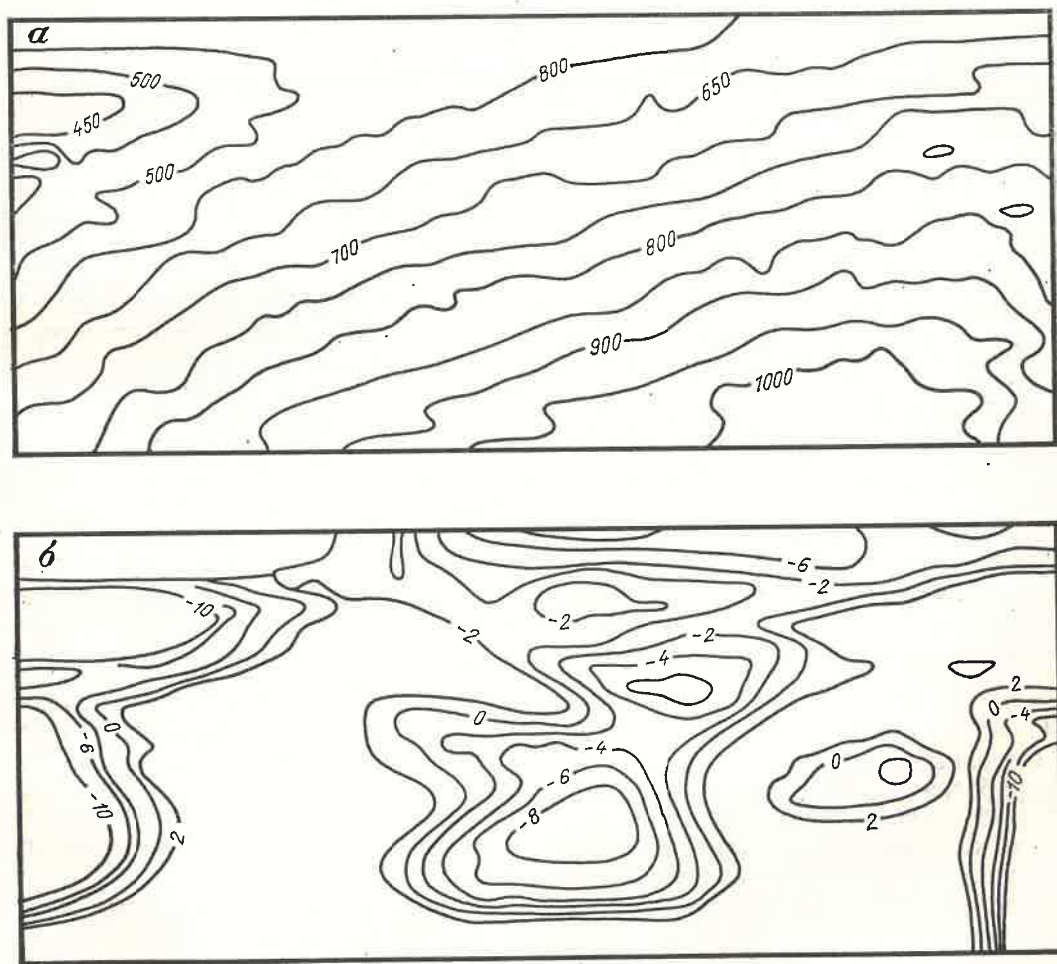
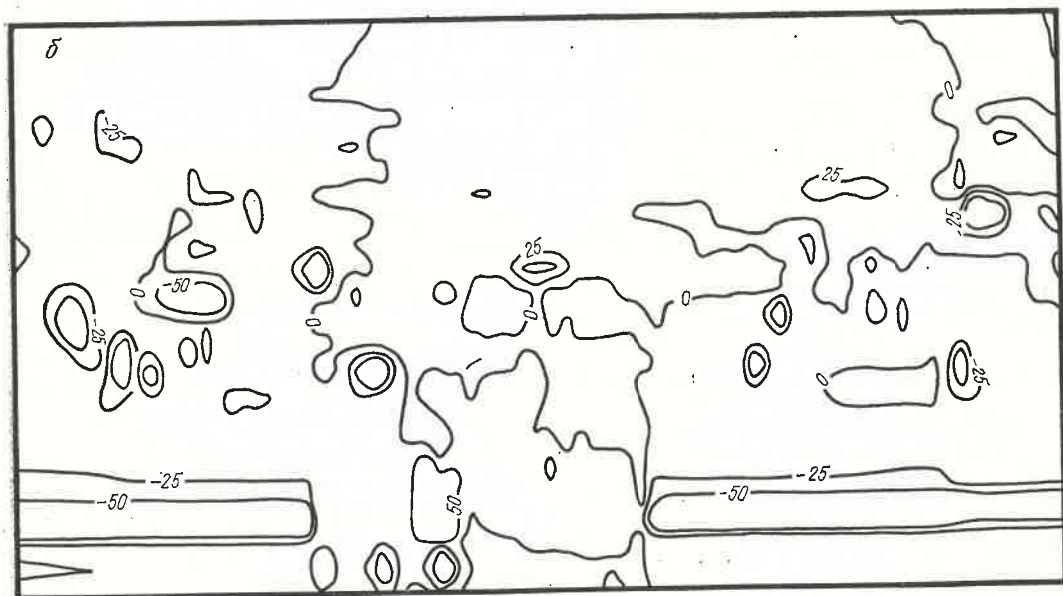
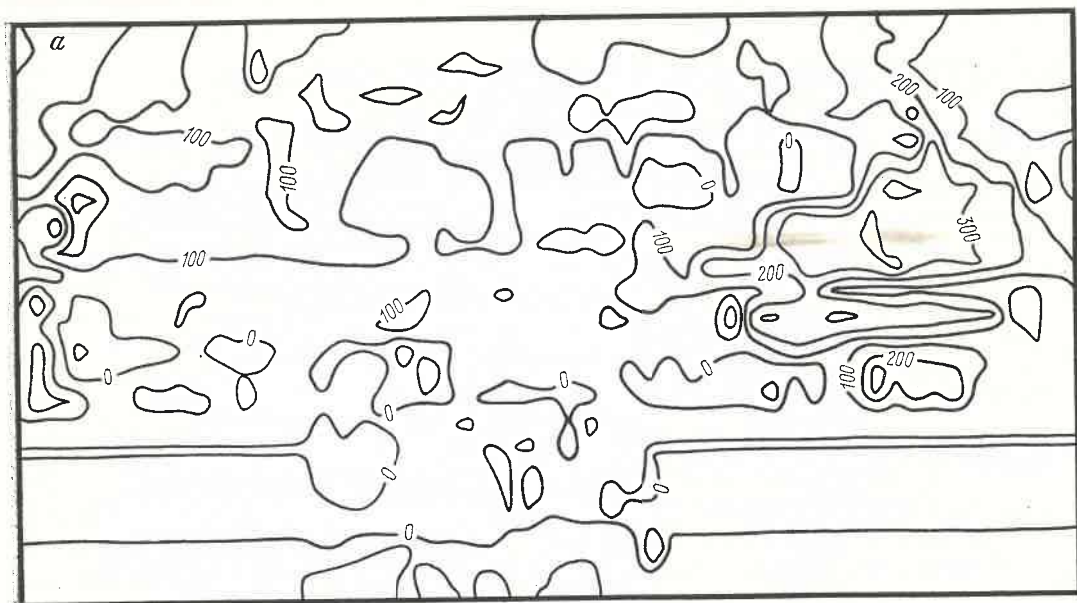


Рис. 1. Исходное поле силы тяжести, мкгал (а) и результаты его фильтрации двумерным адаптивным энергетическим фильтром (б):

заштрихованы области влияния р. Москва (слева) и метрополитена (справа), 1—3 — обнаруженные подземные полости





ституте на ее решение направлены многие исследования [2, 4, 5, 6, 7, 9].

Основные теоретико-методические разработки выделения слабоконтрастных объектов реализованы в программном комплексе спектрально-корреляционного анализа геофизических наблюдений («КоСКАД», разработанного как для персональных компьютеров, так и для ЭВМ коллективного пользования (типа ЕС, СМ-2, СМ-1420). Комплекс программ функционирует с базой данных реляционного типа и ос-

нащен СУБД, обеспечивающей различные операции: заведение, архивацию, фрагментацию, склеивание объектов, просмотр и визуализацию данных на экране дисплея, получение различного рода справочной информации и т. д.

Среди более чем 40 различных обрабатывающих программ комплекса можно выделить по характеру решаемых задач пять основных групп:

1. Графические процедуры, предназначенные для визуализации данных

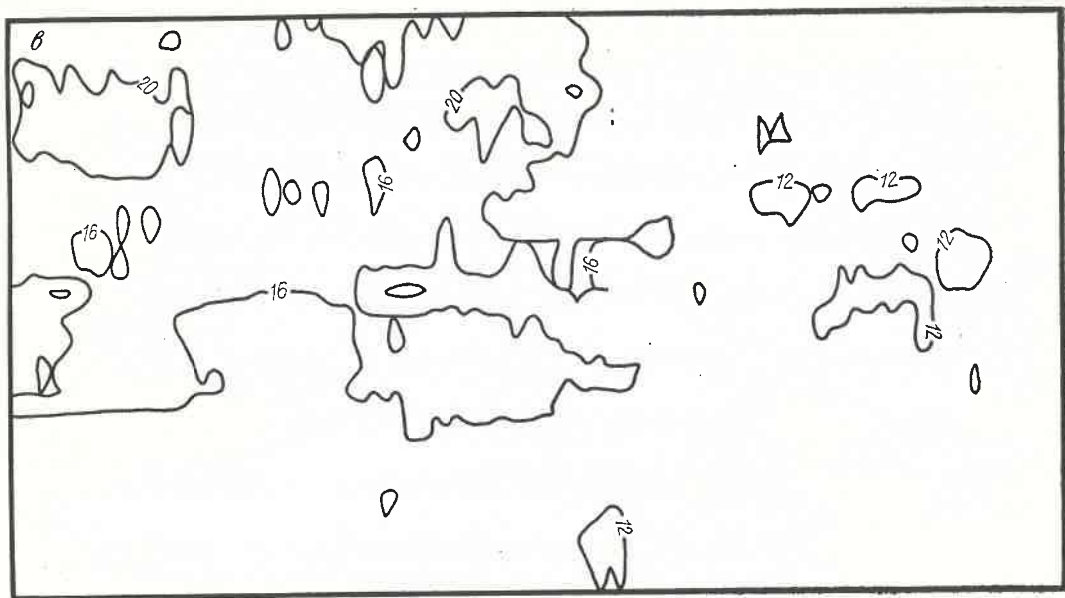


Рис. 2. Исходные физические поля в изолиниях магнитного, нТл (а), естественного электрического, мкВ (б), гамма, мкр/ч (в) полей

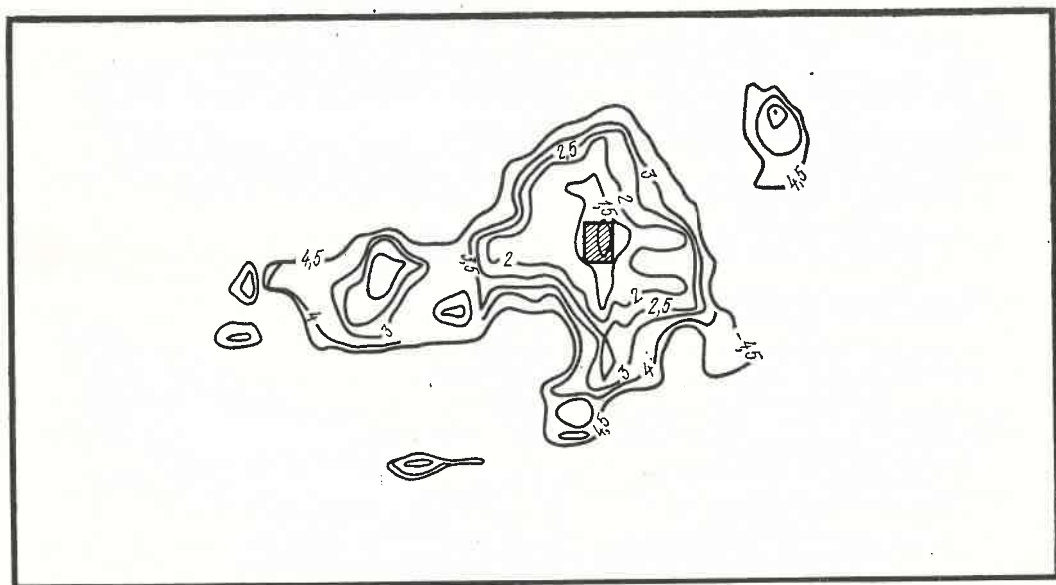


Рис. 3. Результаты распознавания по контуру медно-полиметаллического месторождения в изолиниях значения статистики следа ковариационной матрицы:

заштрихован участок, взятый в качестве эталонного объекта

и результатов обработки на экране дисплея. Это программы построения отдельных графиков, карт графиков, растровых карт, двумерных поверхностей, гистограмм и т. д. Программы функционируют на таких распространенных моделях терминалов, как CGA, MCGA, EGA, VGA, Olivetti.

2. Программы расчета основных спектрально-корреляционных и статисти-

ческих характеристик геофизических полей, среди которых наряду с известными алгоритмами имеется ряд оригинальных: двумерной взаимно-корреляционной функции, статистических и корреляционных характеристик физических полей в динамически изменяющемся окне.

3. Группа программ, в которых реализованы наиболее распространенные

фильтры — одномерный и двумерный варианты винровского, энтропийного и энергетического фильтров. Особый интерес представляет процедура адаптивной энергетической фильтрации, приспособляющаяся к изменению спектральных характеристик поля по площади съемки [5].

4. Программы, реализующие различного рода алгоритмы обнаружения слабых сигналов: способ межпрофильной корреляции, самонастраивающейся фильтрации, обратных вероятностей. В эту группу включены также алгоритмы, способные работать в многопризнаковом пространстве [7], т.е. в процессе обнаружения используется информация о всем многопризнаковом пространстве. Эти алгоритмы базируются на современных достижениях многомерного статистического анализа [1. 3].

5. Процедуры обработки комплексных наблюдений, включающие алгоритмы классификации и распознавания комплексных геофизических аномалий [2, 6]: алгоритм разбиения площади наблюдений на области, однородные в отношении вектора среднего по комплексу признаков без знания конечного числа классов [6], а также алгоритм, позволяющий исключать влияние одного признака на другой (компенсирующий фильтр) на основе анализа взаимно-корреляционной функции между этими признаками [4].

Многопризнаковый (или многомерный) вариант способа самонастраивающейся фильтрации, а также распознавание комплексных геофизических аномалий базируются на решающем правиле, основой которого является статистика следа ковариационной матрицы признаков [6].

Для иллюстрации возможностей программного комплекса ограничимся двумя примерами его использования. Первый из них позволяет оценить перспективы применения двумерного адаптивного энергетического фильтра. На рис. 1, а изображены результаты наблюдений высокоточной гравиметрической съемки по сети  $3 \times 3$  м с точностью рядовых измерений 20 мкгал.

Съемка проводилась с целью выявления подземных полостей на площади вблизи Боровницкой башни Московского Кремля.

Двумерная энергетическая фильтрация была применена вначале для оцен-

ки фоновой составляющей, которая по конфигурации поля визуально мало отличается от исходного поля, а затем — для выделения разности наблюдаемого поля и фоновой составляющей. Результаты фильтрации позволяют четко оконтурить три области с пониженным значением плотности (1—3) (см. рис. 1, б). Заштрихованные зоны слева и справа отражают влияние соответственно р. Москвы и станции метро Боровицкая.

Использование стандартной методики оценки фоновой составляющей в отличии от предлагаемой не позволяет выделить область 3, а области 1 и 2 обнаруживаются крайне ненадежно.

Второй пример иллюстрирует возможности распознавания комплексных аномалий с целью оконтуривания медно-полиметаллического месторождения в Западной Грузии по результатам наблюдений трех полей: магнитного (рис. 2, а); естественного электрического (рис. 2, б), и гамма (рис. 2, в).

В качестве эталонного объекта был использован участок, включавший три профиля и пять пикетов (рис. 3). Результаты распознавания практически однозначно позволяют оконтурить месторождение по совершенно, на первый взгляд, неинформативным физическим полям. При этом в качестве эталонных признаков были использованы непосредственно наблюдаемые поля в пределах заштрихованного участка.

Приведенные два примера позволяют утверждать, что на основе применяемого комплекса «КоСКАД» по существу создана экспертная система для выделения слабых контрастных геологических объектов.

Как показывает наш опыт, а также опыт ряда производственных организаций, использование данного комплекса эффективно при решении следующих геологических задач: прогноз и поиски месторождений полезных ископаемых в сложно построенных геологических районах; геокартирование по комплексу геофизических и геохимических полей; прямые поиски нефти и газа по комплексу полей различной природы; инженерно-геологические исследования и т. д.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арнс Х., Лейтер Ю. Многомерный дисперсионный анализ. — М.: Финансы и статистика, 1985.



2. Демура Г. В., Никитин А. А., Тархов А. Г. Классификация геологических объектов по данным комплекса геофизических методов на принципах самообучения//Изв. вузов. Геология и разведка. 1974. № 2.
3. Енюков И. С. Методы, алгоритмы, программы многомерного статистического анализа.— М.: Финансы и статистика, 1985.
4. Лыхин А. А., Рудаков В. П. Компенсация помех во временных рядах радона//Физика Земли. 1990. № 8.
5. Никитин А. А. Теоретические основы обработки геофизической информации.— М.: Недра, 1986.
6. Никитин А. А., Петров А. В. Классификация комплексных геополей на однородные области//Изв. вузов. Геология и разведка. 1990. № 4.
7. Петров А. В., Никитин А. А. Многомерные аналогии способов обратных вероятностей и самонастраивающейся фильтрации//Изв. вузов. Геология и разведка. 1989. № 2.
8. Тархов А. Г. К вопросу об использовании теории информации в разведочной геофизике//Изв. АН АрмССР. Сер. Геологические и географические науки. 1959. Т. XII. № 6.
9. Тархов А. Г., Бондаренко В. М., Никитин А. А. Комплексирование геофизических методов.— М.: Недра, 1982.

УДК 552.08

© Коллектив авторов, 1991

## Теплофизические исследования горных пород и руд

Ю. А. ПОПОВ, В. М. КОРОСТЕЛЕВ, В. В. БЕРЕЗИН, Р. А. РОМУШКЕВИЧ

Изучение тепло- и теплопроводности, относящихся к основным физическим свойствам горных пород и руд, традиционно занимает важное место в геотермии и становится все более значимым в петрофизических исследованиях, особенно при комплексном изучении разрезов сверхглубоких скважин, и в поисково-разведочных работах на месторождениях полезных ископаемых.

В настоящее время петротепловые исследования проводятся с помощью различных приборов, обеспечивающих измерение тепловых свойств пород и руд в основном на образцах. К ним прежде всего относятся тепловой компаратор КТ-3, приборы  $\lambda$ -профиль,  $\alpha$ ,  $\lambda$ -профиль [8], автоматизированная установка для определения тепловой активности образцов пород и руд [5], приборы ИТ-4, ЛИТОС, ИТЭМ-20. Из современных зарубежных разработок наибольший интерес представляют приборы серии Quick Thermal Meter, ТС-3000 (Япония) [6].

Метод сканирования и реализующая его аппаратура [5, 8] позволили значительно увеличить объем информации о тепловых свойствах пород, получить новые данные о теплопроводности минералов и руд, а также об анизотропии минеральных сред при нормальных условиях. Важнейшую роль в совершенствовании аппаратурно-методической базы за последние годы сыграли высокопроизводительные бесконтактные измерения тепловых свойств с оценкой степени анизотропии образ-

цов, расширение диапазона измерений теплопроводности до 40—50 Вт/(м·К), массовые измерения на керне и минералах без их разрушения. Применение подвижного источника энергии, положенное в основу метода сканирования, оказалось эффективным при измерении тепловых свойств образцов, а также при разработке аппаратуры для теплового каротажа в обводненных скважинах, предназначенного для теплофизических исследований разрезов рудных месторождений [3].

На основе метода сканирования создан и внедрен в практику петротепловых исследований комплекс, включающий установки: лабораторную лазерную для определения тепло- и теплопроводности образцов; для массовых неразрушающих измерений теплопроводности по керну; автоматизированную для определения тепловой активности образцов; для измерения теплопроводности пород в неглубоких сухих шпурах; аппаратуру теплового каротажа для теплофизических исследований разрезов.

Создание комплекса способствовало развертыванию работ в следующих направлениях: изучение тепловых свойств минералов в целях интерпретации результатов теплофизических исследований минеральных сред; определение тепловых свойств пород и руд в целях составления петротепловой классификации; массовые комплексные теплофизические исследования керна Кольской, Саатлинской, Уральской, Криворожской, Кубанской, Мурунтау-

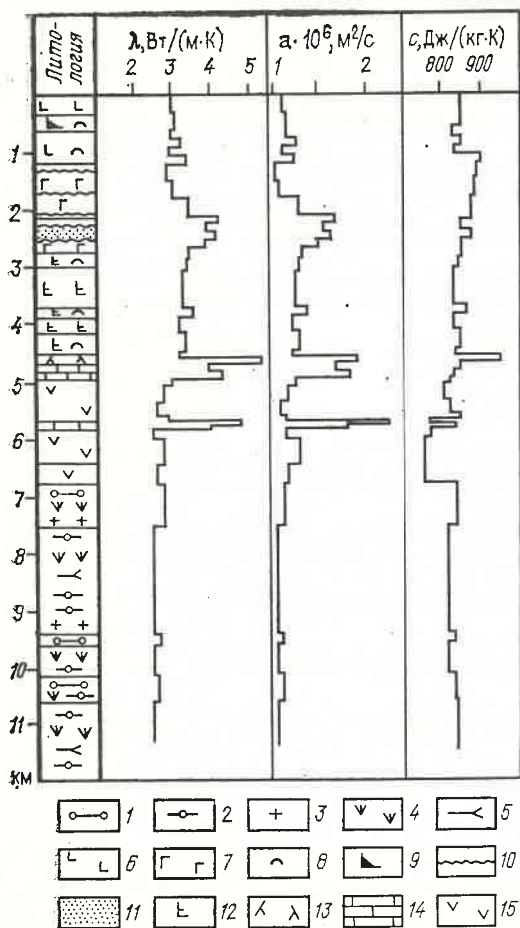


Рис. 1. Распределение тепловых свойств пород по разрезу скв. СГ-3:

1 — двуслюдяные гнейсы с высокоглиноземистыми минералами; 2 — биотитовые плагиогнейсы; 3 — плагиограниты; 4 — амфиболиты; 5 — метаультрамафиты; 6 — диабазы; 7 — габбро; 8 — туфы; 9 — пироксеновые и пикритовые порфиры; 10 — алевролиты, филлиты; 11 — песчаники; 12 — актинолитизированные диабазы; 13 — андезитовые порфиры; 14 — известняки, доломиты; 15 — аподиабазовые и апоандезитовые сланцы

ской и других сверхглубоких скважин; построение детальных геотермических разрезов Кольской и Уральской сверхглубоких скважин; теплофизические исследования гелиотермозоны для обеспечения интерпретации данных тепловой аэросъемки; массовые теплофизические измерения по керну и построение петротепловых моделей геологических объектов, перспективных на геотермальные ресурсы; теплофизическое экспрессное подразделение руд на минеральные и технологические типы; теплофизическое изучение разрезов рудных месторождений.

Внедрение метода сканирования и реализующей его аппаратуры в практику петрофизических исследований на объектах сверхглубокого бурения позволило в короткие сроки без разрушения уникального кенового материала получить детальную информацию о тепловых свойствах пород, что необходимо для решения задач программы сверхглубокого бурения, включая комплексное изучение физических свойств и термодинамического состояния вещества земной коры и получение достоверной информации о тепловом режиме недр. В частности, в результате исследований более 9 тыс. образцов керна Кольской сверхглубокой скв. СГ-3 построена комплексная теплофизическая модель разреза (рис. 1), получены новые данные о закономерностях изменения тепловых свойств в зависимости от глубины залегания, состава и строения пород, степени их вторичных изменений, о связи тепловых свойств с другими петрофизическими характеристиками и т.д. [4, 9, 11].

Ввиду контрастности пород скв. СГ-3 по тепловым свойствам, например, теплопроводность  $\lambda$  варьирует в диапазоне 1,5—7,3 Вт/(м·К), эти параметры использовались для литологического расчленения разреза, выделения зон оруденения, вторичных изменений, повышенной трещиноватости пород. Причем для большинства пород тепловые свойства более информативны, чем традиционно изучаемые плотность, магнитная восприимчивость и скорость распространения продольных волн. Так, при наличии сильной зависимости теплопроводности вулканогенных пород от степени метаморфизма (увеличение на этапе низших фаций и последующее уменьшение на этапе высших) плотность и магнитная восприимчивость практически не изменяются. На основании детальных данных о тепловых свойствах пород разреза существенно уточнены имеющиеся представления о характере изменения теплового поля в районе заложения скв. СГ-3 (рис. 2), получены более надежные оценки плотности глубинного теплового потока (55 мВт/м²) и температурного режима коры северо-востока Балтийского щита [1].

Таким образом, использование метода сканирования при работах на объектах сверхглубокого бурения зна-

чительно повышает информативность теплофизических и геотермических исследований глубинного строения земной коры и ставит тепловые свойства в ряд ведущих петрофизических параметров пород.

Достоинства метода сканирования — широкий диапазон, высокая точность, производительность, неразрушающий характер измерений, возможность изучения неоднородности и анизотропии — позволили впервые приступить к детальным теплофизическим исследованиям различных геологических объектов, решить ряд методических вопросов, включающих определение шага измерений керна по скважинам, необходимого объема образцов, анизотропии и влагонасыщенности пород, разработать методику. В результате получены репрезентативные данные о тепловых свойствах вмещающих пород, руд и зон околорудных изменений, выявлены закономерности изменения тепловых свойств в зависимости от минерального состава, структурно-текстурных особенностей, степени метасоматических изменений и метаморфизма, построены геолого-теплофизические разрезы и модели месторождений и других геологических объектов.

Широкое опробование метода на полиметаллических месторождениях показало, что массовые детальные исследования тепловых свойств позволяют решать такие задачи, как литологическое, а в некоторых случаях и литолого-петрографическое расчленение разрезов, выделение рудных зон и зон околорудных изменений вмещающих пород, типизация руд [12]. На рис. 3 представлен фрагмент распределения теплопроводности и коэффициента тепловой неоднородности  $\beta$  [12] по одной из рудных скважин месторождения Восточный Джимион (жильный тип), который свидетельствует о необходимости детальных теплофизических измерений по разрезам месторождений подобного типа и подтверждает вывод об информативности тепловых свойств.

В результате изучения докембрийских железисто-кремнистых формаций (КМА, Кривой Рог, месторождения Египта и Гвинеи) установлены корреляционные связи теплопроводности с содержанием рудных минералов и главных химических компонентов бедных железных руд. Это дало возмож-

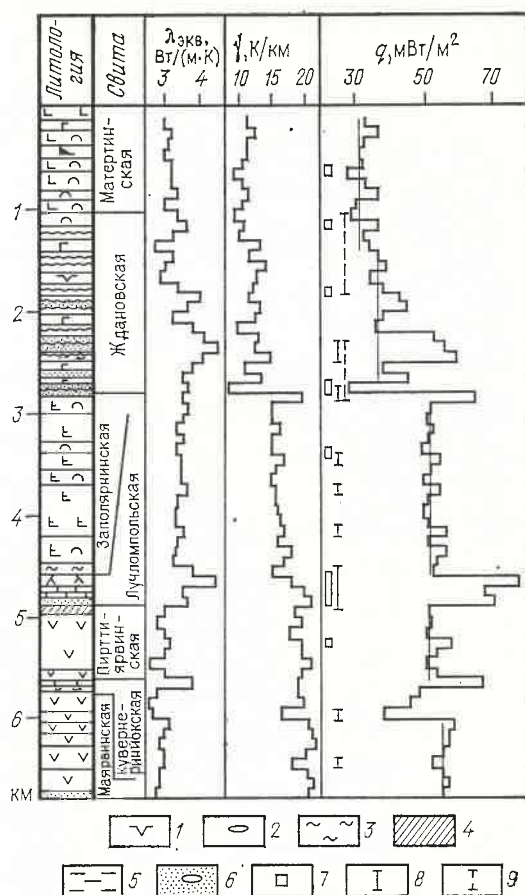


Рис. 2. Геотермический разрез Печенгской структуры:

1 — серпентиниты; 2 — гравелиты, конгломераты; 3 — тальк-хлоритовые сланцы; 4 — мраморы; 5 — кварц-карбонат-сланцевые сланцы; 6 — метаморфизованные песчаники; 7 — подземные воды; 8 — зоны тектонических нарушений; 9 — зоны трещиноватости; остальные усл. обозн. см. рис. 1

ность провести типизацию руд, а в отдельных случаях (Михайловское месторождение, КМА) — геолого-технологическое картирование неокисленных железистых кварцитов [2, 7].

Петротепловые исследования минерализованных зон северной части Комсомольского рудного района позволили выявить зависимость теплопроводности пород от степени метасоматических изменений (табл. 1).

В ходе теплофизического изучения рудных месторождений накоплено множество данных о теплопроводности различных типов руд. Установлено, что сплошные сульфидные руды значительно различаются по теплопроводности (табл. 2). Определены фак-



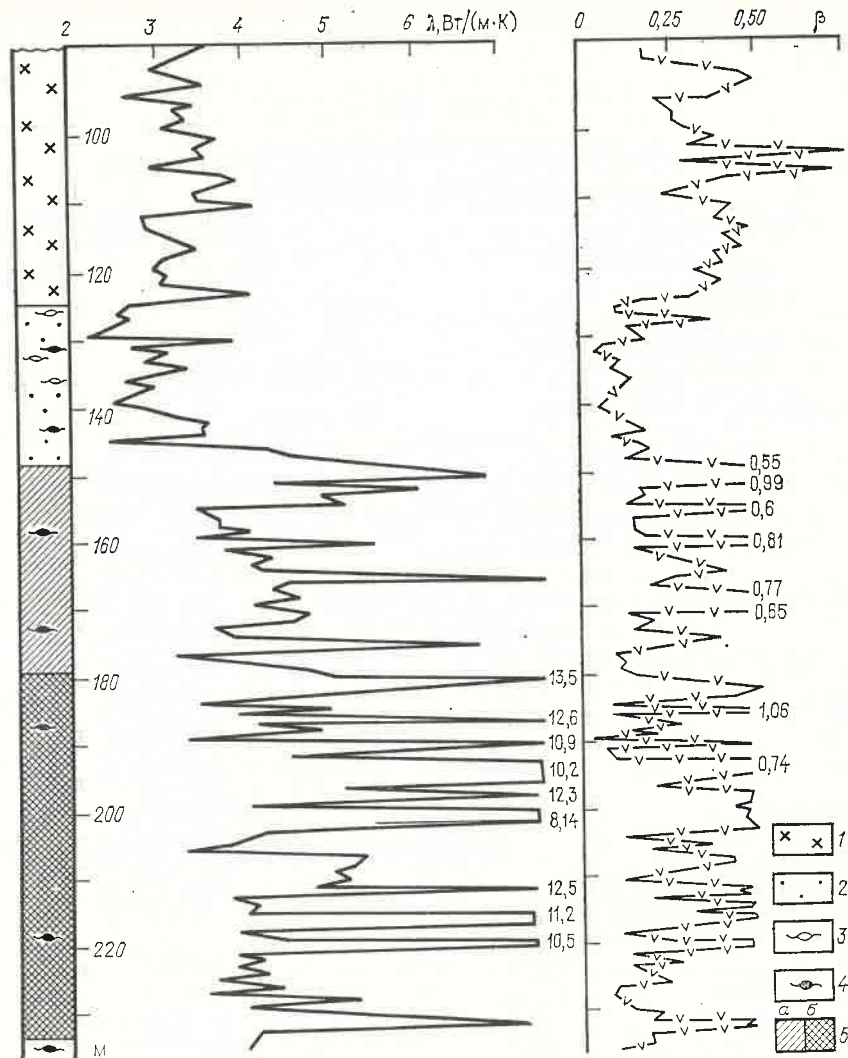


Рис. 3. Распределение теплопроводности и коэффициента тепловой неоднородности по рудной скважине месторождения Восточный Джимдон:

1 — кристаллические сланцы; 2 — амфиболиты;

3 — амфиболиты измененные; 4 — сплошные альбит-кварц-хлоритовые метасоматиты; 5 — рудные интервалы (а — прожилково-вкрапленные руды, б — сплошные)

торы, обуславливающие теплопроводность указанных руд: количественное содержание рудных минералов, структурные особенности, степень метаморфизма. Высокая теплопроводность характерна для сплошных серноколчеданных и колчеданно-полиметаллических (преобладает пирит) руд. Теплопроводность существенно сфалеритовых руд изменяется от 2,75 до 10,4 Вт/(м·К), что связано с наличием железа в сфалерите [10]. Низкие значения теплопроводности присущи существенно галенитовым рудам. Руды с тонкозернистым строением, а также интенсивно катаклазированные отли-

чаются пониженными значениями теплопроводности. Теплопроводность интенсивно метаморфизованных серноколчеданных руд повышается до 20—25 Вт/(м·К).

Особенность метода сканирования — неразрушающий характер измерений — позволяет наиболее полно применять его при изучении тепловой анизотропии. На основании анализа большого числа образцов минералов из музейных коллекций существенно расширены и уточнены имеющиеся данные о теплопроводности породообразующих, рудных и акцессорных минералов как в моно-, так и поликристаллическом

# 1. Теплопроводность пород в связи с различной степенью их метасоматического преобразования

| Породы                                       | Содержание реликтов исходной породы, % | $\lambda_{\text{ср}}$ , Вт/(м·К) |
|----------------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------|
| Гранитоиды слабоизмененные                   | 85—95                                  | 2,40—2,50                        |
| Гранитоиды турмалинизированные окварцованные | 40<br>(калишпат, плагиоклаз, кварц)    | 2,62—2,92                        |
| Метасоматиты турмалин-кварцевые              | 10—15<br>(калишпат, плагиоклаз)        | 3,07—3,44                        |
| Метасоматиты сплошные турмалин-кварцевые     | 0                                      | 3,74—4,15                        |

## 2. Теплопроводность руд месторождений свинца и цинка, Вт/(м·К)

| Типы руд                     | Минеральные разновидности руд                                           | Колчеданные |                 |              | Жилые              |
|------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|-------------|-----------------|--------------|--------------------|
|                              |                                                                         | Кизил-Дере  | Западное Текели | Холоднинское | Восточный Джимитон |
| Серноколчеданный             | Сплошная (массивная, густовкрапленая, тонкополосчатая)                  | 15,2, 0,13  | 12,2, 0,25      | 12,0, 0,20   | 9,76, 0,33         |
|                              |                                                                         | 1,45, 54    | 2,01, 9         | 1,88, 44     | 0,48, 44           |
|                              | Вкрапленная (вкрапленная, прожилковая, пятнистая, гнездовая)            | 8,90, 0,27  | 7,70, 0,29      | 7,88, 0,27   | 7,90, 0,30         |
|                              |                                                                         | 1,45, 13    | 0,47, 7         | 0,98, 30     | 1,37, 48           |
| Колчеданно-полиметаллический | Сплошная, преобладают: пирит                                            | 13,5, 0,19  | 10,8, 0,29      | 11,4, 0,16   | —                  |
|                              |                                                                         | 3,14, 17    | 1,63, 15        | 1,72, 30     | —                  |
|                              | сфалерит                                                                | —           | —               | 7,25, 0,21   | 10,4, 0,47         |
|                              |                                                                         | —           | —               | 1,60, 13     | 0,52, 25           |
|                              | галенит                                                                 | —           | —               | 3,42, 0,55   | 4,18, 0,60         |
|                              |                                                                         | —           | —               | — 5          | — 9                |
|                              | Вкрапленная (вкрапленная, пятнистая, прожилковая; сфалерит преобладает) | —           | —               | 6,42, 0,18   | 6,38, 0,50         |
|                              |                                                                         | —           | —               | 0,52, 15     | 1,0, 50            |

Примечание. В числителе —  $\lambda_{\text{ср}}$ ,  $\beta$ , в знаменателе —  $\sigma$ ,  $n$  — число проб.

состоянии [10]. Кроме того, повышается качество интерпретации данных исследований теплопроводности горных пород и руд применительно к различным геолого-геофизическим задачам.

Изучение тепловой активности пород, определяющей наряду с другими факторами характер температурного поля земной поверхности, играет важную роль в методическом обеспечении тепловой аэрокосмической съемки. До последнего времени тепловую активность рассчитывали по результатам комплексных измерений тепловых свойств, что приводило к значительной погрешности как вследствие при-

сущей породам неоднородности, так и в силу косвенного характера измерений. Исследование больших площадей при тепловой съемке требует еще и массовых измерений в целях получения репрезентативных данных.

Реализация одной из теоретических моделей метода сканирования позволила создать автоматизированную установку для непосредственных массовых измерений тепловой активности образцов пород в диапазоне 500—7000 Дж/(м<sup>2</sup>с<sup>1/2</sup> К) с погрешностью не более 10 % [5]. Она позволяет проводить детальные измерения с учетом неоднородности образца. Измерения и обработка результатов производятся

с помощью комплекса вычислительных средств типа КТС-87.

При интерпретации результатов тепловой съемки важно выявить особенности изменения тепловых свойств по глубине гелиотермозоны, причем наиболее достоверная информация может быть получена лишь при измерениях в естественном залегании. На основе метода сканирования разработан прибор для измерений теплопроводности в сухих шпурах диаметром 80—90 мм глубиной до 1,5 м. Главный элемент прибора — перемещаемая по направляющей гильза с источником тепла (электролампа с встроенным отражателем) и бесконтактным дифференциальным регистратором температуры. На поверхности земли размещается блок привода, обеспечивающий перемещение измерительной гильзы вдоль образующей шпура. Информация поступает на диаграммную ленту самопишущего прибора. Диапазон значений теплопроводности 0,6—6 Вт/(м·К), погрешность до 10 %. Прибор может быть использован и при решении ряда горно-технических задач, связанных с определением теплового режима горных выработок.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Геотермический разрез* Печенгской структуры/В. В. Берзин, Ю. А. Попов//Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1988. № 7. С. 80—88.
2. *Использование* теплофизического анализа для геолого-технологического картирования железистых кварцитов Михайловского месторождения КМА/А. Б. Федорова, О. А. Голованчикова, Р. А. Ромушкевич и др./Сов. геология. 1988. № 2. С. 33—37.
3. *Ивашура А. И., Попов Ю. А.* Расчет температурного поля подвижного источника тепловой энергии применительно к задачам теплофизических исследований скважин.— М.: 1988. Деп. в ВИНТИ, № 79313.
4. *Кольская* сверхглубокая/Под ред. Е. А. Козловского.— М.: Недра, 1984.
5. *Методика* и аппаратура для определения тепловой активности образцов горных пород/В. М. Коростелев, Ю. А. Попов, А. М. Мандель и др./Изв. вузов. Геология и разведка. 1990. № 1. С. 88—96.
6. *Микропроцессоры* в теплофизических измерениях/В. П. Козлов, А. В. Станкевич.— Минск: БелНИТИ. 1986.
7. *Минерально-теплофизические* типы железных руд месторождений Умм-Нар и Умм-Хамис (АРЕ)/Л. Д. Оникненко, Ю. А. Попов, Ибрагим Салем и др./Изв. вузов. Геология и разведка. 1986. № 8. С. 112—114.
8. *Попов Ю. А.* Метод сканирования в петротепловых исследованиях.— М., 1988. Деп. в ВИЭМС, № 693-МГ.
9. *Теплопроводность* горных пород верхних горизонтов Печенгской структуры/Ю. А. Попов, В. Е. Бойцов, В. В. Берзин и др./Докл. АН СССР. 1986. Т. 289. № 5. С. 1206—1209.
10. *Теплопроводность* минералов/Ю. А. Попов, В. В. Берзин, Г. А. Соловьев и др./Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1987. № 3. С. 83—93.
11. *Теплопроводность* сухих и водонасыщенных образцов малопористых кристаллических пород кольской серии архея/Н. Е. Галдин, В. Д. Нартиков, С. В. Семашко и др./Изв. АН СССР. Сер. геол. 1986. № 8. С. 23—31.
12. *Теплофизическое* изучение разреза колчеданно-полиметаллического месторождения Восточный Джимидон (Северная Осетия)/Ю. А. Попов, В. М. Коростелев, Р. А. Ромушкевич и др./Изв. вузов. Геология и разведка. 1985. № 12. С. 79—88.

## Минералогия, петрография, литология

УДК 553.06 : 553.22

© Н. Ю. Бардина, В. С. Попов, 1991

### Систематика метасоматических горных пород и фаций метасоматизма малых глубин

Н. Ю. БАРДИНА, В. С. ПОПОВ

Метасоматические процессы развиваются в широком интервале глубин — от поверхности Земли до верхней мантии. В данной статье рассматриваются метасоматиты, которые возникают на малых глубинах ( $\leq 5$  км) в результате преобразования осадочных, магматических и метаморфических горных пород под влиянием просачивающихся сквозь них нагретых водных раство-

ров различного происхождения. Такое преобразование заключается в растворении ранее существовавших минералов и отложении на их месте новых минеральных фаз, что приводит к изменению химического состава породы при сохранении ее объема.

В целом гидротермальные растворы не равновесны по отношению к горным породам, но в результате взаимо-



действия в каждом ограниченном объеме быстро устанавливается локальное химическое равновесие [5]. Физическая подвижность жидкой фазы и непостоянство ее состава приводят к смещению локальных равновесий, зональному распределению минеральных парагенезисов, их телескопированию и в конечном итоге к неустойчивости минерального состава метасоматитов. Это не только затрудняет классификацию метасоматических горных пород, но и вызывает вопрос о том, могут ли метасоматиты вообще называться горными породами [4]. Поэтому в существующих классификациях метасоматитов главное внимание уделяют не составу отдельно взятых пород, а зональности и стадийности метасоматического процесса, связи его с магматизмом, а также метасоматическим формациям [Д. С. Коржинский, 1955; В. Д. Рундквист, И. Г. Павлова, 1974; 1—4, 6—9]. Петрографическая типизация становится при этом размытой, а многие описательные термины (грейзены, вторичные кварциты и т. п.), теряя определенность, начинают относиться уже не к конкретным породам, а к разнородным по составу метасоматическим колонкам и формациям.

Вместе с тем принцип локального химического равновесия открывает возможность систематики метасоматитов на более строгой петрографической основе с выделением метасоматических горных пород по минеральному составу и их диагностикой в образцах и шлифах. По аналогии с метаморфическими породами метасоматиты, сформированные в сходных условиях, могут быть сгруппированы в фации. Закономерные пространственные и хронологические сочетания метасоматических горных пород и фаций метасоматизма отражают эволюцию гидротермальных систем в разных геологических обстановках.

**Главные петрографические типы метасоматических горных пород.** Критерием для отнесения метасоматитов к тому или иному типу служит наличие минеральных парагенезисов, устойчивых в относительно узких интервалах температуры и щелочности-кислотности гидротермальных растворов (табл. 1). Количественные оценки  $T$  и  $pH$  растворов основаны на обобщении экспериментальных данных и термодинамических расчетов, результатов исследова-

ния газовой-жидких микровключений, а также материалов прямых наблюдений в активных гидротермальных системах. Кроме того, учтены имеющиеся классификации отдельных групп метасоматитов в координатах  $T-pH$  [И. П. Щербань, 1975; 4; 10].

Соотношения между различными типами метасоматических горных пород отражены на диаграмме «температура—щелочность-кислотность гидротермальных растворов» (рис. 1). Эта диаграмма, являясь общей принципиальной схемой, не охватывает всего многообразия условий формирования метасоматитов. Она представляет лишь одно из сечений многомерной системы, характеризующей природные метасоматические процессы, и не учитывает влияния состава растворов (отношений  $K^+/H^+$ ,  $Na^+/H^+$  и др.), количества растворенной углекислоты, фугитивности кислорода, серы и других факторов, каждый из которых может служить основанием для более детальной классификации. Если температурные пределы формирования метасоматитов даны достаточно точно, то для  $pH$  взяты лишь средние величины (см. рис. 1). В действительности каждый из выделенных типов метасоматитов устойчив в более широких и частично перекрывающихся друг друга интервалах  $pH$ .

Поскольку константы диссоциации воды и реакций гидролиза зависят от температуры и концентрации растворенных солей, абсолютная величина  $pH$  не может служить мерой щелочности-кислотности гидротермальных растворов в интервале температур. В качестве такой меры принято отклонение от нейтрального значения  $pH$  ( $a_{H^+} = a_{OH^-}$ ) одномолярного раствора  $NaCl$  при  $P=100$  МПа [12]. Относительно кривой  $a_{H^+} = a_{H^-}$  выделены области щелочных, близких к нейтральным и кислых гидротермальных растворов и соответственно три группы метасоматических горных пород, равновесных по отношению к растворам разной щелочности-кислотности (см. рис. 1, табл. 1).

По температуре формирования метасоматиты разделены на низко-средне- и высокотемпературные. Эти градации в значительной мере условны. Граница между низко- и среднетемпературными метасоматическими породами (300 °C) приблизительно совпадает с верхним пределом устойчивости глинистых минералов, а граница между

1. Главные типы метасоматических горных пород

| 1. Главные типы метасоматических горных пород                             |                   |                                                                                                   |                                      |         |                                                    |
|---------------------------------------------------------------------------|-------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|---------|----------------------------------------------------|
| Типы метасоматитов                                                        | Исходный субстрат | Минеральный состав метасоматитов                                                                  | Параметры гидро-термального раствора |         | Рудная минерализация, сопряженная с метасоматитами |
|                                                                           |                   |                                                                                                   | T, °C                                | pH      |                                                    |
| Метасоматиты, равновесные по отношению к щелочным растворам               |                   |                                                                                                   |                                      |         |                                                    |
| Фениты, твэйтозиты                                                        | 1, 2, 3           | Нефелин, калиево-натриевый полевой шпат, щелочные пироксены и амфиболы, биотит, магнетит, кальцит | 800—500                              | 10—8    | Nb, Zr, Be, PЗЭ                                    |
|                                                                           | 1, 2              | Содалит, калиево-натриевый полевой шпат, щелочные пироксены и амфиболы, биотит, меланит, кальцит  | 600—300                              | 9,5—8   | —                                                  |
| Содалитовые метасоматиты                                                  | 1, 2              | Анальцит, щелочные пироксены и амфиболы, хлорит, кальцит, флюорит                                 | 350—200                              | 9—7     | —                                                  |
|                                                                           | 1, 2              | Анальцит, щелочные пироксены и амфиболы, хлорит, кальцит, флюорит                                 | 600—400                              | 8,5—7   | Nb, Zr, Be, PЗЭ                                    |
| Анальцимовые метасоматиты                                                 | 1, 2              | Альбит, эгирин, рибекит, магнетит                                                                 | 500—300                              | 8—7     | —                                                  |
|                                                                           | 1, 2              | Эгирин, флюорит, кальцит                                                                          | 500—300                              | 8—7     | —                                                  |
| Микроклиниты                                                              | 1, 2, 3           | Альбит, кварц, хлорит, кальцит, анкерит, апатит, гематит                                          | 300—150                              | 7—6     | U, Mo                                              |
| Метасоматиты, равновесные по отношению к растворам, близким к нейтральным |                   |                                                                                                   |                                      |         |                                                    |
| Магнезиальные скарны                                                      | 3                 | Форстерит, диопсид, фассант, кальцит, шпинель, периклаз, флогопит, бораты                         | ≥900—600                             | 8—5,5   | Fe, B                                              |
|                                                                           | 1, 2, 3           | Гроссулар-андрадит, диопсид-геденберит, волластонит, везувин, эпидот                              | 700—450                              | 8—5,5   | —                                                  |
| Известковые скарны                                                        | 1, 2              | Ортоклаз-микроклин, флогопит-биотит, кварц, ангидрит                                              | 600—350                              | 6,5—4,5 | Sn, Mo, Cu                                         |
|                                                                           | 1, 2, 3           | Альбит (плагноклаз), кварц, амфибол, биотит, везувин, карбонат                                    | 500—300                              | 6,5—4,5 | —                                                  |
| Кварц-калцишатовые (биотитовые) метасоматиты                              | 1, 2              | Турмалин, кварц, серицит, хлорит                                                                  | 500—250                              | 6,5—3,5 | Sn, W, Cu                                          |
|                                                                           | 1, 2              | Эпидот, актинолит, хлорит, альбит, адуляр, цеолиты, кальцит, пирит                                | 300—150                              | 6—4,5   | Cu, Zn, Pb, Ag                                     |
| Кварц-альбитовые (плагноклазовые) метасоматиты                            | 1, 2              | Гидрослюд, смешанослойные силикаты, анкерит, кварц                                                | 150—50                               | 6,5—4   | Au, U, As, Sb, Hg                                  |
| Турмалиниты                                                               |                   |                                                                                                   |                                      |         |                                                    |
| Пропилиты                                                                 |                   |                                                                                                   |                                      |         |                                                    |
| Гидрослюдиты                                                              |                   |                                                                                                   |                                      |         |                                                    |

Метасоматиты, равновесные по отношению к кислым растворам

|                         | 1    | 1                                                                                         | 550—300 | 5—3 | Mo, Sn, W, Be,<br>Ta, Bi         |
|-------------------------|------|-------------------------------------------------------------------------------------------|---------|-----|----------------------------------|
| Цвиттеры                |      | Протолиттонит-длинвальдит-сидерофиллит, кварц, топаз, флюорит                             |         |     |                                  |
| Грейзены                | 1    | Мусковит-лепидолит, кварц, топаз, альбит, флюорит                                         | 500—300 | 5—3 |                                  |
| Слюдиты                 | 2, 3 | Флогопит, биотит, мусковит, парагонит, маргарит, флюорит, тальк, хлорит, эфесит, селлаит  | 500—300 | 5—3 |                                  |
| Серпентиниты (березнты) | 1    | Серицит, кварц, кальцит, доломит-анкерит, пирит                                           | 400—200 | 5—4 | Mo, Cu, Zn, Pb,<br>Bi, Au, Ag, U |
| Листвениты              | 2    | Фукулит, доломит-анкерит, магнезит-брейнерит, кварц, пирит                                | 400—200 | 5—4 |                                  |
| Аргиллизиты             | 1, 2 | Каолинит, монтмориллонит, хлорит, цеолиты, опал, аллофан, галлуазит, сидерит кварц        | 300—50  | 5—2 | As, U, As, Sb,<br>Hg             |
| Вторичные кварциты      | 1, 2 | Кварц, корунд, андалузит, диаспор, пиррофиллит, серицит, алунит, гематит, пирит, марказит | 500—300 | 4—1 | —                                |

Примечание. Исходный субстрат: 1 — кислые магматические, терригенные породы и продукты их метаморфизма, 2 — магматические породы повышенной основности и продукты их метаморфизма, 3 — карбонатные породы.

ду средне- и высокотемпературными метасоматитами (500 °C) — с низкими пределами устойчивости форстерита, эгирин-авгита, нефелина и ряда других минералов. Высокотемпературные метасоматиты образуются под воздействием гидротермальных растворов, находящихся в надкритическом состоянии.

**Минеральные фации метасоматитов малых глубин.** Под минеральной фацией метасоматизма понимается совокупность минеральных парагенезисов, находящихся в локальном химическом равновесии с гидротермальным раствором в определенных интервалах  $T$  и  $pH$ . Минеральная фация объединяет метасоматические горные породы, которые развиваются по протолиту разного состава под воздействием растворов, имеющих одинаковую температуру и щелочность-кислотность. При выделении фаций метасоматизма использован тот же методический подход, что и при выделении минеральных фаций метаморфизма. Различие заключается лишь в том, что метаморфические фации соответствуют определенным интервалам  $T$  и  $P$ , а метасоматические фации малых глубин — интервалам  $T$  и  $pH$ . Метасоматические фации так же, как метаморфические, могут быть описаны с помощью диаграмм «состав—парагенезис».

Сравнительный анализ геологических материалов и результатов физико-химического моделирования природных метасоматических процессов позволяет выделить девять фаций метасоматитов малых глубин (рис. 2, табл. 2). Границы между фациями в координатах  $T$ — $pH$  совпадают с границами полей устойчивости главных типоморфных минералов и их парагенезисов. Эти границы не занимают строго фиксированного положения и могут смещаться в зависимости от изменения химического состава исходных пород и взаимодействующего с ними гидротермального раствора, вариаций  $f_{O_2}$ ,  $f_{S_2}$  и других параметров. Однако смещение границ не приводит к принципиальным изменениям топологии схемы фаций, показанной на рис. 2.

Поскольку предлагаемая схема фаций не учитывает химической специфики гидротермальных растворов (обогащения бором, фтором, литием и т. п.), то турмалиниты, выделенные как тип метасоматитов и возникающие при на-



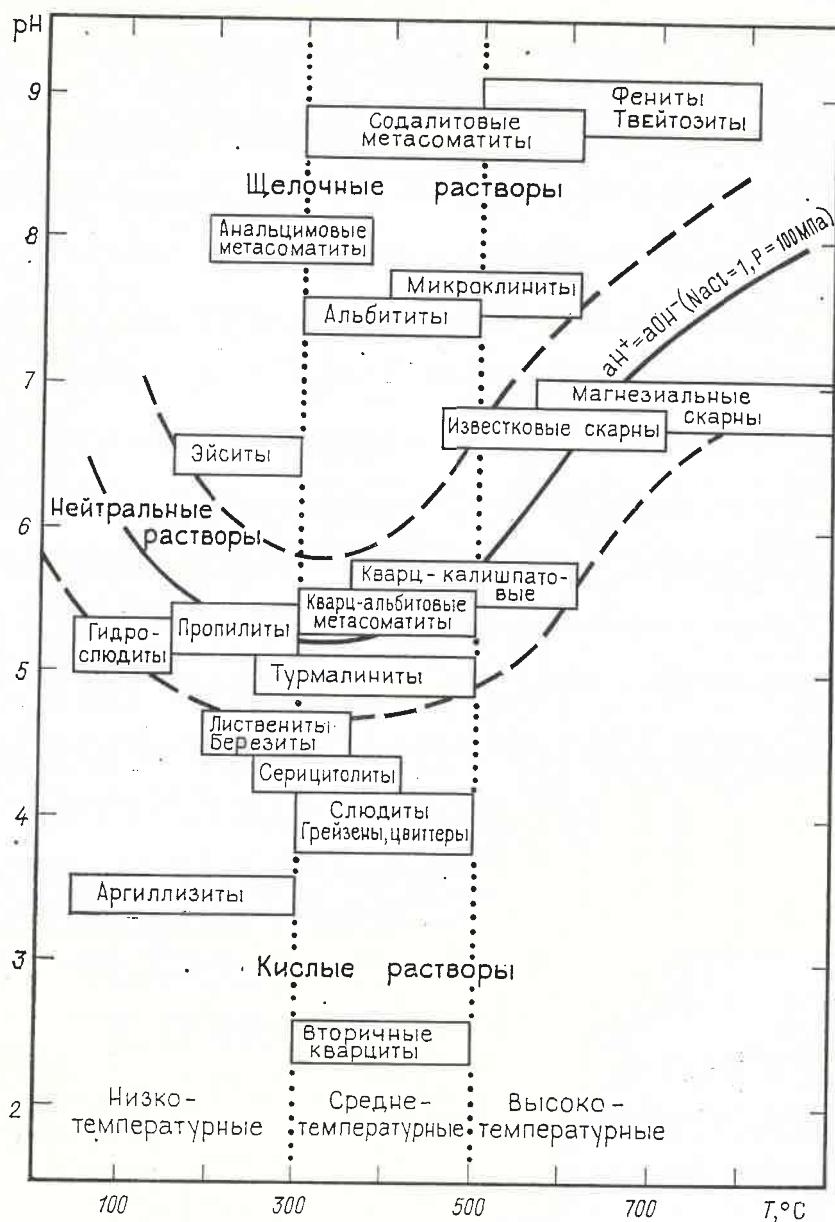


Рис. 1. Систематика метасоматических горных пород

личии в растворе достаточного количества  $H_2BO_3$ , не рассматриваются в качестве самостоятельной фации. Уменьшение концентрации  $H_2BO_3$  приводит к смене турмалинитов кварц-альбитовыми метасоматитами, пропилитами, серицитолитами, вторичными кварцитами, аргиллизитами.

Следует подчеркнуть, что авторы вкладывают в понятие «метасоматическая фация» иной смысл по сравнению с классификацией В. А. Жарикова и Б. И. Омеляненко [2, 8], в которой фации выделяются по другим крите-

риям: особенностям состава протолита, щелочнометалльности гидротермальных растворов, глубине формирования метасоматитов. Метасоматические фации, по В. А. Жарикову и Б. И. Омеляненко, ближе к выделенным нами петрографическим типам метасоматических горных пород (см. табл. 1).

Определив петрографические типы (виды и разновидности) метасоматических горных пород, объединив сходные по условиям образования типы метасоматитов в фации, установив зональность метасоматических колонок

и общую стадийность формирования фаций, можно получить информацию о составе и строении зон и ареалов метасоматизма, необходимую и достаточную для прогнозных оценок и генетической интерпретации. Выделение метасоматических формаций [В. А. Жариков, Б. И. Омеляненко, 1965; Д. В. Рундквист, И. Г. Павлова, 1974; 2; 4; 6; 8] вряд ли добавляет к этой информации что-либо новое. По сути дела, главным критерием выделения формаций является наличие того или иного типа метасоматитов в тыловой части колонки, что отражает специфику исходного состава и начальную температуру гидротермального раствора, вступающего во взаимодействие с горными породами. Не случайно, формации обозначают такими же терминами, как и петрографические типы метасоматитов (формации скарнов, грейзенов, вторичных кварцитов и т. п.). Внешние зоны метасоматических колонок, относимых к разным формациям, во многом оказываются сходными, что обусловлено однотипностью обработанного гидротермального раствора, который прореагировал с горными породами во внутренних зонах.

**Эволюция метасоматизма в разных геологических обстановках.** В развитии метасоматических процессов обычно выделяют несколько стадий: раннюю щелочную и заключительную стадию остаточных нейтральных растворов [Д. С. Коржинский, 1955; В. А. Жариков, Б. И. Омеляненко, 1965, 8]. Эта схема широко используется в геологической практике и часто рассматривается как универсальная. Однако не следует забывать, что данная схема основана на ряде геологических и физико-химических допущений, которые существенным образом влияют на выводы о типах и последовательности стадий. Предполагается, что гидротермальные растворы отделяются от кислого магматического расплава, а затем непрерывно эволюционируют по мере снижения температуры и взаимодействия с горными породами. Эволюция происходит в соответствии с теоретической моделью, в которой большое значение придается кислотно-основному фильтрационному эффекту и волнообразному изменению щелочности-кислотности во времени.

Сравнительный анализ последовательности формирования метасомати-



Рис. 2. Фации метасоматитов малых глубин:

1 — границы фаций; 2 — граница  $T$  —  $pH$  области формирования метасоматитов; минералы и их сочетания, определяющие границы фаций: Aam — щелочной амфибол, Ab — альбит, ACpx — щелочной клинопироксен, исключая эгирин, Aeg — эгирин, Anp — анальцит, Am — Ca—Mg—Fe амфибол, And — андалузит, Bt — биотит, Chl — хлорит, Cpx — Ca—Mg—Fe клинопироксен, Fsp — полевошпат, Ga — гранат, Hm — гидрослюда, Kaol — каолинит, Ms — мусковит, Ne — нефелин, Par — парагонит, Pr — пиррофиллит, Ser — серицит, Sod — содалит, Zo — цоизит

тов в разных геологических обстановках приводит к выводу, что хронологические ряды метасоматических горных пород, которые возникли под воздействием гидротермальных растворов, связанных с одним источником, часто отражают не чередование щелочных и кислотных стадий, а монотонное увеличение или снижение  $pH$  вследствие нейтрализации растворов в ходе химического взаимодействия с горными породами и охлаждения (табл. 3, рис. 3). При этом последовательность стадий минералообразования во многом совпадает с зональным распределением синхронных минеральных парагенезисов в метасоматической колонке от внутренних зон к внешним.

## 2. Фации метасоматитов малых глубин

| Фации                              | Петрографические типы метасоматитов                                 | T, °C |      | pH  |      |
|------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|-------|------|-----|------|
|                                    |                                                                     | от    | до   | от  | до   |
| Фенитовая                          | Фениты, содалитовые метасоматиты                                    | 300   | 800  | 8   | 10   |
| Анальцимовых метасоматитов         | Анальцимовые метасоматиты                                           | 200   | 400  | 6,5 | 9    |
| Полевошпатовых метасоматитов       | Микроклиниты, альбититы, эгирин-флюоритовые метасоматиты            | 300   | 700  | 6   | >8,5 |
| Скарновая                          | Магнезиальные и известковые скарны                                  | 450   | ≥900 | 5   | 8,5  |
| Кварц-полевошпатовых метасоматитов | Кварц-кашлишпатовые, кварц-альбитовые (плагноклазовые) метасоматиты | 300   | 600  | 5   | 6,5  |
| Пропилитовая                       | Пропилиты, эйситы, гидрослюдиты                                     | ~50   | 400  | 5   | 8    |
| Филлизитовая                       | Серицитолиты, березиты, листвениты, грейзены, цвиттеры, слюдиты     | 200   | 550  | 3   | 5    |
| Вторичных кварцитов                | Вторичные кварциты                                                  | 300   | 550  | 1   | 4    |
| Аргиллизитовая                     | Аргиллизиты                                                         | ~50   | 300  | 1   | 5    |

## 3. Стадийность и зональность метасоматитов в некоторых типовых геологических обстановках

| Геологические обстановки                                                                                            | Последовательность метасоматитов и их зональность от внутренних зон к внешним                                                                                               |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Щелочные магматические комплексы центрального типа; зоны щелочного метасоматизма на древних кратонах                | Фениты — анальцимовые метасоматиты<br>Фениты — полевошпатовые метасоматиты — пропилиты (кварц-карбонатные метасоматиты)<br>Полевошпатовые метасоматиты — пропилиты (эйситы) |
| Гипабиссальные гранитоидные интрузивы повышенной основности                                                         | Скарны — кварц-полевошпатовые метасоматиты — пропилиты<br>Турмалиниты, серицитолиты, березиты, листвениты — пропилиты                                                       |
| Гипабиссальные лейкогранитовые интрузивы                                                                            | Скарны — кварц-полевошпатовые метасоматиты — грейзены, слюдиты — турмалиниты, серицитолиты — пропилиты                                                                      |
| Ареалы предорогенного и орогенного вулканизма; конвективные гидротермальные системы в зонах тектонических нарушений | Серицитолиты, березиты, листвениты — аргиллизиты — пропилиты<br>Вторичные кварциты — пропилиты<br>Аргиллизиты — гидрослюдиты                                                |

Нарушение монотонности изменения pH во времени может быть обусловлено разбавлением магматогенных гидротермальных растворов экзогенными водами. Высокотемпературные водные растворы и рассолы, которые отделяются от затвердевающих магматических тел, обладают щелочной реакцией, а нагретые подземные или морские воды имеют меньшую величину pH. Поэтому вовлечение в конвективные гидротермальные системы боль-

шого объема экзогенных вод приводит к смене раннего относительно щелочного метасоматизма кислотным выщелачиванием, а последующая нейтрализация кислых растворов за счет взаимодействия с твердыми породами вновь вызывает увеличение pH (см. рис. 3).

Как известно, возрастание кислотности магматогенных гидротермальных растворов по мере снижения температуры обусловлено их уплотнением и



диссоциацией растворенных веществ. Например, вследствие диссоциации комплексных соединений фтора и бора с образованием  $\text{HF}$  и  $\text{H}_3\text{BO}_3$  рН растворов может достигать на некоторой стадии минимума, который фиксируется появлением грейзенов и турмалинитов, а затем при взаимодействии растворов с горными породами рН начинает повышаться и приближается к нейтральным значениям, характерным для пропилитов. Такой ход процесса типичен для метасоматизма, сопровождающего становление гипабиссальных лейкогранитовых интрузивов. Не исключено, что на стадии образования грейзенов, по крайней мере, часть воды также связана с экзогенным источником.

В тех гидротермальных системах, где доля магматогенных вод мала или вообще равна нулю, последовательность метасоматитов начинается с продуктов кислотного выщелачивания, а завершается метасоматическими горными породами, которые равновесны по отношению к растворам, близким к нейтральным (серицитолиты, березиты, листвениты—аргиллизиты—пропилиты; вторичные кварциты—пропилиты; аргиллизиты—гидрослюдиты). При этом минимальные значения рН часто достигаются благодаря образованию серной кислоты за счет разложения более раннего пирита (наложение аргиллизитов на филлизиты) или окисления вулканогенной серы (алуитовые вторичные кварциты).

Поступление гидротермальных растворов из эндогенных и экзогенных источников и тенденция к их нейтрализации позволяют просто и непротиворечиво объяснить строение хронологических рядов метасоматитов в различных геологических обстановках.

Таким образом, предлагаемая систематика предусматривает выделение петрографических типов метасоматических горных пород по минеральному составу и объединение их в группы по температуре и рН растворов, находящихся в локальном химическом равновесии с твердыми фазами. Выделяются группы метасоматитов, равновесных по отношению к щелочным, близким к нейтральным и кислым гидротермальным растворам, а также низко-средне- и высокотемпературные метасоматиты.

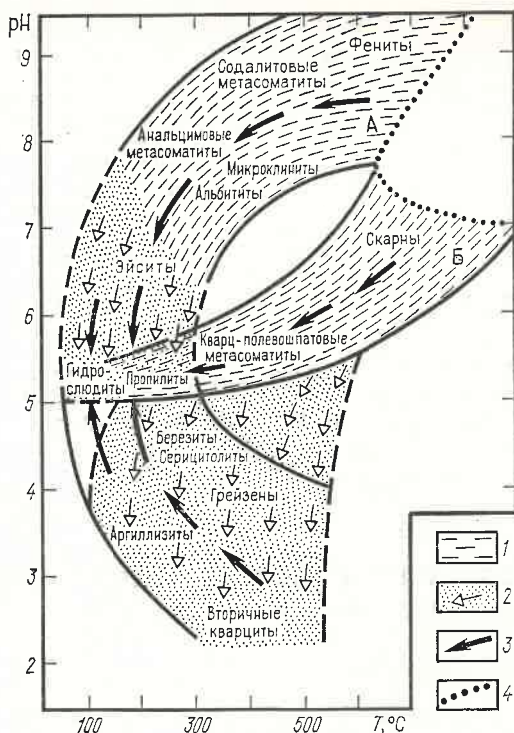


Рис. 3. Принципиальная схема стадийности и зональности метасоматитов:

тренды: 1 — эволюции магматогенных гидротермальных растворов, связанных с щелочными (А) и известково-щелочными (Б) магмами, 2 — эволюции экзогенных гидротермальных растворов и смешения магматогенных растворов с экзогенными водами (стрелки направлены в сторону увеличения доли экзогенных вод), 3 — нейтрализации гидротермальных растворов при их взаимодействии с горными породами (стрелки направлены от ранних стадий к поздним и от тыловых зон метасоматических колонок к фронтальным), 4 — граница  $T$  — рН области формирования метасоматитов

По аналогии с метаморфическими горными породами близкие по условиям формирования метасоматиты рассматриваются как минеральные фации, отвечающие определенным интервалам  $T$  и рН растворов.

Зональность и стадийность метасоматитов обусловлены снижением температуры, разбавлением магматогенных растворов нагретыми экзогенными водами, а также нейтрализацией эндогенных щелочных и экзогенных кислых гидротермальных растворов в ходе их химического взаимодействия с горными породами.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Грязнов О. Н. Генетическая классификация метасоматических процессов // Геология метаморфических комплексов. Свердловск, 1983. Вып. 10. С. 46—53.

2. Жариков В. А., Омельяненко Б. И. Классификация метасоматитов//Метасоматизм и рудообразование. М., 1978. С. 9—28.
3. Жданов В. В., Рундквист Д. В., Басков Е. А. Опыт систематики региональных метасоматитов и их рядов//Зап. Всесоюз. минер. об-ва. 1984. № 4. С. 408—416.
4. Зарайский Г. П. Зональность и условия образования метасоматических пород.— М.: Наука, 1989.
5. Коржинский Д. С. Теория метасоматической зональности.— М.: Наука, 1982.
6. Марин Ю. Б. Метасоматические формации и их рудоносность.— Л.: Изд-во ЛГИ, 1989.
7. Методика изучения гидротермально-метасоматических образований/Е. В. Плющев, О. П. Ушаков, В. В. Шатов и др.— Л.: Недра, 1981.
8. Омельяненко Б. И. Околорудные гидротермальные изменения пород.— М.: Недра, 1978.
9. Петрография/Под ред. А. А. Маракушева.— М.: Изд-во МГУ, 1986. Ч. III.
10. Русинов В. Л. Условия проявления вертикальной метасоматической зональности//Метасоматизм и рудообразование. М., 1984. С. 247—256.
11. Экспериментальное исследование биметасоматического скарнообразования/Г. П. Зарайский, В. А. Жариков, Ф. М. Стояновская и др.— М.: Наука, 1986.
12. Marshall W. L., Frank E. U. Ion product of water substance, 0—1000 °C, 1—10 000 bars: new international formulation and its background//J. Phys. and Chem. Ref. 1981. Vol. 10. № 2. P. 295—304.

УДК 550.42

© В. П. Макаров, 1991

## Особенности распределения относительных содержаний изотопов свинца

В. П. МАКАРОВ

В практике геохронологических исследований важное место занимают свинец-свинцовые методы определения возраста геологических образований (пород и минералов) оперирующие относительными содержаниями изотопов свинца, обозначаемых далее через  $C_k$  ( $k=204, 206, 207, 208$ ). Эти содержания подставляются в уравнения типа (1)

$$\frac{C_{207}}{C_{204}} = \gamma \frac{C_{206}}{C_{204}} + \Gamma, \quad (1)$$

где  $\Gamma$  — свободный член;  $\gamma = f(t)$  — угловой коэффициент;  $t$  — время образования геологического объекта. В пробе  $i$  относительные содержания связаны равенством (2)

$$C_{206i} + C_{207i} + C_{208i} + C_{204i} = 100\%. \quad (2)$$

Предполагается, что в минерале количество изотопов  $^{206}\text{Pb}$ ,  $^{207}\text{Pb}$  и  $^{208}\text{Pb}$  определяется радиоактивным распадом соответственно урана  $^{238}\text{U}$  и  $^{235}\text{U}$  и тория  $^{232}\text{Th}$ . Свинец  $^{204}\text{Pb} = \text{Pb} \times \times C_{204}$  ( $\text{Pb}$  — суммарное количество свинца в пробе  $i$ ) характеризует количество обыкновенного свинца  $^{204}\text{Pb}$ , и принимается постоянным для изучаемой системы (И. Е. Старик; 1961; Е. И. Гамильтон, 1968).

Ранее Штиф и Штэрн (Г. Фауль, 1955) на основе анализа взаимоотношений между содержаниями трех изотопов  $C_{206}^*$ ,  $C_{207}^*$  и  $C_{208}^*$ , определяемых из равенства  $C_{206}^* + C_{207}^* + C_{208}^* = 100\%$ , показали, что эти содержания подчиняются уравнению прямой линии, не соответствующей равенству (2). Между всеми изотопами свинца основные формы связи намечены в [2]. Более детально эти соотношения описаны ниже на основе анализа их распределений в урановых, урансодержащих минералах, рудах и некоторых породах. При этом установлено, что в них доминирует ( $C_k \geq 50\%$ ) либо  $^{206}\text{Pb}$ , либо  $^{208}\text{Pb}$ . Такие минералы условно будем называть «урановыми» или «ториевыми». Доля первых среди цирконов, сфенов,

ортитов и монацитов соответственно равна 91, 40, 12,5 и 0,0 %.

В качестве иллюстрации приведен анализ изотопного состава свинца в настуранах и валовых пробах месторождений № 1, 2 и 3. Рудные тела месторождения № 1 расположены в субвулканическом интрузиве, № 2 — среди кислых вулканитов девона, № 3 — в палеозойских субвулканических граносиенит-порфирах. Значения содержаний изотопов свинца всех проб этих месторождений ложатся с очень малой дисперсией на прямые линии, подчиняющиеся уравнениям типа (3) (табл. 1, 2, рис. 1)

$$\begin{aligned} C_{207} &= -0,23 C_{206} + 27,7; \\ C_{208} &= -0,735 C_{206} + 69,5; \\ C_{204} &= -0,0197 C_{206} + 1,86. \end{aligned} \quad (3)$$

Данные по месторождениям из штата Нью-Мексико [4] и Витватерсранда (Дж. Д. Лоув, 1954) также указывают на обратную зависимость между содержаниями  $C_{206}$ , с одной стороны, и  $C_{207}$  и  $C_{208}$  — с другой (табл. 3, 4, рис. 2), выявляя в то же время зависимость углового коэффициента от возраста минерала и независимость его от генезиса объекта, содержания свинца и урана (см. табл. 3, 4). Выявленные закономерности далее будем называть «настурановым правилом».

Из-за отсутствия анализов собственно ториевых минералов нами изучены монациты двух возрастных групп: 300—400 млн лет (табл. 5) и 1900—2100 млн лет (Л. В. Комлев, 1957). В обоих случаях содержания изотопов Pb подчиняются уравнениям  $C_{206} = -0,85 C_{208} + 85$  и  $C_{207} = -0,137 C_{208} + 13,7$  (в этих системах доминирует уже изотоп  $^{208}\text{Pb}$ ), отражая в первом приближении независимость распределения изотопов Pb от возраста минерала (рис. 3). Зависимость подобного типа будем далее называть «монацитовой».

В ортитах из пород Забайкалья, Карелии, Китая, Памира, Украины и Таджикистана за-

# 1. Изотопный состав Pb настуранов, %

| Номер                    | U     | Pb    | C <sub>204</sub> | C <sub>206</sub> | C <sub>207</sub> | C <sub>208</sub> | $\frac{C_{206}}{C_{207}}$ | Автор коллекции |
|--------------------------|-------|-------|------------------|------------------|------------------|------------------|---------------------------|-----------------|
| <i>Месторождение № 1</i> |       |       |                  |                  |                  |                  |                           |                 |
| 1                        | 68,67 | 4,52  | 0,99             | 44,82            | 18,28            | 36,28            | 2,59                      | Л. В. Комлев    |
| 2                        | 25,32 | 2,45  | 0,80             | 53,44            | 15,33            | 30,44            | 3,49                      | В. Казанцев     |
| 3                        | 67,76 | 3,92  | 0,38             | 74,79            | 10,42            | 14,41            | 7,18                      | "               |
| 4                        | 34,60 | 2,00  | 0,33             | 77,34            | 9,73             | 12,60            | 7,95                      | "               |
| 5                        | 63,67 | 3,36  | 0,10             | 89,54            | 6,34             | 4,02             | 14,13                     | "               |
| 6                        | 51,19 | 1,38  | 0,04             | 92,60            | 5,68             | 1,68             | 16,30                     | Л. В. Комлев    |
| <i>Месторождение № 2</i> |       |       |                  |                  |                  |                  |                           |                 |
| 7                        | 52,63 | 0,71  | 0,10             | 89,48            | 6,60             | 3,87             | 13,56                     | В. М. Ершов     |
| 8                        | 64,09 | 1,923 | 0,041            | 92,84            | 5,535            | 1,563            | 17,34                     | И. В. Чернышев  |
| 9                        | 47,93 | 6,10  | 0,03             | 93,37            | 5,37             | 1,25             | 17,93                     | В. М. Ершов     |

# 2. Изотопный состав Pb рудных проб месторождения № 3, %

| Номер пробы | U      | Pb     | C <sub>204</sub> | C <sub>206</sub> | C <sub>207</sub> | C <sub>208</sub> | $\frac{C_{206}}{C_{207}}$ |
|-------------|--------|--------|------------------|------------------|------------------|------------------|---------------------------|
| 1           | 0,069  | 0,1240 | 1,3              | 26,0             | 21,6             | 51,1             | 1,204                     |
| 2           | 0,020  | 0,0190 | 1,3              | 26,4             | 20,8             | 51,5             | 1,259                     |
| 3           | 0,031  | 0,0410 | 1,4              | 27,0             | 21,2             | 50,4             | 1,274                     |
| 4           | 0,0046 | 0,0300 | 1,5              | 28,0             | 21,0             | 48,9             | 1,357                     |
| 5           | 0,6570 | 0,2620 | 1,3              | 3,0              | 20,8             | 46               | 1,490                     |
| 6           | 0,2400 | 0,0850 | 1,2              | 33,0             | 19,1             | 46,7             | 1,728                     |
| 7           | 0,0825 | 0,016  | 1,22             | 38,0             | 20,1             | 40,7             | 1,891                     |

Примечание. Автор коллекции — И. В. Сычев, 1977.

зисимость между изотопами Pb описывается соотношениями:

возрастная группа 240—500 млн лет  
(В. А. Кутинец и др., 1974)

$$C_{206} = -0,58 C_{208} + 58;$$

$$C_{207} = -0,40 C_{208} + 40;$$

возрастная группа 1400—2500 млн лет  
(Н. Н. Ступникова и др., 1970)

$$C_{206} = -0,899 C_{208} + 89;$$

$$C_{207} = -0,104 C_{208} + 10,3.$$

В древних ортитах (Дж. М. Хью и др., 1973) при относительном возрастании содержания урана доминирующим становится изотоп <sup>206</sup>Pb. «Урановые» ортиты отвечают приведенным выше ортитовым уравнениям. Для монацитов и ортитов зависимость между C<sub>204</sub> и C<sub>208</sub> нечеткая из-за высокой дисперсии распределения содержания C<sub>204</sub>.

В сфенах распределение изотопов Pb в наиболее древних минералах подчиняется уравнениям: C<sub>206</sub> = -0,92 C<sub>208</sub> + 92,0 и C<sub>207</sub> = -0,0657 C<sub>208</sub> + 7,0. Иногда в минералах наблюдается преобладание свинца <sup>206</sup>Pb.

Для цирконов и апатитов характерны две тенденции в поведении изотопов Pb. В цирконах, в которых, как правило, преобладает <sup>206</sup>Pb, первая тенденция (рис. 4а) в целом соответствует поведению свинца в урановых минералах (см. рис. 1). К этому типу относятся цирконы гранитов Колорадо (1300—1400 млн лет, Д. Миллер, 1969), гнейсов Новой Англии (пре-

имущественно 400—650 млн лет, Дж. Н. Алейникофф и др., 1979). Вторая линия (см. рис. 4б) описывается уравнениями монацитового типа: C<sub>206</sub> = -0,96 C<sub>208</sub> + 94,04 и C<sub>207</sub> = -0,065 C<sub>208</sub> + 6,5 и свойственна гнейсам Шарыжалгайского блока (2000—2500 млн лет) [3], Мичигана (1700—2500 млн лет, Л. Т. Ольдрих и др., 1965). В целом тип распределения (настурановый или монацитовый) не зависит от возраста минерала.

В апатитах первый тип распределения изотопов Pb (гнейсы Гренландии (Ю. Баадсгаард и др., 1976) аналогичен поведению таковых в настуранах. Распределение «монацитового» типа характерно для апатитов пироксенов (1800 млн лет [3]). Четкость распределения изотопов Pb нарушается из-за сильной дисперсии точек.

Изотопный состав Pb галенитов (см. табл. 4, рис. 2), образованных при выносе Pb из настуранов и уранинитов, описывается теми же уравнениями, что и материнские минералы. Подобным образом ведут себя изотопы Pb в калиевых полевых шпатах Приднестровья, Сейшельских островов [5], Гренландии (Л. В. Комлев и др., 1964). В калишпатах Австралии (В. М. Оверсби, 1976) эта закономерность нарушается.

В породах трудно проследить подобные зависимости из-за небольших пределов колебаний содержания изотопов Pb, сливающихся на графиках в одну точку. Тем не менее в кембрийских известняках Алдана, Казахстана и Урала (Э. К. Герлинг и др., 1976) распределение изотопов Pb подчиняется «настурановому» правилу, тогда как в метеоритах (Дж. М. Хью



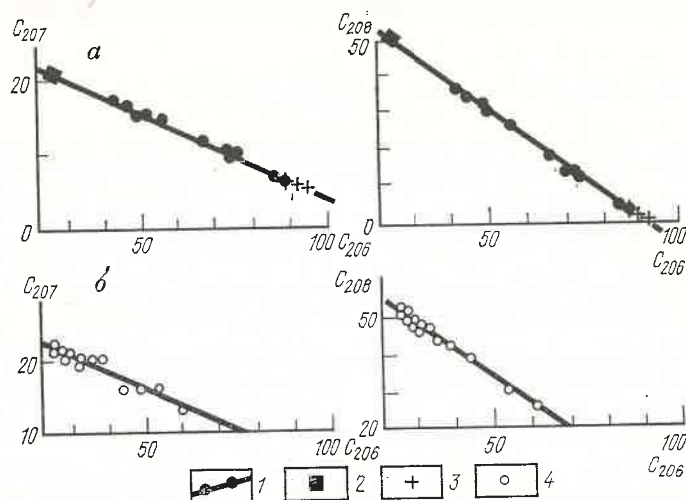


Рис. 1. Распределение относительных содержаний (%) изотопов свинца в рудных концентратах и мономинеральных фракциях настуранов (а) и в валовых пробах (б):

месторождение № 1: 1 — настураны, 2 — галенит; месторождение № 3: 3 — настураны, 4 — валовые пробы

и др., 1973; М. Татсумото и др., 1976) сохраняются «монашительный» закон.

Таким образом, для урановых минералов устанавливается система уравнений (4) и эквивалентная ей система (5), описывающая распределение в них относительных содержаний изотопов Pb.

$$\begin{aligned} C_{207} &= aC_{206} + A; \\ C_{208} &= hC_{206} + H; \\ C_{204} &= dC_{206} + D; \\ C_{206} &= a_6C_{204} + A_6; \\ C_{207} &= a_7C_{204} + A_7; \\ C_{208} &= a_8C_{204} + A_8. \end{aligned} \quad (4)$$

В этих системах  $a, d, h, A, H, D$ , а также  $a_6, a_7, a_8, A_6, A_7, A_8$  — некоторые параметры, между которыми существуют зависимости следующего вида:  $(a+d+h) = (a_6+a_7+a_8) = -1$ ;  $(A+H+D) = (A_6+A_7+A_8) = 1$ ;  $da_6=1$ ;  $da_8=h$ ;  $da_7=a$ . В зависимости от вида доминирующего изотопа ( $C_{206}$  или  $C_{208}$ ) соответственно либо  $a_6 \leq 0$ , либо  $a_8 \leq 0$ .

Уравнение (1) является частью замкнутой системы (6),

$$\begin{cases} \frac{C_{207}}{C_{204}} = \gamma \frac{C_{206}}{C_{204}} + \Gamma, \\ \frac{C_{208}}{C_{204}} = \nu \frac{C_{206}}{C_{204}} + N, \end{cases} \quad (6)$$

параметры которой связаны с параметрами системы (4) следующим образом:

$$\begin{aligned} \Gamma &= A/D; \quad N = H/D; \\ \Gamma + N &= (1/D - 1) = A/D + H/D; \\ \gamma &= a - dA/D = a - d\Gamma; \quad \nu = h - dH/D = h - dN; \\ \gamma + \nu &= -(d/D + 1); \quad d\Gamma + \gamma = a; \\ dN + \nu &= h; \\ \frac{\gamma - a}{\nu - h} &= \frac{A}{H} = \frac{\Gamma}{N}; \\ \frac{\gamma + \nu + 1}{\Gamma + N + 1} &= -d. \end{aligned} \quad (7)$$

Полагая, что уравнение (4) описывает геометрическое место точек смешанных содержаний радиогенного свинца Pb<sub>p</sub> и обыкновенного свинца Pb<sub>o</sub>, а также учитывая, что прямая (4) проходит через точку обыкновенного свинца ( $C_{206o}, C_{207o}, C_{208o}, C_{204o}$ ) и исследуемого минерала, то согласно уравнению прямой, проходящей через две точки, выражения (4) преобразуются в систему (8):

$$\begin{aligned} C_{207} &= aC_{206} + (C_{207o} - aC_{206o}); \\ C_{208} &= hC_{206} + (C_{208o} - hC_{206o}); \\ C_{204} &= dC_{206} + (C_{204o} - dC_{206o}). \end{aligned} \quad (8)$$

### 3. Изотопный состав Pb рудных проб Нью-Мексико [4], %

| Номер пробы | U     | Pb       | $C_{204}$ | $C_{206}$ | $C_{207}$ | $C_{208}$ | $\frac{C_{208}}{C_{207}}$ |
|-------------|-------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|---------------------------|
| 1           | 5,51  | 0,000551 | 1,285     | 27,13     | 20,26     | 51,32     | 1,339                     |
| 2           | 0,419 | 0,001610 | 1,266     | 29,03     | 20,08     | 49,62     | 1,446                     |
| 3           | 0,298 | 0,000244 | 1,208     | 31,14     | 10,14     | 48,59     | 1,604                     |
| 4           | 0,560 | 0,000314 | 1,163     | 33,43     | 18,87     | 46,53     | 1,772                     |
| 5           | 1,980 | 0,000575 | 0,973     | 43,78     | 16,32     | 38,93     | 2,693                     |
| 6           | 10,39 | 0,0193   | 0,372     | 74,36     | 10,30     | 14,97     | 7,219                     |

#### 4. Изотопный состав Pb минералов Витватерсранда, %

| Номер пробы     | U     | Pb    | $C_{204}$ | $C_{206}$ | $C_{207}$ | $C_{208}$ | $\frac{C_{206}}{C_{207}}$ |
|-----------------|-------|-------|-----------|-----------|-----------|-----------|---------------------------|
| <i>Уранинит</i> |       |       |           |           |           |           |                           |
| 1               | 53,51 | 16,24 | 0,418     | 69,59     | 14,13     | 16,87     | 4,92                      |
| 2               | 55,07 | 14,74 | 0,331     | 73,50     | 15,75     | 12,42     | 4,44                      |
| 3               | 54,10 | 17,95 | 0,187     | 77,79     | 13,42     | 8,61      | 5,80                      |
| 4               | 47,00 | 12,40 | 0,159     | 80,25     | 12,84     | 6,75      | 6,25                      |
| 5               | 54,00 | 16,15 | 0,114     | 81,61     | 12,89     | 5,39      | 6,33                      |
| 6               | 57,30 | 17,03 | 0,067     | 83,31     | 12,47     | 4,15      | 6,69                      |
| 7               | 49,50 | 15,75 | —         | 87,32     | 10,73     | 1,95      | 8,14                      |
| <i>Галенит</i>  |       |       |           |           |           |           |                           |
| 8               |       |       | 1,539     | 25,22     | 23,69     | 49,55     | 1,065                     |
| 9               |       |       | 1,330     | 33,79     | 21,24     | 43,84     | 1,690                     |
| 10              |       |       | 1,088     | 41,88     | 21,17     | 35,86     | 1,979                     |

#### 5. Изотопный состав Pb монацитов, ‰

| Номер пробы | U     | Pb    | $C_{204}$ | $C_{206}$ | $C_{207}$ | $C_{208}$ | $\frac{C_{206}}{C_{207}}$ | Возраст, млн. лет | Автор коллекции           |
|-------------|-------|-------|-----------|-----------|-----------|-----------|---------------------------|-------------------|---------------------------|
| 1           | 0,662 | 0,097 | 0,274     | 30,24     | 5,01      | 64,48     | 5,04                      | 310               | А. К. Бойко, 1975         |
| 2           | 0,631 | 0,019 | 0,203     | 29,10     | 4,56      | 66,14     | 6,38                      | 320               | А. В. Кутинец и др., 1974 |
| 3           | 0,439 | 0,18  | 0,180     | 20,53     | 3,57      | 75,72     | 5,75                      | 384               |                           |
| 4           | 0,154 | 0,062 | 0,110     | 14,74     | 2,67      | 82,68     | 5,35                      | 400               | А. Я. Крылов и др., 1963  |
| 5           | 0,093 | 0,077 | 0,064     | 6,67      | 1,20      | 92,07     | 5,56                      | 338               |                           |
| 6           | 0,075 | 0,073 | 0,043     | 5,05      | 0,90      | 94,02     | 5,61                      | 300               | А. В. Комлев, 1965        |
| 7           | 1,00  | 0,87  | 0,075     | 39,19     | 6,21      | 54,53     | 6,31                      | 2100              |                           |
| 8           | 0,99  | 0,93  | 0,079     | 37,76     | 6,02      | 56,14     | 6,27                      | 2150              | 1957                      |
| 9           | 0,76  | 0,67  | 0,054     | 35,48     | 4,94      | 59,53     | 7,18                      | 2100              |                           |
| 10          | 0,46  | 0,72  | 0,078     | 23,08     | 3,80      | 73,04     | 6,07                      | 2100              | Л. В. Комлев, 1965        |
| 11          | 0,41  | 0,710 | 0,023     | 20,3      | 2,69      | 76,99     | 7,55                      | 1900              |                           |
| 12          | 0,34  | 0,75  | 0,070     | 16,36     | 3,03      | 80,54     | 5,40                      | 2050              | 2000                      |
| 13          | 0,29  | 1,01  | 0,045     | 9,53      | 1,73      | 88,69     | 5,51                      | 2000              |                           |

В этом случае и прямые (6) также проходят через точку обыкновенного свинца, а равенства (7) упрощаются и являются в то же время решением системы уравнений (9), в которых  $X_0 = C_{206,0}/C_{204,0}$ ;  $Y_0 = C_{207,0}/C_{204,0}$  и  $Z_0 = C_{208,0}/C_{204,0}$ :

$$\begin{cases} \Gamma + X_0 \gamma = Y_0, \\ d\Gamma + \gamma = a, \\ N + X_0 \nu = Z_0, \\ dN + \nu = h. \end{cases} \quad (9)$$

В этом случае параметры систем (5) и (4) приобретают ясный физический смысл: при  $C_{204}=0$  эти системы позволяют рассчитывать состав исходного радиогенного свинца, обозначаемого далее через  $Pb_p^0$  (соответственно  $C_{206,0}$ ,  $C_{207,0}$  и  $C_{208,0}$ ), на основе равенств (10) и (11):

$$A_3 = C_{206,p}^0 = -D/d = C_{206,0} - (1/d) C_{204,0};$$

$$A_7 = C_{207,p}^0 = A - aD/d =$$

$$= C_{207,0} - (a/d) C_{204,0};$$

$$A_8 = C_{208,p}^0 = H - hD/d =$$

$$= C_{208,0} - (h/d) C_{204,0}; \quad (10)$$

$$\frac{C_{207,p}^0}{C_{206,p}^0} = a - dA/D = \frac{a - dY_0}{1 - dX_0} = \gamma. \quad (11)$$

В геохронологической практике (И. Е. Старик, 1961) рассчитывается радиогенная составляющая с помощью выражений:

$$C_{206,рад}^i = \Delta C_{206,i} = C_{206,i} - X_0 C_{204,i};$$

$$C_{207,рад}^i = \Delta C_{207,i} = C_{207,i} - Y_0 C_{204,i}.$$

Эти выражения преобразуются в уравнение (12)

$$\Delta C_{206} = (a_3 - X_0) C_{204} + C_{206,p}^0;$$

$$\Delta C_{207} = (a_7 - Y_0) C_{204} + C_{207,p}^0, \quad (12)$$

согласно которым равенства  $\Delta C_{206} = C_{206,p}^0$  и  $\Delta C_{207} = C_{207,p}^0$  выполняются только при  $C_{204}=0$ .

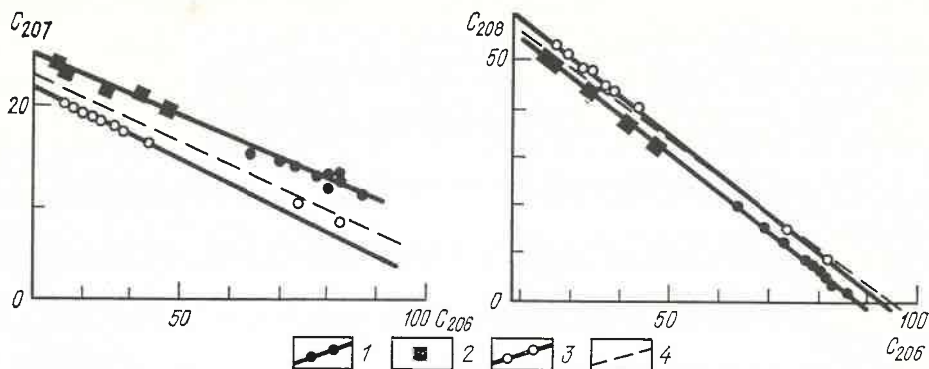


Рис. 2. Распределение относительных содержаний (%) изотопов свинца в месторождениях разного возраста:

месторождение Витватерсранд, мономинеральные фракции: 1 — уранинит, 2 — галенит; валовые пробы: 3 — месторождения штата Нью-Мексико [17] (возраст 51 млн лет), 4 — месторождения №№ 1, 2 (возраст 250—360 млн лет)

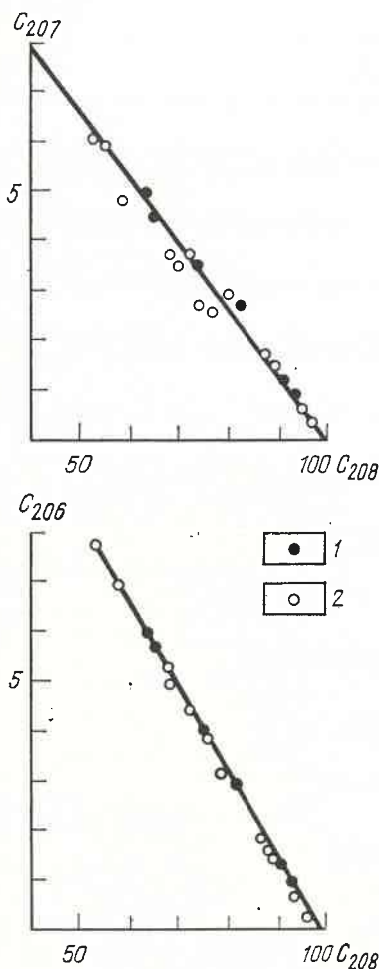


Рис. 3. Распределение изотопов свинца (%) в моналитах разного возраста:

1 — 300—400 млн лет; 2 — 1900—2100 млн лет

источников дискордантности. Подобное положение, складывающееся и при употреблении исходного радиогенного свинца  $Pb_{p^0}$ , не позволяет применять уравнения типа  $Pb^{k^0}_{рад} = {}^iUf(t)$ .

Указанные обстоятельства показывают необходимость выделения двух механизмов дискордантности. В одном случае она появляется под влиянием физико-химических условий минералообразования на распределение изотопов Pb в минералах (И. Е. Старик, 1961; Э. В. Соболевич и др., 1976; Ю. А. Шуколюков и др., 1974; и др.). Другая причина дискордантности — несколько некорректные выводы геохронологических уравнений, особенно в связи с решением проблемы многостадийности формирования свинца в минералах (И. Е. Старик, 1961; Е. И. Гамильтон, 1968; Э. Р. Канасевич, 1973; Ю. А. Шуколюков и др., 1974; С. С. Малахова, 1985 и др.).

Вывявленные соотношения между параметрами уравнений (4) и (5) позволяют оценить систему координат Штифа и Штерна (Г. Фауль, 1955), в которой  $C_k^* = C_k / (1 - C_{204})$ . При выполнении системы (14)  $a^* + h^* = (A^* + H^*) = -1$ .

$$C_{207}^* = a^* C_{206}^* + A^*;$$

$$C_{208}^* = h^* C_{206}^* + H^*. \quad (14)$$

Тогда связь параметров уравнения (14) ( $a^*$ ,  $h^*$ ,  $A^*$ ,  $H^*$ ) с параметрами уравнений (4) и (5) отражается равенствами:

$$a^* = a + A^* = \frac{a_7 + A_7}{a_6 + A_6};$$

$$h^* = h + H^* = \frac{a_8 + A_8}{a_6 + A_6};$$

$$\frac{1}{H^*} = \frac{1}{H} - \frac{1}{N}; \quad \frac{1}{A^*} = \frac{1}{A} - \frac{1}{\Gamma};$$

Освобождение от параметра  $C_{204}$  в (12) приводит к соотношению

$$\frac{\Delta C_{206}}{\Delta C_{207}} = \frac{C_{206p}^0}{C_{207p}^0} = \gamma. \quad (13)$$

Полученный вывод показывает возможность использования радиогенных добавок ( $\Delta C_{206}$  и  $\Delta C_{207}$ ) для геохронологических расчетов и нецелесообразность применения их в уравнениях типа  $Pb^{k^0}_{рад} = {}^iUf(t)$  ( $i=235, 238$ ;  $k=206, 207$ ) в связи с несоответствием содержаний валовых свинца и урана радиогенным добавкам  $Pb^{k^0}_{рад}$ . Вследствие этого и возникает некорректность в определении возраста, являющаяся одним из



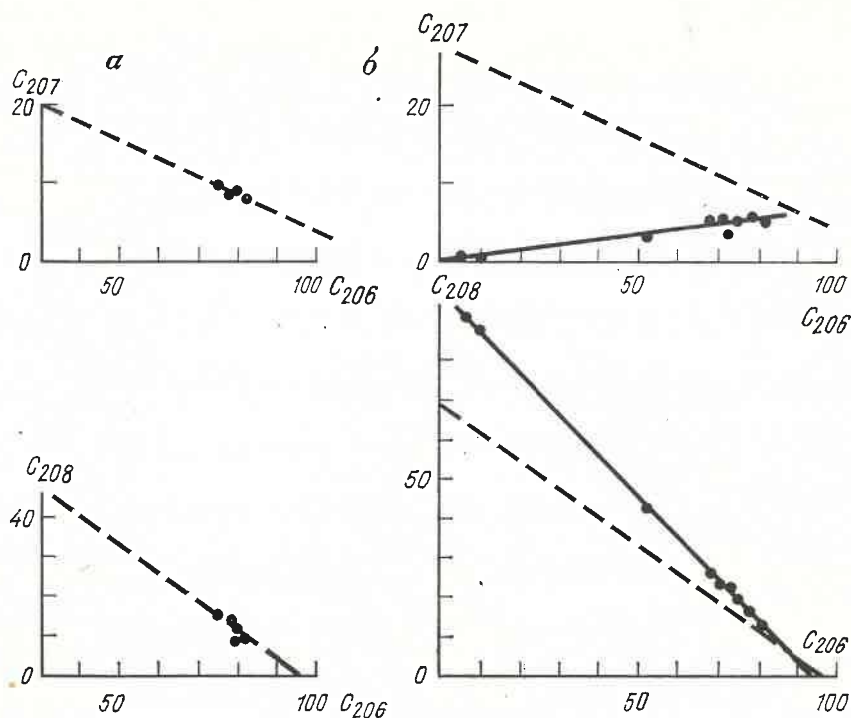


Рис. 4. Распределение изотопов свинца (%) в цирконах: а — гранитов штата Колорадо, США [9], б — гнейсов Новой Англии, США [14]:

пунктирная линия соответствует распределению проб на рис. 1

$$A^* = A/(1 - D) = \frac{a_6 A_7 - a_7 A_6}{a_6 + A_6};$$

$$H^* = H/(1 - D) = \frac{a_6 A_8 - a_8 A_6}{a_6 + A_6}.$$

Условия  $C_{208}^* = 0$  и прохождение прямых (14) через точки обыкновенного свинца приводят к равенству (15)

$$\begin{aligned} \frac{C_{207p}^*}{C_{206p}^*} &= \frac{a_6 A_7 - a_7 A_6}{a_6 A_8 - a_8 A_6} = \\ &= \frac{C_{207(208)}}{C_{206(208)}}, \end{aligned} \quad (15)$$

где  $C_{207(208)}$  и  $C_{206(208)}$  соответствуют значениям  $C_k$  при  $C_{208} = 0$ . Поскольку отсутствует ограничение  $C_{204} = 0$ , то выражение (15) не отражает отношение содержаний исходных радиогенных свинцов, а решение геохронологических задач возможно только для палеозойских и более молодых минералов, в которых  $C_{208p}^* = 0$ . Следовательно, система координат Штифа и Штерна (Г. Фауль, 1955) ограничена, не несет новой информации и не рекомендуется для использования на практике.

Таким образом, распределение относительных содержаний изотопов Pb позволяет назвать группы минералов, в одной из которых (уранинит, настуран, черни) доминирует свинец  $^{206}\text{Pb}$ ; во второй (монацит, ортит) —  $^{208}\text{Pb}$ . Выделяется также группа минералов (сфен, циркон, апатит) с преобладанием в одних случаях  $^{206}\text{Pb}$ , в других —  $^{208}\text{Pb}$ . Во всех группах относительные содержания изотопов Pb описы-

ваются уравнениями типа  $C_k = S_k C_j + A_k$ , где  $k, j = 204, 206, 207, 208$ . Параметры уравнения  $C_{207}/C_{204} = \gamma C_{206}/C_{204} + \Gamma$  описываются через постоянные коэффициенты уравнения  $C_k = S_k C_j + A_k$ . Последнее позволяет решать основные виды геохронологических задач, не прибегая к преобразованным уравнениям на основе информации о составе обыкновенного свинца  $\text{Pb}_0$ .

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Макаров В. П. К изотопной геохимии радиоактивных минералов//Основные проблемы теоретической и прикладной минералогии. М., 1985. С. 219—220.
2. Новые данные о возрасте пород и руд Ханнинского апатитовосного района//Л. А. Неймарк, А. Д. Искандерова, А. Н. Тимашков и др.//Докл. АН СССР. 1984. Т. 279. № 3. С. 1713—1717.
3. Последовательность геологических событий в пределах Шарыжалгайского блока//Е. В. Бибилова, Л. В. Сумин, Т. И. Кинозова и др.//Геохимия. 1981. № 11. С. 1652—1663.
4. Ludwig K. R., Rubin B., Fishman N. S., Reynolds R. L. U-Pb ages of uranium ores in the Church rock Uranium district, New Mexico//Econ. Geol. 1982. Vol. 77. № 8. P. 1942—1945.
5. Weis D., Deatsch S. Nd and Pb isotope evidence from Seychelles granite and their xenolites: mantle origin with slight upper-crust interaction for alkaline anorogenic complexes//Isot. Geosci. 1984. Vol. 2. № 1. P. 13—22.

## О богатых гипогенных железных рудах Михайловского месторождения КМА

Л. Д. ОНИКИЕНКО

Гипогенные железные руды на восточном фланге Михайловского месторождения известны с 1958 г. А. А. Илларионов, описывая эти руды в 1965 г., отмечал, что залегают они среди так называемых «неокисленных железистых кварцитов» и приурочены к зонам их тектонического дробления. Происхождение гипогенных железных руд он объяснял воздействием гидротермальных растворов на железистые кварциты и выносом из них кварца. А. А. Илларионов отнес их к гидротермальным образованиям.

В настоящее время гипогенные железные руды на восточном фланге Михайловского месторождения вскрыты рядом вновь пробуренных скважин (рис. 1), достигающих глубин 600—810 м от земной поверхности (скв. 3810, 3495 и др.). Руды подсечены скв. 3810 (глубина 810 м) в интервалах 513,7—523,1 и 593,1—626,3 м; скв. 3495 (глубина 616,4 м) в интервалах (в м): 198,8—214,0; 229,0—231,2; 255,6—260,5; 310,7—312,9; 439,9—454,3 (рис. 2).

Содержание железа в этих рудах колеблется в широких пределах, в отдельных интервалах достигает весьма высоких значений — 60—63 % (таблица). Руды с высоким содержанием железа встречаются и в керне скважин, пробуренных на западном фланге месторождения (скв. 215р, 216р и др.) в интервале 82,8—95,0 м.

Макроскопически руды представляют собой очень плотные, тяжелые, черного или темно-серого цвета минеральные образования. Текстуры руд — полосчатая, пльчатая, в отдельных участках брекчиевая или брекчиевидная.

Результаты изучения гипогенных руд под микроскопом показали, что главными рудными минералами являются гематит и магнетит. Их количественные соотношения изменяются в различных участках, но в целом преобладает гематит. Присутствуют в небольшом количестве сульфиды — пирит и марказит. Нерудные минералы представлены кварцем и карбонатом. Содержание нерудных минералов в руде невелико и колеблется от 1 до 15 %.

Под микроскопом хорошо прослеживается тонкополосчатое строение руды (рис. 3, а), осложненное на отдельных участках пльчатостью (см. рис. 3, б).

Слоистый характер руд обусловлен чередованием довольно четко обособленных агрегатов, сложенных магнетитом и слоев биминеральных — магнетит-гематитовых, реже наблюдаются гематитовые мономинеральные слои.

Мощность их изменяется в весьма широких пределах: от 3—5 мм до сотых долей. Магнетит в слоях собран в агрегаты мелких зерен (сотые доли миллиметра), структура магнетита аллотриоморфнобластическая. В рудах, заключенных в неокисленных железистых кварцитах, магнетит свежий, неокисленный, признаков мартитизации магнетита нигде не встречено.

Гематит в описываемых рудах представлен двумя генерациями. Первая — образует неправильной формы мелкие кристаллы (сотые доли миллиметра), собранные в мономинеральные агрегаты в рудных слоях. Тот же гематит наблюдается и в магнетит-гематитовых агрега-

тах. Здесь он располагается в интерстициях магнетита или цементирует его единичные выделения.

Вторая разновидность гематита более поздняя по отношению к первой, представляет собой укрупненные таблитчатые кристаллы (десятые доли миллиметра), располагающиеся в тектонических трещинках, секущих богатую руду (см. рис. 3, в). Вместе с гематитом в таких прожилках присутствуют кварц или кальцит. В отдельных прожилках наблюдаются все три минерала — гематит, кварц и кальцит.

Гематит второй генерации приурочен исключительно к зонам повышенной трещиноватости в руде, а также к участкам развития прожилков, гнезд и вкрапленности нерудных минералов. В этих же зонах присутствуют и крупные метакристаллы пирита, иногда марказита.

В богатой руде наблюдаются две разновидности кварца (см. рис. 3, г). Первая представляет собой последние включения тонкозернистого кварца. В отдельных кристаллах видны включения дисперсного гематита, просвечивающего в прозрачных шлифах характерным красным цветом. Нами были изучены под электронным микроскопом подобные выделения гематита. Размер их составляет доли микрометра, форма таблитчатая полигональная. Их присутствие придает кварцу яшмовидный облик.

Вторая разновидность кварца — сравнительно крупные кристаллы (десятые доли миллиметра), явно жильного или прожилкового типа, с волнистым угасанием, кристаллы его не содержат включений рудного вещества (см. рис. 3, г). И по первой, и по второй разновидности кварца активно развивается карбонат, в связи с чем кварц иногда наблюдается лишь в виде реликтов.

Характерные особенности богатых железных руд сохраняются для различных флангов Михайловского месторождения — восточного и западного, а также для различных глубин в пределах неокисленных железистых кварцитов. Последние представляют собой на восточном фланге железослюдковые и магнетит-железослюдковые разновидности, иногда с хорошо выраженным яшмовидным обликом (джеспилиты).

На западном фланге гипогенные руды заключены в так называемых серополосчатых разновидностях железистых кварцитов — в зелено-слюдисто-магнетитовых и магнетитовых.

В скв. 3810 на глубине 591,3 м в джеспилитах, вмещающих гипогенную руду, встречена зона, обогащенная биотитом. Здесь, в зоне брекчирования джеспилитов, присутствуют также крупные кристаллы апатита (размер 0,3—0,7 мм), резко отличающиеся от тонкозернистой разновидности апатита, рассеянного в кремнистых слоях джеспилита в виде акцессория (0,02—0,002 мм). В джеспилите встречается и кислый плагиоклаз. Его кристаллы сильно изменены и отчасти катаклазированы. Присутствие биотита, крупнозернистого апатита и плагиоклаза в джеспилитах, включающих гипогенные богатые руды, связано, вероятно, с проявлениями метасоматических гидротермальных процессов, эпигенетических по отношению

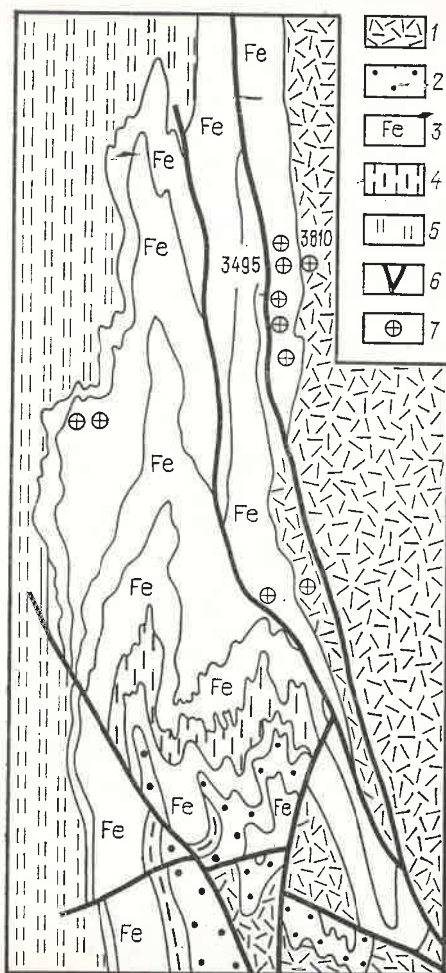
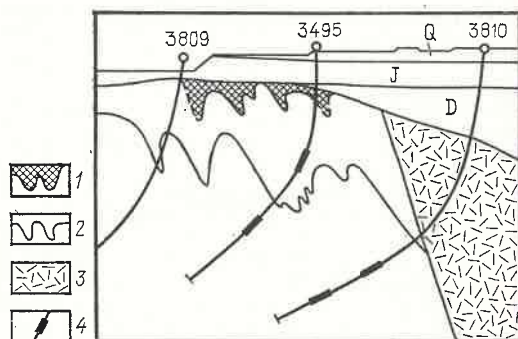


Рис. 1. Схематическая геологическая карта докембрийских образований Михайловского месторождения:

курбакинская свита оскольской серии: 1 — туфопесчаники, сланцы, кварцевые порфиры; 2 — метапесчаники, конгломераты; коробковская свита курской серии: 3 — железистые кварциты, 4 — кварц-серицитовые сланцы; 5 — филлитовидные кварц-серицитовые сланцы стойленской свиты Курской серии; 6 — тектонические нарушения; 7 — скважины, вскрывшие гипогенные железные руды

Рис. 2. Схематический геологический разрез восточного фланга Михайловского месторождения:

1 — гипергенные богатые железные руды; 2 — граница окисленных (вверху) железистых кварцитов с неокисленными (внизу) коробковской свиты курской серии  $PZ_1$ ; 3 — породы курбакинской свиты оскольской серии  $PZ_1$ ; 4 — интервалы, пройденные скважинами по богатой гипогенной железной руде



Результаты анализов рядовых проб из интервалов скв. 3495, вскрывшей гипогенное богатое железорудное на восточном фланге Михайловского месторождения

| Интервал взятия проб, м |       |       | Содержание, %     |                  |          |
|-------------------------|-------|-------|-------------------|------------------|----------|
| от                      | до    | всего | Fe <sub>общ</sub> | SiO <sub>2</sub> | п. п. п. |
| 198,8                   | 208,6 | 9,8   | 47,97             | 25,02            | 3,25     |
| 211,3                   | 214,0 | 2,7   | 57,32             | 9,32             | 4,77     |
| 214,0                   | 215,7 | 1,7   | 40,48             | —                | —        |
| 225,4                   | 229,0 | 3,6   | 42,71             | —                | —        |
| 229,0                   | 230,4 | 1,4   | 59,98             | 11,8             | 2,07     |
| 230,4                   | 230,8 | 0,4   | 43,59             | 37,44            | 0,82     |
| 230,8                   | 231,2 | 0,4   | 62,75             | 9,86             | 0,69     |
| 231,2                   | 237,8 | 6,6   | 40,08             | —                | —        |
| 247,1                   | 255,6 | 8,5   | 40,03             | —                | —        |
| 255,6                   | 257,1 | 1,5   | 48,97             | 7,34             | 11,54    |
| 257,1                   | 260,1 | 3,0   | 41,53             | 9,86             | 5,42     |
| 260,1                   | 260,5 | 0,4   | 50,98             | 12,14            | 7,15     |
| 308,3                   | 310,7 | 2,4   | 44,02             | —                | —        |
| 310,7                   | 312,9 | 2,2   | 60,28             | 9,26             | 2,43     |
| 312,9                   | 319,0 | 6,1   | 47,25             | —                | —        |
| 439,9                   | 445,1 | 5,2   | 48,67             | 9,82             | 9,23     |
| 445,1                   | 446,8 | 1,7   | 43,14             | 27,16            | 4,77     |
| 446,8                   | 452,5 | 5,7   | 50,98             | 5,32             | 9,07     |
| 452,5                   | 454,3 | 1,8   | 55,91             | 3,28             | 8,02     |



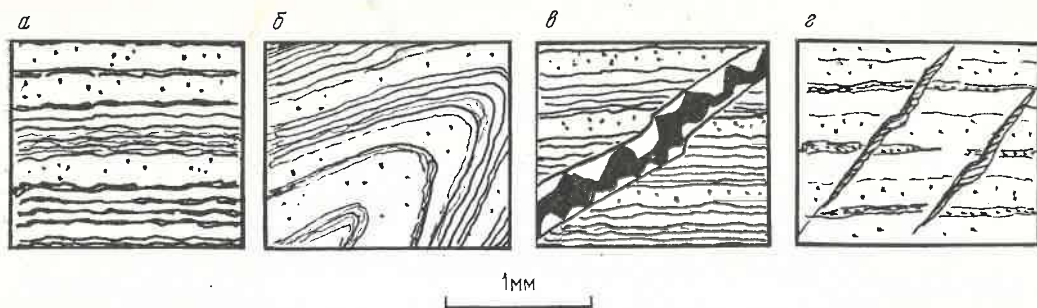


Рис. 3. Микротекстуры гипогенной магнетит-гематитовой руды:

а — тонкополосчатая; б — плойчатая; в — микропрожилковая; г — просечковая

к железооруденению. Гидротермальные изменения пород развивались, по-видимому, в связи с внедрением субвулканических тел кварцевых порфиров, присутствующих на восточном фланге Михайловского месторождения и представляющих собой в настоящее время метаморфизованные рассланцованные породы с включениями обломков железистых кварцитов (Л. Д. Оникненко, С. К. Оникненко, И. М. Милеева, 1972). Брекчированию и гидротермальному изменению подвергались, как видно из проведенного изучения, не только джеспилиты, но и богатые железные руды, заключенные в них. Кроме гипогенных железных руд, приуроченных к неокисленным железистым кварцитам, нами были детально изучены гипогенные руды, подвергшиеся частичному изменению в зоне влияния гипергенных процессов.

Детально прослежена изменчивость минерального состава и строения руды по керну скв. 3495. На глубине 448,3 м в зоне неокисленных кварцитов, вскрытых этой скважиной, руда гематит-магнетитового состава, неяснополосчатой текстуры. Магнетит не мартитизирован. Размеры его зерен — сотые доли миллиметра. Структура аллотриоморфнобластическая. Гематит — мелкозернистый, тонкопластинчатый. Руда рассекается маломощными эпигенетическими прожилками карбоната. В зальбандах прожилков развиты кристаллы крупнопластинчатого гематита, в которых хорошо видно полисинтетическое двойниковое строение.

Выше по разрезу такая руда сильно раздроблена, брекчирована. Обломки сцементированы белым жильным кварцем. На глубине 311,2 м этой скважиной подсечена богатая железная руда с содержанием железа 60,28 %, сложенная двумя генерациями гематита — мелкозернистым послойным и крупным пластинчатым в секущих жилках. Последнего довольно много (около 30 % от объема руды), он образует в основной массе мелкозернистого гематита скопления, сопутствующие зонам развития эпигенетического кварца. На глубине 298,8 м богатая руда сильно нарушена, на ней появляются довольно значительные по мощности послойные и секущие жилки кварца. Магнетит остается свежим, неокисленным, признаков его мартитизации нет.

Начиная с глубины 260,3 м, характер богатой руды изменяется — появляется мартит. Магнетит, железная слюдка, эпигенетический гематит сохраняются, в зонах дробления присутствует белый кварц, хорошо видна реликтовая слоистость руды и только кристаллы магнетита оказываются окруженными каемками

гематита. Выше по разрезу мартитизация магнетита становится постоянной как в богатой руде, так и во вмещающих железистых кварцитах. Текстура окисленной руды здесь брекчневидная.

В верхних горизонтах, начиная с глубины 205,3 м руда становится не только мартитизированной, но и пористой, выщелоченной, поры иногда заполнены карбонатом.

Переисленные выше особенности строения богатой железной руды, вскрытой рядом скважин на восточном и западном флангах месторождения, позволяют считать ее первично-осадочным образованием, обнаруживающим все признаки последующего тектонического, гидротермального, метаморфического и гипергенного изменения. Источник вещества для образования богатых руд этого типа был, вероятно, тот же, что и для бедных — железистых кварцитов. Локальные условия накопления рудного вещества без примеси кремнистого приводили, на наш взгляд, к концентрации железа в виде слоистых осадочных образований.

Анализируя данные, полученные при изучении богатых железных руд и железистых кварцитов из глубоких горизонтов восточного фланга Михайловского месторождения, можно полагать, что они являются образованиями, сингенетичными с вмещающими железисто-кремнистыми породами, от которых отличаются лишь меньшим, а иногда и полным отсутствием послойного кварца. Весьма сходны богатые и бедные руды по текстурно-структурным особенностям, размерам и форме минеральных индивидов, характеру их сочетания в агрегатах.

Богатые гипогенные руды вместе с вмещающими кварцитами в отдельных зонах интенсивно смяты, рассланцованы, катаклазированы. В зонах дробления в богатой руде, также как и во вмещающих железистых кварцитах присутствуют прожилки эпигенетического кварца, карбонатов, крупнопластинчатого гематита, поздних пирита и марказита.

Гипогенные руды тяготеют к вполне определенной разновидности железистых кварцитов — бессиликатной, безкарбонатной, тонкозернистой дисперсно-гематит-железослюдковой (джеспилиты).

Гипогенная руда близкого состава и строения, вскрытая карьером Михайловского месторождения в его южной части была описана нами ранее (Л. Д. Оникненко, 1987). Было высказано суждение о сходстве богатых руд Михайловского месторождения, контролируемых джеспилитами, с рудами саксаганского типа в Криворозье.

Происхождение руд саксаганского типа, согласно Я. Н. Беловцеву и др. (1981) метаморфическое, с последующим преобразованием в условиях поверхностного окисления. Руды саксаганского типа — неотъемлемая часть железисто-кремнистых формаций докембрия. Они составляют главную промышленную ценность богатых руд Кривого Рога.

В условиях КМА богатые руды глубоких горизонтов пока мало изучены и им мало уделяется внимания. Господствует представление об исключительно гипергенном происхождении основной массы промышленных железных руд КМА. Такая позиция, по нашему мнению, ошибочна.

В настоящее время необходима постановка комплексных геолого-поисковых работ на Михайловском месторождении, включающих структурные, минералого-петрографические и петрофизические исследования с целью оконтуривания участков, благоприятных для обнаружения богатых руд саксаганского типа.

Перспективы обнаружения в пределах Михайловского месторождения мощных залежей богатых железных руд на значительных глубинах определяются, с нашей точки зрения, характером развития залежей джеспилитов, их мощностью, протяженностью, наличием участков повышенной дислоцированности и трещиноватости.

Картированию участков развития джеспилитов в глубоких зонах рудных месторождений может помочь новый экспрессный метод теплофизических исследований (Ю. А. Попов, Р. А. Ромушквич, Л. Д. Оникиенко, 1987). Связано это с тем, что рудоносные джеспилиты характеризуются повышенными значениями теплопроводности, повышенной плотностью и несколько повышенным содержанием железа. Сами рудоносные джеспилиты представляют собой пока непромышленный тип железистых кварцитов, но с началом эксплуатации окислен-

ных кварцитов эта гематитовая разновидность пород будет подлежать также промышленному освоению.

Руды осадочно-метаморфического типа в пределах КМА описаны Б. Д. Клагин в 1958 г. Они были обнаружены в юго-западной части Лебединского месторождения. Этот тип руд, приуроченный к низам железорудной толщи и заключенный в грубополосчатых магнетит-кумингтонитовых кварцитах, широкого развития не имеет.

Вместе с тем, присутствие таких руд в толще железистых кварцитов свидетельствует о возможности накопления богатого оруднения осадочным путем. Богатые, практически биминеральные руды гематит-магнетитового и магнетит-гематитового составов формировались, вероятно, гидротермально осадочным путем в изменяющихся окислительно-восстановительных условиях дна палеобассейна, в непосредственной близости от источника рудоносных флюидов, что исключало, по нашему мнению, смешивание железистого материала с кремнистым. Изменение окислительно-восстановительного потенциала среды минералообразования могло быть связано как с колебаниями дна палеобассейна, так и с изменением физико-химического режима рудогенерирующих флюидов.

Бедные и богатые железные руды КМА связаны, с нашей точки зрения, единством источника рудного вещества и отличаются друг от друга лишь условиями его локализации в различных фациальных и геолого-структурных обстановках, существовавших в докембрии. Выветривание богатых и бедных руд лишь частично видоизменило облик исходных минеральных образований. Такой подход к богатым железным рудам хорошо согласуется с новыми интересными данными о проявлениях гипогенного оруднения в глубоких горизонтах восточного фланга Михайловского месторождения.

## Методология, экономика, организация

УДК 550.812.14

© Коллектив авторов, 1991

### Методические аспекты повышения эффективности разведочных работ

[В. А. ВИКЕНТЬЕВ], В. С. БУДРИК, В. А. ВОРОНЦОВ, В. В. ИЛЬИН, П. И. КУШНАРЕВ, М. В. ШУМИЛИН, П. П. ЯСКОВСКИЙ

Повышение эффективности разведочных работ — одна из главных задач методического направления геологической науки. Вопросам эффективности и ускорения разведок посвящена обширная литература. Между тем, до сих пор однозначно не определено само понятие эффективности. В условиях действующей системы хозяйствования в геологоразведочной отрасли, когда основным показателем ее деятельности является прирост запасов, эф-

фективность разведок, очевидно, может оцениваться только приростом запасов на 1 р. затрат. Однако высокий прирост на 1 р. затрат для потребителя геологоразведочной продукции (горнодобывающей промышленности) абсолютно безразличен, и при передаче месторождения в освоение потребляющей отраслью к эффективности разведки должны быть предъявлены принципиально другие требования.



Анализируя взаимоотношения геологоразведочной и горнодобывающей отраслей, А. М. Марголин в 1974 г. указывал, что трудом геологоразведчика за счет оптимизации технологии освоения на основе полученной информации создается возможность извлечения при эксплуатации дополнительной прибыли. Прирост этой прибыли на 1 р. геологоразведочных затрат рассматривался им как возможный показатель их эффективности. Однако использовать подобную величину в целях оптимизации разведочных работ практически невозможно.

Вместе с тем, рассматривая совокупный процесс разведка — освоение месторождений, можно сформулировать некоторые общие принципы оптимизации разведки.

Очевидно, разведка может считаться выполненной качественно, если величина себестоимости продукции горного предприятия, при вводе его в действие, оказывается равной или, во всяком случае, не больше, чем ее оценка в технико-экономических расчетах, выполненных по данным разведки. Следовательно, общим критерием оптимизации разведки может быть оценка себестоимости продукции будущего предприятия с достаточной точностью при минимальной вероятности занижения.

Различные характеристики месторождений в процессе разведки могут оцениваться с различными ошибками. Отсюда задача оптимизации должна решаться на основе анализа этих ошибок и их последствий, а процесс разведки строится так, чтобы прежде всего минимизировать ошибки, в наибольшей степени влияющие на себестоимость, особенно, в сторону ее возможного завышения.

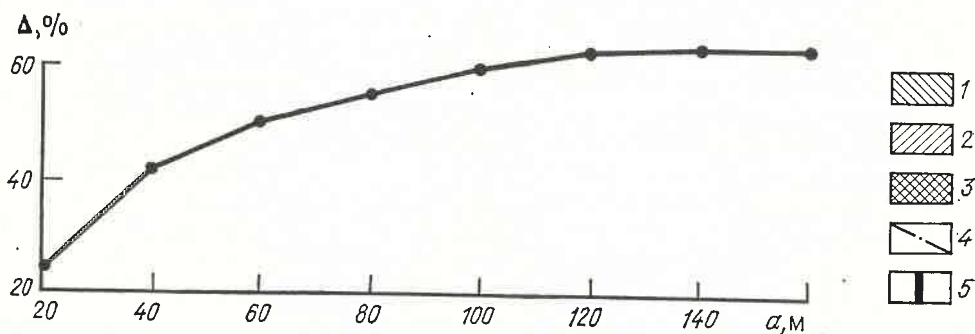
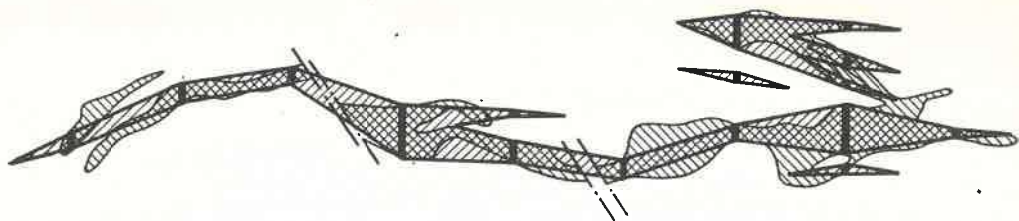
Предлагавшиеся показатели, основанные главным образом на оценках точности подсчета запасов и средних параметров, в качестве меры разведанности оказались неприемлемыми из-за того, что они не отражают детальности изучения геологического строения месторождения и функционально связаны лишь с числом разведочных пересечений, а не расстояния между ними. Поэтому, по крупным блокам категории  $C_1$  погрешности определения средних параметров и цифр запасов могут оказаться даже мень-

шими, чем в блоках категории В и даже А.

Изучение свойств точностных оценок запасов показало, что они не реагируют на изменение формы разведочной сети, ее ориентировки, равномерность расположения разведочных выработок. Не зависят они и от проявленности рудоконтролирующих элементов, сложности морфологии оруденения, прерывистости строения рудных залежей и их размеров, т.е. тех особенностей строения месторождений, которые всегда учитывались практикой разведки как факторы, определяющие методику разведочных работ. Несмотря на это, до сих пор появляются работы по оптимизации разведочной сети на основе минимизации ошибок подсчета запасов и средних параметров. Например, монография Ю. А. Ткачева «Теория и методы подсчета запасов полезных ископаемых» практически целиком посвящена геологостатистическим методам увеличения точности оценивания основных параметров месторождений и в итоге повышения достоверности разведки. В этой работе вопрос оконтуривания, основной вопрос подсчета запасов, не рассматривается вовсе. Без этого серьезно говорить о методике подсчета запасов и тем более теории подсчета запасов просто нельзя.

Изучение влияния погрешностей разведочных работ на экономику горнорудных предприятий, создаваемых на базе разведанных запасов, показывает, что наиболее ощутимые просчеты возникают вследствие неверного понимания геологического строения месторождений, неправильной оценки морфологии рудных залежей и пространственного размещения запасов. При этом ограниченность разведочной информации о морфологии оруденения или ее неверная интерпретация обуславливает ошибку только одного направления — залежи, изображаемые по данным разведки в виде относительно простых по форме и строению тел, в действительности могут оказаться сложными по строению и часто небольшими по размерам. Такие неверные, упрощенные представления о морфологии определяют выбор при технико-экономических расчетах высокопроизводительных, массовых систем отработки. Для реальных, более слож-





Возникновение ошибок геометризации  $\Delta$  при разрезании разведочной сети и график их изменения в зависимости от расстояний между разведочными пересечениями  $a$ :

1 — рудные площади в разведочном сечении, не

попавшие в разведочный контур; 2 — безрудные площади, попадающие в разведочный контур; 3 — площади совпадения разведочных и истинных рудных контуров; 4 — тектонические нарушения; 5 — разведочные пересечения

ных и мелких тел выбранные системы могут оказаться вообще непригодными или ведущими к недопустимо высоким потерям и разубоживанию. Ошибки в представлениях о морфологии оруденения могут привести к тому, что месторождение вообще окажется нерентабельным для эксплуатации.

Изученность морфологии рудных залежей можно охарактеризовать показателем, названным *ошибкой геометризации*, которая отражает степень пространственного несовпадения разведочного и истинного контуров в разведочных сечениях и вычисляется по формуле  $\Delta = 1/2((\Sigma S' + \Sigma S'')/\Sigma S_{\text{ист}})$ , где сумма площадей,  $\Sigma S'$  — рудных,  $\Sigma S''$  — безрудных, попавших в разведочный контур;  $\Sigma S_{\text{ист}}$  — истинная площадь рудной залежи в сечении (рисунок).

Анализ степени разведанности запасов месторождений различных структурно-морфологических типов показал, что при разведке рудных залежей следует выделять ошибки геометризации двух видов — ошибки, обусловленные несовпадением контуров в направлении мощности, и ошибки, обусловленные несовпадением контуров на выклиниваниях рудных залежей в направлении простирания и падения.

Для мощных штокверковых, трубообразных и линзообразных залежей при размерах по простиранию и паде-

нию заведомо больших расстояний между выработками, несовпадения контуров на выклиниваниях, вероятно, незначительны и основная доля в ошибках геометризации будет связана с неточностью установления контуров в направлении мощности залежей. В этом случае ошибка геометризации может быть оценена как

$$\Delta = \frac{\sigma_a}{MK_p} (1 + \bar{n}), \quad (1)$$

где  $\sigma_a$  — переменный параметр, учитывающий извилистость контура рудной залежи;  $\bar{n}$  — среднее число перерывов сплошности оруденения на одну выработку;  $\bar{M}$  — средняя мощность рудной залежи;  $K_p$  — коэффициент рудоносности.

В случае разведки сложных, прерывистых по строению рудоносных зон, представленных системами разобщенных и ветвящихся тел, получены другие выражения

$$\Delta = \frac{aK_p}{4L_0} + (1 - K_p) \quad \text{при } a \leq 2L_0; \quad (2)$$

$$\Delta = 1 - \frac{L_0K_p}{a} \quad \text{при } a \geq 2L_0,$$

где  $L_0$  — общая протяженность рудоносной зоны,  $a$  — расстояние между пе-

ресечениями. Для приближенной оценки степени разведанности прерывистых рудных залежей может использоваться формула  $\Delta \approx 1 - K_p$ .

Приведенные аналитические выражения показывают, что ошибки геометризации запасов связаны функциональной зависимостью с изученностью геологического строения, расстояниями между разведочными пересечениями, сложностью контуров рудных залежей, прерывистостью их строения и линейными размерами. Поэтому они могут рассматриваться в качестве ведущего количественного критерия разведанности запасов минерального сырья.

Для мощных штокерковых, штокеркоподобных, линзо- и трубоподобных рудных залежей различных видов полезных ископаемых ошибки геометризации в запасах категории  $C_2$  превышают 50 %, категории  $C_1$  — изменяются в пределах 30—50 %, категории В — 15—30 %, категории А < 15 %.

Ошибки геометризации для этого типа рудных залежей, возникающие в направлении мощности, — основная погрешность разведки, влияющая на достоверность проектных решений. От правильности установления границ залежей в направлении мощности зависит правильность заложения шахт, бортов карьеров, капитальных подземных выработок на горизонтах горных работ, величины потерь и разубоживания при добыче.

Для маломощных жилообразных и пластовых залежей, обладающих, как правило, четкими геологическими контактами в направлении мощности, границы оруденения наиболее надежно должны быть установлены по падению и простиранию, т. к. от этого зависит положение горизонтов горных работ, глубина шахт и полнота выемки рудных тел при добыче. Отклонения контуров в направлении мощности здесь не столь существенны, легко устанавливаются и учитываются в процессе эксплуатационных работ. Поэтому для этого типа залежей ошибки геометризации, характеризующие степень разведанности их запасов, должны вычисляться не в сечениях, а в проекциях на параллельные плоскости или оцениваться аналитически по формулам

$$\Delta = \frac{1}{4} \cdot \frac{a}{l} \text{ при } a \leq 2l; \quad (3)$$

$$\Delta = 1 - \frac{l}{a} \text{ при } a \geq 2l,$$

где  $l$  — средняя длина залегания по простиранию.

Поскольку в этом случае оценивается только одна из составляющих ошибки геометризации, то ее допустимые значения для запасов одних и тех же категорий должны быть ниже, чем в случае с мощными залежами.

Опыт вычисления ошибок геометризации для подобных месторождений показывает, что ошибки геометризации для запасов категории  $C_1$  не превышают 30 %, категории В — 15 %.

Таким образом, ошибки геометризации являются надежным относительно несложным в вычислениях инструментом, позволяющим количественно оценивать степень разведанности запасов для всех морфологических типов рудных залежей.

Рассмотрим возможности оптимизации разведки на примере некоторых месторождений, используя метод ошибок геометризации в качестве меры разведанности их запасов.

Оценка правильности методики разведочных работ, как известно, проводится по ряду позиций, основными из которых являются: соответствие формы разведочной сети анизотропии строения рудных залежей; правильность пространственной ориентировки разведочных профилей; правильность ориентировки разведочных пересечений; равномерность размещения пересечений; оптимальность принятой густоты разведочной сети для запасов соответствующих категорий; рациональная схема развития разведочной сети.

**Форма разведочной сети** определяется соотношением сторон ячейки разведочной сети и должна выбираться с учетом анизотропии строения рудных залежей в плоскости падения. Для оценки анизотропии строения рудных залежей предложено множество показателей. Однако в практике разведки месторождений форму разведочной сети всегда выбирают с учетом размеров рудных залежей по простиранию и падению. При постоянной плотности разведочной сети, ошибка геометризации минимальна при равенстве соотношений размеров ячейки разведочной

сети и рудных залежей, что подтверждает правильность эмпирического подхода с определением оптимальной формы разведочной сети по анизотропии формы рудных залежей [1].

**Ориентировка разведочных пересечений** должна определять углы встречи рудных залежей близкие к  $90^\circ$ . Этим исключается появление систематических искажений в определении средних мощностей и содержаний, и минимизируется их дисперсия. Ориентировка разведочных пересечений влияет также на степень разведанности запасов месторождений [3]. При фиксированном расстоянии между разведочными пересечениями ориентировка таких пересечений относительно рудных залежей оказывает существенное влияние на достоверность оконтуривания, а, следовательно, и степень разведанности запасов при углах встречи менее  $45^\circ$ . Такие условия могут возникать только на крутопадающих месторождениях при недостаточном внимании к самопроизвольному искривлению скважин, неверном заложении скважин, низком технологическом уровне бурения и слабом маркшейдерском контроле. При углах встречи более  $45^\circ$ , увеличение ошибки геометризациии незначительно, сопоставимо с точностью ее определения и практически не оказывает влияния на изученность форм, размеров и условий залегания рудных залежей.

**Равномерность размещения выработок.** Использование правильной разведочной сети, в особенности на стадии детальной разведки, дает возможность создать систему геологических сечений, позволяющую равнозначно оценивать особенности изучаемого объекта во всем объеме.

Вопросу влияния неравномерности разведочной сети на оценку качества разведки месторождений в литературе уделяется недостаточное внимание. В большинстве опубликованных работ исследование этого вопроса освещено лишь с позиций оценок точности основных геологоразведочных параметров. В них показано, что погрешности таких параметров как средние мощности, содержания, метропроценты при одном и том же числе пересечений практически не зависят от регулярности их размещения в пространстве.

Исследование влияния неравномерности разведочной сети на разведан-

ность запасов выполнено нами на штокверкоподобном месторождении с использованием в качестве критерия разведанности запасов ошибок геометризациии [2].

При малых расстояниях между выработками графики ошибок геометризациии, рассчитанные по равномерным и неравномерным сетям оказались субпараллельными. При больших расстояниях между выработками, когда ошибки приближаются к 50 %, графики сходятся. При этом ошибки геометризациии по неравномерным сетям всегда выше, чем по равномерным. На месторождении, где проводились эксперименты, одинаковые величины ошибок геометризациии при неравномерных разведочных сетях требуют увеличения числа разведочных пересечений примерно в 1,5 раза по сравнению с равномерной сетью.

Таким образом, использование при разведке однородных участков регулярных разведочных сетей приводит к повышению степени разведанности запасов и является отчетливым резервом на пути повышения эффективности разведочного процесса.

**Ориентировка разведочных профилей** при разведке большинства месторождений не вызывает особых проблем. Крутопадающие рудные залежи независимо от наличия или отсутствия элементов склонения в продольной плоскости разведуются системами вертикально или горизонтально ориентированных разрезов. Создание наклонных профилей скважин или наклонных горизонтов горных работ является трудоемкой задачей с технической точки зрения и не практикуется.

При разведке пологозалегающих пластообразных залежей ориентировка разведочной сети выбирается согласно анизотропии их форм.

При разведке некоторых типов резко анизотропных рудных залежей, например, узких лентообразных в плане залежей гидрогенных месторождений и россыпей, выбор оптимальной ориентировки разведочных профилей может быть предметом специального рассмотрения. Извилистость в плане подобных рудных залежей при разведке их системами параллельных сечений приводит к деформации разведочной сети и увеличению фактических расстояний между профилями, измеренных по линии простираия залежей. Кроме того,



извилистость залежей обуславливает в этом случае возникновение эффекта неравномерности сети, который увеличивает ошибки геометризации и снижает степень разведанности запасов. Причем, чем более извилисты залежи, тем сильнее проявляется этот эффект.

Создание систем непараллельных профилей, ориентированных в каждом случае вкрест простирания рудных залежей, делает разведочную сеть в целом более регулярной и повышает при одной и той же ее густоте степень разведанности запасов [4].

**Густота разведочной сети** непосредственно определяет достоверность оценки запасов и общие затраты времени на проведение разведочных работ.

На практике проблема выбора оптимальной густоты сети решается главным образом исходя из аналогии с уже разведанными месторождениями, т. е. качественно, приближенно. Попытки количественного обоснования обычно базируются на вычислении погрешностей средних параметров и цифр запасов с помощью различных математических формул или методом разрежения по наиболее разведанным участкам месторождений.

Однако точность вывода средних параметров и цифр запасов не может определять ни разведанность запасов, ни оптимальную для заданной разведанности густоту сети.

В работе П. П. Яковского и Д. М. Фивейского показано, что в зависимости от размера участка детализации одной и той же рудной залежи могут быть получены совершенно различные выводы об оптимальности или неоптимальности конкретной сети [8].

В основе аналитических методов лежит известная формула теории вероятности  $\delta = (tv)/\sqrt{n}$ , где  $\delta$  — относительная ошибка среднего;  $t$  — коэффициент вероятности;  $v$  — коэффициент вариации;  $n$  — число наблюдений.

Пользуясь этой формулой, можно определить только число разведочных пересечений, а не расстояние между ними, что принципиально различно. Однако для расчета необходимого числа пересечений использовать эту формулу по существу невозможно, т. к. входящие в нее величины  $\delta$ ,  $t$  и  $n$ , строго говоря, неизвестны и могут приниматься лишь по аналогии с другими объ-

ектами. Поэтому, результат аналитических вычислений оказывается при этом полностью зависящим от допустимости такой аналогии.

Предлагались и другие пути количественного решения проблемы оптимизации сети, в частности, на основе геостатистики. Основным инструментом для оптимизации плотности рекомендовалось использовать нормированную автокорреляционную и структурную функции или спектральную плотность дисперсии. Эти параметры тесно связаны между собой и не имеют особых преимуществ друг перед другом.

В качестве примера рассмотрим методику определения оптимальной сети с помощью коррелограммы, как наиболее наглядной функции.

Основная идея подхода достаточно проста и заключается в нахождении предельного расстояния, на котором существует зависимость для анизотропной пространственной переменной. Это расстояние называется радиусом корреляции и определяется в точке, где корреляционная функция равна нулю. Считается, что при шаге сети равному радиусу корреляции можно осуществлять интерполяцию значений переменной, и в данном смысле радиус корреляции является оптимальным расстоянием сети. Однако все не так просто.

Одно из свойств корреляционной функции заключается в том, что она не изменяется при добавлении к пространственной переменной постоянной величины. Вследствие этого радиус корреляции определяется лишь величиной периода изменения переменной и не зависит от ее величины и амплитуды. Это значит, что одинаково извилистые залежи разной мощности (или ширины) будут иметь одинаковый радиус корреляции и соответственно требовать одинаковую сеть при разведке.

Наложение на переменную даже небольшого тренда будет резко уменьшать радиус корреляции, и, соответственно, уменьшать расстояние между разведочными пересечениями, что противоречит всем принципам разведки месторождений.

Наконец, при неизменной мощности залежи, но резкой извилистости автокорреляционная функция мощности становится вообще неопределенной, т. к. пространственная переменная в данном случае остается постоянной.

Имеющиеся выводы не могут быть получены при использовании в качестве основного инструмента оптимизации сети ошибок геометризации. Прежде всего, в отличие от всех ранее предлагавшихся показателей разведанности запасов, ошибка геометризации зависит от изученности геологического строения месторождения, т. к., чем правильнее понята структура месторождения, закономерности локализации оруденения, тем правильнее выполнено оконтуривание рудных залежей, а значит ближе разведочные контуры к истинным, и, соответственно, меньше величины ошибок геометризации.

Ошибка геометризации функционально связана с расстояниями между разведочными пересечениями (а не их количеством). В приведенных формулах фиксируется связь ошибки геометризации с линейными размерами рудных залежей, сложностью их морфологии и прерывистостью строения. Эти связи закономерны и оправданы всей логикой и практикой разведки месторождений полезных ископаемых.

Таким образом, по нашему убеждению, в настоящее время разработаны необходимые условия для оптимизации методики разведки месторождений на количественной основе.

**Вопросы определения рациональной схемы развития разведочной сети** или стратегии разведочных работ — наиболее острые на месторождениях, значительных по своим размерам, когда протяженность рудных залежей по простиранию измеряется многими и даже десятками километров, а общее число разведочных скважин начинает измеряться десятками тысяч. К этому типу относятся прежде всего гидрогенные месторождения.

На практике разведочные работы на подобных месторождениях проводятся исходя из принципа последовательных приближений, когда разведочные профили и сеть скважин в них последовательно сгущаются, как правило, вдвое. Традиционно, при изучении этих объектов создаются сети параллельно ориентированных профилей. В последнее время для разведки сложных, сильно извилистых залежей, рекомендуется использовать взаимно перпендикулярные профили, создаваемые в пределах участков резких изгибов и раздувов залежей. Такой подход все чаще реализуется в практике разведки. При

этом профили развиваются из относительно редкой квадратной сети пересечений.

Кроме того, в качестве возможного варианта создания разведочной сети можно рассмотреть систему разноориентированных профилей, учитывающих в каждом конкретном случае ориентировку залежей. Таким образом, реально можно говорить о трех основных стратегиях развития сети на залежах подобного типа: параллельные профили, ориентированные вкрест общего (генерального) простирания; параллельные и взаимно перпендикулярные (на резких изгибах залежей) профили; разноориентированные профили.

В результате выполненных экспериментов [5], установлено, что при разведке сильно извилистых рудных залежей развитие сети с параллельными профилями не эффективно. Две другие стратегии по эффективности оказались близкими. Общее число скважин при использовании второй и третьей стратегий, необходимое для достижения заданной степени разведанности, снижается в зависимости от категории запасов на 5—10 %.

В процессе выполнения экспериментов также выяснилось, что эффективность той или иной стратегии зависит также от последовательности развития сети скважин. Здесь возможны два основных варианта. Первый — сеть скважин на месторождении последовательно сгущается в два, четыре, восемь и т. д. раз. Второй — сеть сгущается не по всему месторождению, а в начале только на тех участках, где установлено оруденение и в стороны от него.

Выполненные эксперименты показали, что сгущение разведочной сети наиболее эффективно в том случае, когда сеть развивается от установленных рудных участков. При такой схеме резко сокращается число поисковых скважин, необходимых для установления наличия оруденения. При этом объем бурения, а, следовательно, затраты и время геологоразведочных работ сокращаются примерно на 20 % при всех трех стратегиях.

Таким образом, можно сказать, что вопросы оптимизации методики разведочных работ играют важнейшую роль. Несоблюдение условий оптимальности методики разведки может свести к нулю все усилия, затраченные на повышение производительности тру-

да и совершенствование технических средств разведки. Следовательно, ускорение процесса разведочных работ может достигаться лишь только за счет оптимизации методики разведки месторождений.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Анизотропия строения месторождений и оптимальная форма разведочной сети*/В. А. Викентьев, В. А. Воронцов, П. И. Кушнарв, П. П. Ясковский.—М., 1981. Деп. в ВИНТИ № 4274-81.
2. *Викентьев В. А., Карпенко И. А., Шумилин М. В.* Экспертиза подсчета запасов рудных месторождений.—М.: Недра, 1988.
3. *Влияние ориентировки разведочной сети на достоверность оконтуривания рудных залежей*/В. А. Викентьев, В. А. Воронцов, П. И. Кушнарв, П. П. Ясковский//Иzv. вузов. Геология и разведка. 1983. № 4. С. 139—141.
4. *Каждан А. Б., Шумилин М. В., Викентьев В. А.* Методические основы количественной оценки разведанности запасов твердых полезных ископаемых//Сов. геология. 1974. № 11. С. 7—19.
5. *О непараллельной сети профилей при разведке извилистых лентообразных месторождений*/В. А. Викентьев, В. А. Воронцов, П. И. Кушнарв, П. П. Ясковский//Иzv. вузов. Геология и разведка. 1986. № 5. С. 83—85.
6. *О равномерности размещения выработок при разведке месторождений*/В. А. Викентьев, В. А. Воронцов, П. И. Кушнарв, П. П. Ясковский//Иzv. вузов. Геология и разведка. 1983. № 3. С. 133—136.
7. *Рациональное развитие сети при разведке извилистых рудных залежей*/В. А. Викентьев, В. А. Воронцов, В. В. Ильин, П. И. Кушнарв//Иzv. вузов. Геология и разведка. 1988. № 8. С. 75—80.
8. *Ясковский П. П., Фивейский Д. М.* О двух подходах к оптимизации разведочной сети//Иzv. вузов. Геология и разведка. 1982. № 4. С. 168—170.

УДК 550.8 : 519.2

© А. Б. Каждан, В. И. Пахомов, 1991

### **Методологические основы системного анализа разноуровневой геологической информации в прогнозно-поисковых целях**

А. Б. КАЖДАН, В. И. ПАХОМОВ

При формационном направлении металлогенического анализа, весьма эффективным при региональном прогнозировании перспектив рудоносности и оконтуривании структурно-металлогенических зон, не обеспечивается, однако, получение уверенных исходных данных для разделения и сортировки рудоносных площадей по их промышленной значимости. Несмотря на высокую разрешающую способность современных поисковых методов, основные возможности поисков и прогнозирования оруденения сводятся не столько к выявлению новых высокопродуктивных месторождений, сколько к массовой отбраковке аномальных, но малоперспективных объектов и территорий. Отсутствие научно обоснованной методологии обработки эмпирических данных и разбраковки площадей по степени их перспективности приводит к огромным непроизводительным затратам времени и труда, что резко снижает результативность и экономическую эффективность геологоразведочных работ.

При изучении и оценке недр рудные месторождения обычно рассматриваются как пространственно изолированные аномальные участки земной коры, сформированные в определенных условиях. По мнению ряда специалистов, условия формирования крупных и уникальных месторождений настолько специфичны, что принципы аналогий практически неприменимы в целях их прогнозирования. Широко распространено суждение о том, что закономерности размещения рудоносных площадей проявляются лишь в региональных структурах земной коры, а при переходах к локальным участкам доминируют случайные факторы. Независимо от масштабов исследований в прогнозно-поисковой практике традиционно ориентируются на изучение и оценку только конечных целевых объектов — месторождений полезных ископаемых. На ранних стадиях работ из-за редкой сети наблюдений эти объекты еще не выявляются, а ценные сведения о составе и строении промежуточных объектов (рудных узлов и



полей) практически не обобщаются и не используются, что заметно снижает информативность результатов.

Количественная обработка геолого-разведочных данных сводится обычно к получению одномерных или многомерных статистических характеристик, абстрагированных от пространственных координат точек наблюдений и оторванных от геометрических баз их измерений. Поэтому создаваемые геолого-статистические модели не учитывают свойств полезных ископаемых как пространственных переменных, не дают сведений о детерминированных составляющих их изменчивости, а прогнозирование и поиски месторождений уподобляются процессу принятия решений в условиях неопределенности. При этом для суждения о количественных параметрах прогнозируемых и оцениваемых объектов берутся статистические характеристики изменчивости свойств, выведенные непосредственно по данным анализа проб или образцов, без учета их объемов, ориентировки и геометрии сетей наблюдений. В результате получаемые характеристики в лучшем случае вуалируют либо вообще не отражают свойств описываемых объектов.

Действующая в настоящее время методология обработки исходных геологических, геофизических и геохимических данных при прогнозировании рудоносности ограничивается изучением отдельных структурных элементов сложных и дискретных геологических объектов, не уделяя достаточного внимания характеру и особенностям связей между ними. Такой подход позволяет использовать лишь весьма малую часть полезной информации, содержащейся в исходных эмпирических данных.

Более прогрессивная методология возможна на основе системного подхода к изучению рудоносных участков. При таком подходе эти участки рассматриваются как сложно построенные объекты, обладающие многоуровневым иерархическим строением не только рудовмещающих геологических структур, но и самих рудных образований. В целях решения прогнозно-поисковых задач оперируют иерархическими системами рудоносных участков, уровни строения которых соизмеримы с размерами рудных тел, зон, месторождений, полей, узлов, районов и более круп-

ных таксономических единиц. Под элементами их неоднородности подразумеваются любые проявления, образующие данную систему, а понятие структуры включает принцип, способ и закон связи этих элементов в рамках данного целого.

Любая система может рассматриваться как элемент неоднородности системы более высокого иерархического уровня; в свою очередь, в ее пределах могут быть выявлены элементы неоднородности более низкого иерархического уровня. Метасистемы рудных образований или рудовмещающих пород уподобляются упорядоченным единствам, состоящим из комплексов взаимосвязанных элементов неоднородностей различных иерархических уровней. Таким образом, каждая из систем выступает в заданном отношении и в заданном масштабе как целое. Подобный подход способствует созданию геолого-структурных моделей объектов изучения, отражающих изменения представлений геологов об их строении по мере детализации геологоразведочных работ.

Системы любого иерархического уровня, как и вся метасистема в целом, описываются не только свойствами их структурных элементов, но также характером связей между ними, который чаще всего реализуется в понятии структуры данного иерархического уровня или комплекса взаимосвязанных уровней. Познавательные (эмерджентные) свойства систем и метасистем определяются принципами, законами и способами связи структурных элементов различных иерархических уровней, что способствует целенаправленному извлечению информации из полученных эмпирических данных по сравнению с действующей традиционной методологией.

Использование системного подхода тесно связано с математической формой выражения наблюдаемых данных, обеспечивающей единство количественной и качественной определенности изучаемых объектов. Только путем последовательной генерализации исходных данных на каждом иерархическом уровне строения рудоносных участков обеспечивается возможность выделения детерминированных составляющих изменчивости признаков, которые служат главным предметом исследований

и основной характеристик структур наблюдаемых полей.

В отличие от случайных закономерных составляющие статистических характеристик позволяют выявить характер анизотропии изучаемых полей, выдержанность их строения, формы, размера и ориентировки элементов неоднородности данного иерархического уровня, т. е. практически все необходимые данные для суждения не только о свойствах элементов неоднородности, но и об их связях; определяющих структуры наблюдаемых полей. Поэтому создание математической модели системного анализа исходных эмпирических данных — необходимая предпосылка успешного решения проблемы.

Полноценная математическая модель должна отвечать комплексу требований, учитывающих влияние природных факторов и условий проведения измерений на получаемую информацию. Она должна обеспечивать возможность выявления и оценки разнородных характеристик изучаемой метасистемы, в частности их закономерных и случайных составляющих при сохранении условий соразмерности, соподчиненности и пропорциональности. В целях выполнения всей совокупности перечисленных требований математическая модель должна учитывать условия обработки как случайных, так и детерминированных исходных данных, соотношения которых могут зависеть не только от природных особенностей рудоносных образований, но и от условий сбора информации при их исследованиях в различных масштабах, т. е. на разных иерархических уровнях строения.

Созданию подобной математической модели В. И. Пахомовым было отдано более десяти лет упорных исследований. К настоящему времени ее сущность может быть охарактеризована совокупностью нижеперечисленных основных положений.

Любая геологическая, геофизическая или геохимическая информация об объектах исследований может быть получена выборочным методом, путем измерения тех или иных свойств в конкретных точках геопространства. Каждое измерение (геоизмерение) функционально связано с его характеристиками: базой единичного наблюдения и областью влияния измерения, которые

рассматриваются как фундаментальные понятия данной математической модели.

Базой единичного наблюдения считается та часть геопространства, в пределах которого при измерении происходит интегральное накопление информации об исследуемом свойстве. Наблюдаемые значения геоизмерений  $x$  представляют собой в общем случае весовые средние, полученные в объеме, равном базе единичного наблюдения, а весовые коэффициенты  $q(r)$  являются функцией расстояния  $r$  от центра базы единичного наблюдения  $v$

$$\bar{x} = \int_v x q(r) dr.$$

В простейших случаях, например при обработке данных литохимического опробования первичных ореолов рассеяния, базой единичного наблюдения является штучный образец породы объемом  $n \cdot 10 \text{ см}^3$ , а значения средних — средние арифметические содержания при  $q(r) = \text{const}$ . При обработках данных аэрогазметрии базой единичного наблюдения служит параллелепипед нередко со сторонами  $150 \times 150 \times 0,5 \text{ м}$ , а при обработке гравиметрических данных — вся Земля. В последнем случае значение замера в конкретной точке представляет собой весовое среднее с весовым коэффициентом  $q = A/r^2$ , где  $A$  — постоянный коэффициент.

Областью влияния измерения предполагается считать минимальную по размерам часть геопространства, которая может быть выделена в результате геоизмерения конкретного вида. По размерам области влияния измерения в верхнем пределе могут совпадать с базой единичного наблюдения, а в нижнем пределе — стремиться к нулю.

В одних случаях, например, при литохимическом опробовании эндогенных ореолов, база единичного наблюдения и область влияния измерения совпадают, ограниченные объемом пробы. В других случаях геохимического опробования (вторичные ореолы, водные или биогеохимические ореолы и потоки рассеяния) области влияния измерений меньше баз единичных наблюдений. Еще большая разница возникает при измерениях многих физических, особенно гравиметрических полей. Вследствие ограниченной точности гравиметрических наблюдений всегда имеется интервал значений гравиме-

трического поля, в пределах которого они практически неотличимы друг от друга. Поскольку гравитационное поле является функцией объемов неоднородностей, это приводит к появлению на графике функции  $q(r)$  отрезка с постоянными значениями весовых коэффициентов, расположенного в окрестностях малых значений  $r$ . Длина этого небольшого отрезка представляет собой область влияния гравитационного поля, в то время как базой единичного гравитационного наблюдения является вся Земля. Область влияния измерения служит характеристикой масштабности неоднородностей исследуемых полей.

Все геоизмерения подразделяются на две группы: с постоянной и переменной базами единичных наблюдений.

Базы единичных наблюдений первой группы не изменяются от одной точки измерения к другой, а каждое наблюдение представительно только для определенного по размерам объема недр. К ним относятся литогеохимические, радиометрические, петрохимические, петрофизические наблюдения, а также измерения, значения которых определяются суперпозицией аномальных составляющих от природных объектов (гравитационные, магнитные, электромагнитные и электрические поля).

Базы единичных измерений второй группы непостоянны как по размерам, так и по форме. В зависимости от условий измерений они могут изменяться от точки к точке. К ним относятся каротажные, гидрогеохимические, атмосферические и другие наблюдения и, кроме того, геофизические с искусственными источниками возбуждения.

По размерам областей влияния все геоизмерения делятся на зависящие и не зависящие от условий наблюдений. Типичные представители первой группы — естественные геофизические, аэро-радиометрические измерения, а также геофизические измерения с искусственными способами возбуждения. Ко второй группе относятся геохимические, петрохимические, петрофизические и др. (таблица).

Для описания влияния характеристик геоизмерений на результаты обработки эмпирических данных предлагается использовать безразмерный коэффициент  $K=L/l$ , где  $L$  — расстояние

между точками наблюдения;  $l$  — размер базы единичного наблюдения.

Путем численного интегрирования исходных точек данных математических моделей структур геохимических полей установлено, что нормированные автокорреляционные функции точечных и осредненных значений различаются тем заметнее, чем выше степень осреднения исходных точечных данных. Значение коэффициента  $K$  может определять выбор оптимальной модели обрабатываемых переменных величин. Значения  $K>1$  указывают на отчетливо выраженный пространственно-дискретный тип наблюденных переменных, отсутствие функциональных и значимых корреляционных связей между их значениями в смежных точках наблюдений и на неправомочность использования детерминированных моделей в целях их обработки. Значения  $K<1$  свидетельствуют о принадлежности наблюденных переменных к пространственно-непрерывному типу, для которого характерно проявление значимых корреляционных или функциональных связей между значениями признака в смежных точках, что позволяет использовать детерминистские, в частности горно-геометрические модели их обработки. Значение  $K=1$  дает основание считать тип наблюдаемых переменных квазинепрерывным.

Задача математической модели системного анализа включает изучение закономерной составляющей изменчивости признаков для всех групп рассмотренных полей. Обработка подобных данных может быть сведена к разложению исходной количественной информации в ряд разноразмерных количественных характеристик с помощью системы скользящих окон, каждое из которых последовательно выступает в качестве элемента неоднородности очередного иерархического уровня [1—3]. Если рассматривать каждое окно в качестве композитной пробы, обеспечивающей получение осредненного значения признака, отнесенного к центру данного квадрата, то квадрат может быть принят за базу единичного наблюдения со стороной  $l$ , а расстояние между центрами смежных квадратов  $L$  — за шаг наблюдений. В случае экспотенциальной структуры поля автокорреляционная функция точечных значений  $r(L) = \exp(-|L/l_0|)$ , где  $l_0$  — радиус автокорреляции. Введя  $\beta = l/l_0$ ,



# Группировка методов поисков по характеристикам геоизмерений

| Область влияния измерения          | База единичного наблюдения                                                                                |                                                                                                                                       |
|------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                    | Постоянная                                                                                                | Переменная                                                                                                                            |
| Не зависящая от условий наблюдений | А. Литохимия по первичным ореолам рассеяния<br>Петрохимия<br>Петрофизика<br>Петрография<br>Радиометрия    | Б. Гидрогеохимия<br>Атмогеохимия<br>Биогеохимия<br>Литохимия по вторичным ореолам<br>Литохимия по потокам рассеяния                   |
| Зависимая от условий наблюдений    | В. Естественные потенциальные геофизические поля: гравитационные магнитные электрические электромагнитные | Г. Аэрогаммаспектрометрия<br>Геофизические поля с искусственными источниками возбуждения: электрические электромагнитные сейсмические |

можно записать  $r(L) = \exp(-K\beta)$ , где  $K=L/l$ .

Если размеры площади осреднения малы по сравнению с размерами элементов неоднородности, то автокорреляционные функции точечных и осредненных значений будут мало отличаться друг от друга. При  $\beta=0,2$  это отклонение не превысит 10 % и автокорреляционную функцию точечных значений можно приближенно отождествлять с автокорреляционной функцией значений, осредненных по квадратам со стороной  $l < 0,2 l_0$ . При этом с ростом параметра  $\beta$  дисперсия осредненных значений быстро убывает. Если принять размеры окон, равные размерам элементов неоднородности ( $\beta \approx 1$ ), то на расстояниях  $L$ , равных  $l$ , доля закономерной составляющей может увеличиться до 30 % (но не более). Однако при уменьшении расстояния между центрами окон до половины  $l$  ( $K = -L/l = 0,5$ ) доля закономерной составляющей возрастет до 50 % и более, что позволяет считать такие геоизмерения пространственно-непрерывными переменными. Соответственно возможные ошибки интерполяции признаков при использовании аппарата топофункций снизятся от 40—50 % (при  $K > 1$ ) до 30—40 % при  $K=1$  и менее 30 % при  $K < 1$ . Экспериментально подтверждается, что при смещении статистического окна осреднения на расстояние менее  $l/2$  ( $K < 0,5$ ) закономерная составляющая изменчивости признака уверенно выделяется уже при разме-

рах элементов неоднородности не менее  $1/3$  размера окна осреднения ( $\beta < 3$ ).

Корректное использование системного подхода к обработке информации обеспечивается соблюдением трех важнейших принципов: соразмерности, соподчиненности и пропорциональности.

Согласно принципу соразмерности обработка количественной информации должна проводиться в статистических окнах, соразмерных с рудными образованиями данного иерархического уровня. В качестве характеристики «целого» этого уровня используются численные значения (математические ожидания) его важнейших свойств, а структуры взаимосвязи элементов его неоднородности могут быть описаны какой-либо их функцией. Аналитически понятие «целого» заданной системы выражается формулой:  $C^j = Z(\{\mathcal{E}^j\})^j$ , где  $C^j$  — «целое»  $j$ -го уровня,  $\{\mathcal{E}^j\}$  — множество элементов неоднородности  $j$ -го уровня,  $Z(\{\mathcal{E}^j\})^j$  — структура взаимосвязи и организации элементов неоднородности, образующих «целое»  $j$ -го уровня.

Элементами неоднородности «целого» обычно выступают значения закономерных составляющих изменчивости содержаний на последующем уровне строения. Для достоверной оценки этих значений методом «скользящих средних» нужно обеспечить не менее 20—25 замеров в каждом статистическом окне, а при использовании метода

«скользящих медиан» их число может быть снижено до 8—10.

В качестве характеристик взаимосвязей элементов неоднородности системы могут быть использованы любые одномерные или многомерные параметры. Так, например, дисперсия содержаний химического элемента уровня строения рудного поля описывается формулой

$$D_{x^{\Pi}} = \frac{\sum (x_i^M - \bar{x}^M)^2}{n-1},$$

где  $D_{x^{\Pi}}$  — дисперсия содержаний элемента «х» на уровне строения рудного поля;  $x_i^M$  — значение закономерной составляющей его содержаний на уровне строения месторождения в  $i$ -ой точке пространства;  $\bar{x}^M$  — среднее значение закономерной составляющей содержаний «х» в пределах статистического окна, соразмерного с рудным полем;  $n$  — число точек, по которому был произведен расчет среднего содержания.

В соответствии с принципом соподчиненности при использовании разнуровневных окон каждое из них последовательно выступает в качестве базы единичного наблюдения, т.е. элемента для получения закономерной составляющей очередного иерархического уровня. Одновременно оно является и областью исследования статистической функции предыдущего иерархического уровня.

Основное содержание принципа пропорциональности сводится к требованию унификации размеров статистических окон для всех иерархических уровней строения рудоносных образований. Для получения аналогичных или хотя бы гомологичных оценок статистических параметров оптимальная пропорциональность линейных размеров окон должна быть равна пяти. Изменения качественных и количественных оценок рудных образований от одного уровня к другому могут служить показателями интенсивности и экстенсивности рудного процесса, а в качестве характеристик рудных объектов конкретных иерархических уровней рекомендуется использовать разностные составляющие оценок «целых» сопредельных уровней. Характеристика  $\Delta C^j = C^j - C^{j-1}$  (где  $C^j$  — «целое»  $j$ -уровня строения) описывает неоднородность заданного уровня строения рудных образований. В такой

трактовке значение «целого» уровня в конкретной точке пространства выступает в качестве «фона» для значения «целого» более высокого уровня. По оценкам  $\Delta C^j$  выделяются аномалии любых характеристик (содержаний, дисперсий, энтропий и др.), а степень их аномальности может быть оценена с помощью критерия

$$t^j = \frac{\Delta C^j}{\sqrt{(\sigma^2)^{j-1}}},$$

где  $(\sigma^2)^{j-1}$  — дисперсия  $j-1$  уровня строения). Критерий  $t$  характеризует неоднородность признака, нормированную на ее среднеквадратическое отклонение. Для оценок степени аномальности комплексных величин предлагается показатель

$$T = \sum t^j / N,$$

где показатели аномальности:  $T$  — комплексных величин,  $t^j$  — конкретной характеристики;  $N$  — число характеристик, входящих в комплексную величину.

В терминах предлагаемой модели аналог коэффициента корреляции двух переменных величин

$$r^j = \frac{\text{cov}(x^{j-1}, y^{j-1})}{\sqrt{D^j_x D^j_y}},$$

где  $r^j$  — коэффициент корреляции  $j$ -го уровня строения;  $\text{cov}(x^{j-1}, y^{j-1})$  — ковариация  $j-1$  уровня строения;  $D^j_x$ ,  $D^j_y$  — дисперсии  $j$ -го уровня строения переменных величин может быть представлен как коэффициент связи  $r^j = t^j_x t^j_y$ , т.е. как значение среднего произведения критериев аномальности двух переменных (коэффициент конкордантности).

Комплексные критерии перспективности типа

$$T = \frac{\sum_1^n t^j_x + \sum_1^n t^j_D}{2n},$$

где  $t^j_x$ ,  $t^j_D$  — критерии аномальности соответственно содержаний элементов и их дисперсий, характеризующие степень телескопированности аномальных площадей различных рангов, а также примеры использования данной математической модели для обработки эмпирических данных аэрогаммаспектрометрических, литогеохимических и петрофизических съемок рассмотрены в [1, 2, 4—6].



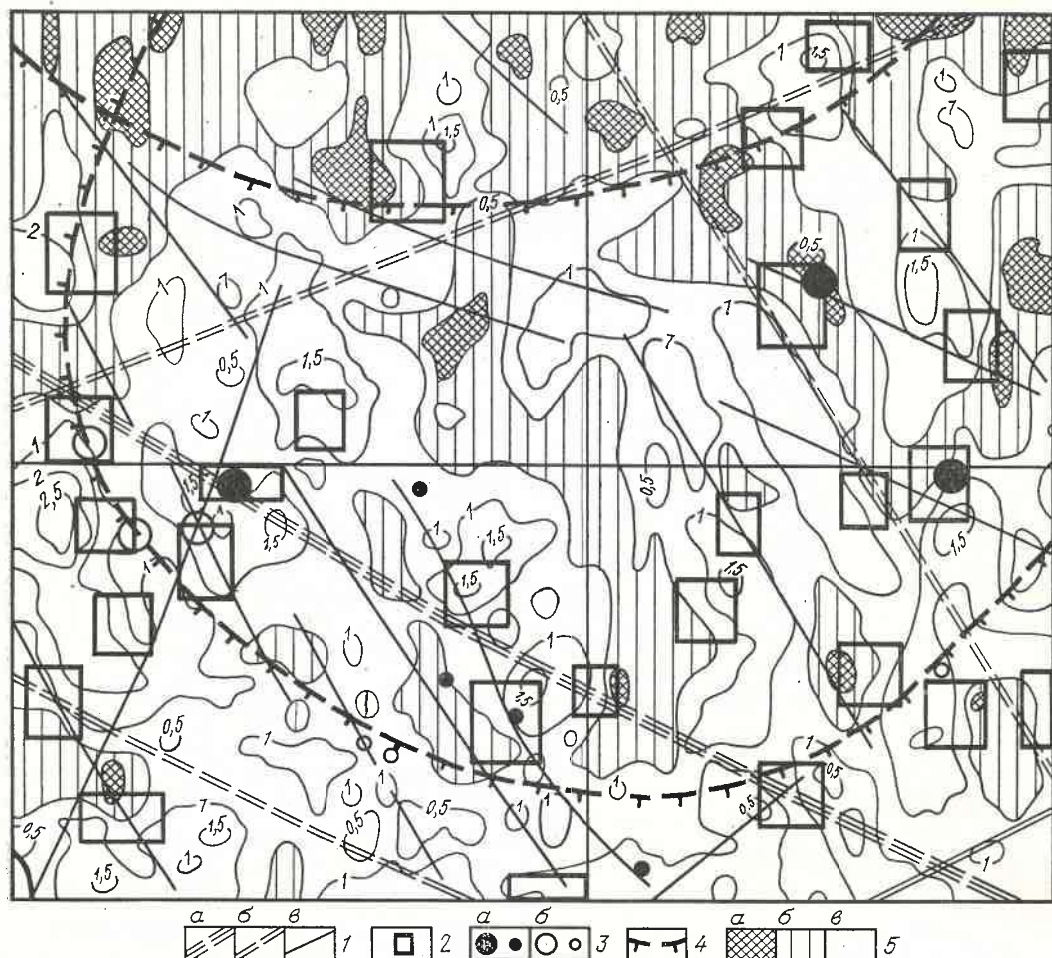


Рис. 1. Карта изолиний коэффициента связи между параметрами гравитационного и магнитного полей уровня месторождения:

1 — разломы: а — глубинные подкоровые, б — коровые, в — прочие, 2 — участки максимального градиента КРК, 3 — месторождения и рудопроявления: а — молибдена, б — вольфрама 4 — региональные структуры центрального типа, 5 — область значений коэффициентов связи: а —  $< -0,5$ ; б —  $-0,5 \dots +0,5$ ; в —  $> +0,5$

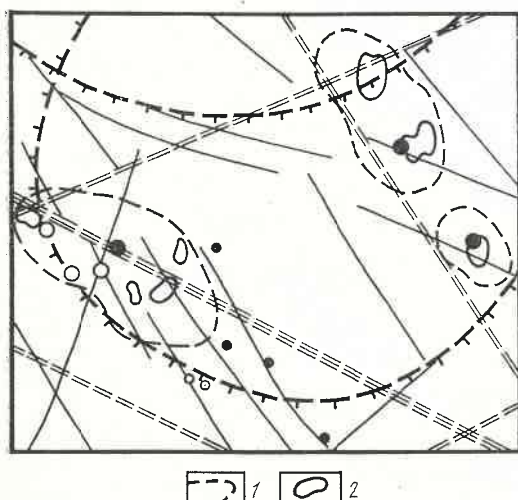


Рис. 2. Результаты обработки данных литохимической съемки территории на молибден в скользящих окнах:

контуры перспективных молибденовых: 1 — рудных полей, 2 — участков месторождений (по комплексному критерию перспективности); остальные усл. обозн. см. рис. 1

Таким образом, математическая модель системного анализа разноуровневной геологической информации представляет собой соподчиненный последовательный ряд количественных ха-

рактеристик изучаемых объектов, описанных с помощью систем скользящих статистических окон. В зависимости от значений параметра  $K=L/l$ , где  $L$  — расстояние между центрами смежных



квадратов, а  $l$  — база единичного наблюдения, равная длине стороны квадрата, используемые модели могут иметь пространственно-непрерывный, пространственно-дискретный или смешанный характер. Соразмерность скользящих статистических окон с элементами неоднородности конкретных иерархических уровней, их соподчиненность и пропорциональность обеспечивают объективность оценок интенсивности и экстенсивности рудогенерирующего процесса в различных масштабах его проявления. Об этом можно судить по характеру изменения количественных характеристик изучаемых признаков по мере перехода от одного иерархического уровня к другому. Результаты же этих оценок составляют основу количественного прогнозирования рудоносности.

Для иллюстрации возможностей пространственно-непрерывной и пространственно-дискретной моделей ниже приводятся результаты обработки данных гравитационной, магнитной и литохимической съемки одной из рудоносных площадей на молибден в Прибайкалье. По изолиниям коэффициента связи между значениями отдельных характеристик гравитационного и магнитного полей выделены участки их максимальных градиентов, перспективные на выявление рудоносных образований грейзеновой формации (рис. 1). По результатам обработки исходных данных окнами, сопоставимыми с размерами рудных узлов, полей и месторождений, с использованием комплексного критерия перспективности оконтурены площади, соответствующие потенциальным молибденовым рудным полям и месторождениям (рис. 2). Необходимо обратить внимание на хорошую сходимость результатов обработки по обоим моделям, а также четко проявленные связи выделенных рудных территорий с элементами купольной и разрывной тектоники регионального значения.

Проблемы системного анализа применительно к локальному прогнозированию рудоносности, поискам и оценке рудных месторождений уже в течение ряда лет находятся в центре внимания коллектива преподавателей и научных сотрудников кафедры методики поисков и разведки полезных ископаемых МГРИ. За истекшие годы ими убедительно доказаны:

правомерность рассмотрения рудоносных образований земной коры как взаимосвязанных многоуровневых иерархических метасистем;

поразительное постоянство размеров рудоносных систем определенных рангов и соотношений размеров систем смежных уровней — порядка 4—5;

наличие тесных связей рудоносных систем всех уровней строения с соизмеримыми с ними рудовмещающими геологическими системами, которые могут рассматриваться как сомасштабные предпосылки их рудоносности;

возможность выявления и картирования сомасштабных признаков рудоносности образований различных иерархических уровней с применением математической обработки исходных данных;

возможность получения уверенных количественных оценок прогнозных ресурсов описываемых объектов на основе использования их соразмерных критериев (предпосылок и признаков) рудоносности с учетом аддитивности ресурсов рудных образований всех высших рангов.

На основании этих исследований сформулированы условия эффективно-го локального прогнозирования оруденения: соразмерность критериев и объектов поисков, последовательное и соподчиненное использование их количественных характеристик с учетом степени телескопирования систем различных рангов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Интерпретация результатов литохимического опробования методом последовательной генерализации исходных данных*//А. Б. Каждан, В. И. Пахомов, Е. А. Демидов и др.//Изв. вузов. Геология и разведка. 1986. № 2. С. 96—104.
2. Каждан А. Б., Пахомов В. И. Обобщение исходных данных при геометризации предпосылок и признаков оруденения//Сов. геология, 1981. № 12. С. 27—34.
3. Каждан А. Б. Поиски и разведка месторождений полезных ископаемых. Научные основы поисков и разведки.— М.: Недра, 1984.
4. Каждан А. Б., Пахомов В. И. Обработка исходных эмпирических данных с позиций системного подхода к изучению недр//Сов. геология, 1986. № 11. С. 3—11.
5. Каждан А. Б. Условия эффективного локального прогноза рудоносности//Сов. геология, 1987. № 2. С. 63—69.
6. Пахомов М. И., Пахомов В. И. Петрофизический метод выделения и оценки метасоматитов.— М.: Недра, 1988.

## Оценка балансовой принадлежности запасов полезных ископаемых на ранних стадиях разведки месторождений

Р. М. БУЛЫГИН, О. И. ГУСКОВ

При проектировании предприятий по добыче полезных ископаемых предусмотрена возможность полного или частичного использования разведанных запасов категории  $C_2$ . По конкретным месторождениям допустимая доля запасов этой категории устанавливается ГКЗ СССР (ТКЗ). При этом могут быть допущены существенные ошибки в оценке общих запасов месторождения за счет субъективного подхода экспертов и слабой изученности запасов категории  $C_2$ . Такие ошибки наиболее вероятны при промышленном освоении месторождений третьей и четвертой групп сложности со сложной морфологией рудных тел и прерывистым характером оруденения, для которых допустимая доля запасов категории  $C_2$  обычно принимается равной 20—50 %.

При разведке флангов крупных месторождений и рудных полей оценки запасов категории  $C_2$  могут быть уточнены сопоставлением результатов предварительной и детальной разведки наиболее изученных центральных частей [2]. Основные принципы такого подхода рассмотрим на примере промышленной оценки редкометалльных месторождений, сконцентрированных в пределах одного крупного рудного поля.

На всех месторождениях рудного поля оруденение локализовано в пределах продуктивной толщи ордовик—девон, относящейся к формации черных сланцев, и контролируется разрывными нарушениями различных направлений, складчатостью, контактами пород различного состава, а также древней зоной окисления и цементации сложного строения.

Структурно-тектоническая неоднородность рудовмещающей толщи и разнообразие рудоконтролирующих факторов обусловили прерывистость оруденения и сложную морфологию рудных образований. Скопления сплошных руд обычно контролируются послонными и секущими разрывными нарушениями высоких порядков, имеют сложную линзообразную форму, а их размеры по мощности, простираанию и падению варьируют от нескольких до первых десятков метров (рис. 1). В пределах продуктивной толщи рудные линзы распределены весьма неравномерно. Положение наиболее рудонасыщенных участков (рудоносных зон) определяется границами наиболее благоприятных рудовмещающих пород — углисто- и глинисто-кремнистых сланцев, известняков, диабазов, а также нижней границей древней зоны окисления и крупными секущими и послонными разрывными нарушениями. По сложности строения месторождения относятся к третьей группе классификации ГКЗ СССР.

Предварительная разведка скважинами колонкового бурения по сети  $200 \times 100$  и  $100 \times 100$  м позволяет получить лишь самые общие представления о геологическом строении изучаемых участков рудного поля и рудоносности различных пород продуктивной толщи. В начальный период изучения месторождений

рудного поля по данным предварительной разведки предпринимались попытки геометризации балансовых запасов категории  $C_2$  в так называемые рудные залежи путем объединения кондиционных рудных интервалов по соседним скважинам в пределах одной литологической разновидности пород. Однако в процессе последующей детальной разведки и отработки было установлено, что кондиционное оруденение обычно выходит далеко за границы таких залежей, фактические коэффициенты рудоносности в их контурах нередко составляют 0,1—0,2, а сами залежи не соответствуют каким-либо реальным рудным образованиям.

В этих условиях запасы категории  $C_2$  целесообразно подсчитывать в пределах рудоносных зон, околурудных по совокупности геологических факторов с учетом результатов опробования по всем разведочным пересечениям, и введением коэффициентов рудоносности. Однако при этом следует иметь в виду, что обычно применяемые для выделения кондиционных интервалов показатели — бортовое содержание, минимальная рабочая мощность и минимальный метропроцент — не отражают требований к размерам рудных тел в плане. При подсчете запасов прерывистого оруденения в обобщенном контуре с введением коэффициента рудоносности это неизбежно приводит к включению в балансовые запасы определенного количества забалансовых по горно-технологическим условиям запасов в мелких изолированных рудных скоплениях (А. М. Быбочкин, Л. З. Быховский, Ю. Ю. Воробьев, 1990). В практике работы ГКЗ СССР такое обстоятельство интуитивно учитывается введением на запасы категории  $C_2$  понижающих коэффициентов или тем, что в экономических расчетах при проектировании горнодобывающего предприятия рекомендуется учитывать лишь определенную часть от общих подсчитанных запасов данной категории. Вопрос о том, какую часть запасов категории  $C_2$  можно уверенно отнести к балансовым обычно решается субъективно и неизменно вызывает дискуссии.

Для месторождений данного рудного поля доля балансовых запасов от общей суммы запасов категории  $C_2$ , подсчитанных в контурах рудоносных зон, оценивалась по результатам их сопоставления с запасами категории  $C_1$ , подсчитанными по данным детальной горно-буровой разведки. Сопоставление выполнено по семи месторождениям с различным геологическим строением и продуктивностью рудовмещающей толщи, расположенным в центральной и северной части рудного поля.

Для оценки доли балансовых запасов использовался коэффициент выхода как отношение запасов категории  $C_1$  к запасам категории  $C_2$ . Расчеты фактических коэффициентов выхода проведены отдельно по рудовмещающим литологическим разностям для месторождений, геолого-структурных блоков и групп эксплуатационных этажей. Оказалось, что фактические



коэффициенты выхода по литологическим разностям в пределах отдельных месторождений варьируют в широких пределах — от 0,27 до 1,68, но в подавляющем большинстве случаев меньше 1.

Исследования связей фактических коэффициентов выхода запасов металла с различными подсчетными параметрами показали, что величина коэффициентов устойчиво зависит лишь от характера распределения рудных интервалов в скважинах предварительной разведки по величине метропроцента. В общем случае коэффициент выхода тем выше, чем больше относительное число рудных интервалов с высокими метропроцентами в выборке, по которой подсчитывались запасы категории  $S_2$ . Наиболее отчетливо проявлена прямая зависимость величины коэффициента выхода от относительного числа рудных интервалов с метропроцентами в 3 раза превышающими минимальный метропроцент. Она характерна для всех рудовмещающих разностей. Вместе с тем на графике (рис. 2), отражающем эту зависимость, отчетливо выделяются две области концентрации точек, что позволяет построить две результирующие кривые — правую для руд в породах нижнего девона и диабазах и левую для оруденения в слюдисто-глинистых сланцах ордовика и известняках силура. Разброс фактических коэффициентов выхода относительно результирующих кривых в большинстве случаев, не превышает  $\pm 0,1$ .

Графики (см. рис. 2) можно использовать в качестве номограмм для определения поправочных коэффициентов при оценке балансовых запасов по результатам предварительной разведки фланговых частей рудного поля. Они позволяют не только исключить систематическую ошибку в оценке балансовых запасов категории  $S_2$ , но и определить величину возможной случайной погрешности. С помощью этих номограмм можно оценивать запасы месторождений, их частей, эксплуатационных этажей и других объемов недр. Основным условием применения этого метода является достаточное число участвующих в подсчете рудных интервалов  $N$ . Оно должно обеспечивать представительность выборки при расчете относительного числа рудных интервалов с высоким метропроцентом. Опыт применения этого метода показал, что при  $N > 30$  определенные по графикам коэффициенты выхода можно считать достоверными, при  $N = 15-30$  — относительно достоверными, при  $N < 15$  мало достоверными или сомнительными.

Во всех случаях оценивать коэффициенты выхода целесообразно от целого к частному, т. е. сначала давать оценку по месторождению в целом, а затем по его частям — участкам, рудоносным зонам и отдельным эксплуатационным этажам.

При подсчете запасов в обобщенном контуре с введением коэффициента рудоносности могут возникнуть также систематические ошибки в оценке среднего содержания полезного компонента (А. М. Быбочкин, Л. З. Быховский и др., 1990). Это обусловлено использованием минимального метропроцента при выделении кондиционных интервалов. Применение этого кондиционного показателя приводит к появлению в совокупности кондиционных интервалов обратной корреляционной зависимости между мощностью интервалов и содержанием полезного компонента (А. В. Викентьев, О. И. Гуськов, М. В. Шумилин, 1972) и искусственному за-

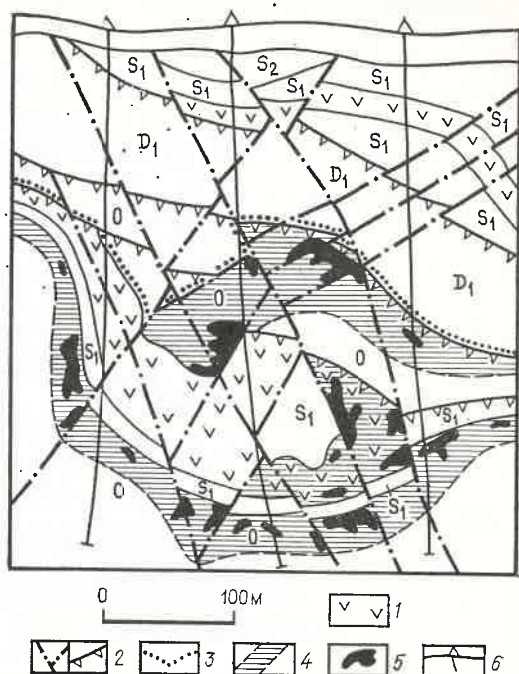


Рис. 1. Геологический разрез по рудоносному участку:

1 — диабазы; 2 — разрывные нарушения: а — крутопадающие, б — пологие; 3 — нижняя граница древней зоны окисления; 4 — рудоносные зоны; 5 — рудные скопления; 6 — скважины предварительной разведки

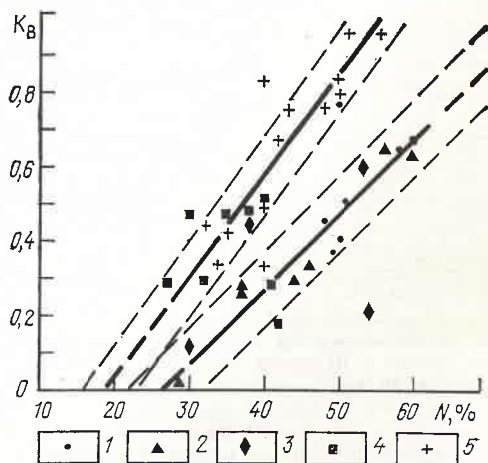


Рис. 2. Зависимость коэффициента выхода  $K_b$  балансовых запасов металла от относительного числа  $N$  рудных интервалов с метропроцентами в 3 раза превышающими минимальный:

1 — диабазы, 2 — известняки девона, 3 — углисто-глинистые сланцы силура, 4 — глинисто-кремнистые сланцы ордовика, 5 — глинисто-кремнистые сланцы ордовика



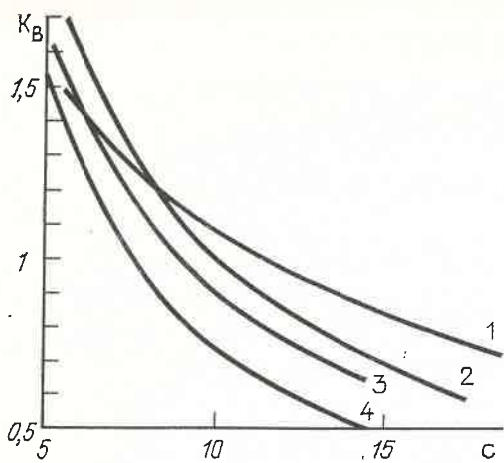


Рис. 3. Зависимость коэффициента выхода  $K_v$  содержания от содержания  $C$  металла в условиях категории  $C_2$ : 1 — диабазы, 2 — сланцы ордовика, 3 — известняки девона, 4 — сланцы силура

УДК 550.8 : 622.24

© Л. П. Кобахидзе, В. Т. Борисович, И. В. Городнянский, 1991

## О цене разведанных запасов полезных ископаемых

Л. П. КОБАХИДЗЕ, В. Т. БОРИСОВИЧ, И. В. ГОРОДНЯНСКИЙ

Проблема цены разведанных запасов полезных ископаемых в недрах месторождений обсуждается специалистами нашей страны в течение 25-ти последних лет [1—9]. Однако переход экономики страны, союзных республик, отдельных предприятий на рыночные отношения требует незамедлительного решения данного вопроса. При этом необходимо стремиться к выработке наиболее совершенной методики расчета цен не только на разведанные запасы полезных ископаемых, но и на производимую из них конечную продукцию — добытое минеральное сырье, концентраты, металлы (химические элементы), поскольку в новых экономических условиях хозяйствования предприятия геологоразведочной, горнодобывающих и перерабатывающих отраслей должны быть тесно взаимосвязаны хозяйственными отношениями.

Исследуя проблему цены разведанных запасов полезных ископаемых, большинство авторов расходятся во взглядах по многим вопросам: 1) должна ли цена устанавливаться на  $i$  т разведанных запасов полезных ископаемых, залегающих в недрах конкретных месторождений, или на все разведанные запасы этих месторождений, т. е. на месторождения в целом? 2) какой состав должна иметь цена разведанных запасов полезных ископаемых? 3) поскольку в состав цены войдет дифференциальный горный доход, по какой методике его рассчитывать? 4) полностью или частично войдет дифференциальный горный доход в цену разведанных запасов полезных ископаемых? 5) если дифференциальный горный доход будет распределяться между геологоразведочной, горнодобывающими и перерабатывающими отраслями, каким методом осуществлять это распределение?

вышению среднего содержания по участкам, где преобладают маломощные рудные интервалы. Опыт детальной разведки и отработки таких участков показывает, что значительная часть интервалов, отнесенных к кондиционным по минимальному метропроценту, соответствует мелким изолированным скоплениям, отработка которых нерентабельна. Вследствие этого среднее содержание по детально разведанным запасам категории  $C_1$  оказывается ниже, чем по запасам категории  $C_2$ . Эта тенденция усиливает известный эффект Криге, заключающийся в том, что при вычислении средних содержаний по ограниченному числу разведочных пересечений оценки в богатых блоках оказываются завышенными, а в бедных — заниженными (Э. Матерон, 1968).

Для устранения систематических и уменьшения случайных ошибок при оценке среднего содержания по запасам категории  $C_2$  можно использовать коэффициенты выхода содержания, которые также определяются по сопоставлению результатов предварительной и детальной разведки (рис. 3).

Наше мнение по перечисленным выше вопросам сводится к следующему.

Цену основного конечного продукта отрасли геология и разведка недр — разведанных запасов полезных ископаемых в недрах конкретных месторождений — целесообразно устанавливать не на все месторождения, а только на 1 т разведанного природного ресурса. Такой подход к определению цены разведанных запасов обуславливается тем, что на момент передачи месторождения в эксплуатацию невозможно оценить то количество запасов полезных ископаемых, которое залегает в недрах месторождения. К промышленному освоению, а следовательно, на баланс горного предприятия зачисляются не все запасы месторождения, а только те, которые разведаны по категориям  $A+B+C_1$  (при сложных геологических условиях  $C_2$ ). Кроме балансовых, учитывается определенное количество забалансовых запасов, предполагаемых к переводу в балансовые при более благоприятных технических и экономических условиях эксплуатации объекта. Однако учет забалансовых, а также прогнозных запасов не позволяет дать однозначного ответа о количестве всех запасов месторождения и их горно-геологических условиях залегания. Многолетняя практика разработки месторождений показывает, что за период их эксплуатации объем вовлекаемых в отработку вновь разведанных запасов полезных ископаемых увеличивается в 2—5 раз и более. В процессе эксплуатации месторождения производится доразведка его нижних горизонтов и флангов, а также близлежащих рудных участков, которая может существенно изменить представление о количестве, качестве и условиях залегания полезного ископаемого. Окончательное представление о

месторождении складывается только к концу полной выработки его ресурсов. Кроме того, в течение длительного периода эксплуатации месторождений (они эксплуатируются, как правило, 10 лет и более) под влиянием многих факторов меняются кондиции горной технологии, спрос на данное полезное ископаемое и степень его удовлетворения за счет разведанных объектов. В таких условиях цена не может определяться на все месторождение, она должна устанавливаться только на 1 т разведанных и погашенных при эксплуатации запасов и пересматриваться через определенные, довольно короткие периоды времени.

Методика расчета цены природного ресурса была предложена еще в 1968 г. В. П. Двяченко. В соответствии с ней в состав этой цены должна включаться, во-первых, себестоимость производства  $C$ , во-вторых, нормативный прибавочный продукт  $m$ , в-третьих, дифференциальный горный доход  $R_g$ . Эти три слагаемых цены образуют общественно необходимые затраты (ОНЗ) на единицу разведанного природного ресурса:  $ОНЗ = C + m + R_g$ .

В. П. Двяченко обосновал такой подход к определению цены только в общем виде, без конкретизации методов расчета себестоимости, прибавочного продукта и дифференциального горного дохода. На год раньше Н. А. Хрушевым (1967) было высказано соображение о том, что при определении ОНЗ геологоразведочной отрасли должны учитываться затраты на поиски и разведку всех месторождений и рудопроявлений данного вида полезного ископаемого за период не менее 5—10 лет.

На основании проведенных исследований нами установлено, что себестоимость разведки 1 т полезного ископаемого  $C_r$  должна отражать не индивидуальные затраты, связанные с поисками и разведкой конкретного месторождения, а среднеотраслевые издержки на поиски и разведку соответствующего вида полезного ископаемого.

Это требование обуславливается тем, что для выявления промышленных месторождений приходится затрачивать средства на поиски и разведку многих объектов, большинство из которых отбраковывается как не имеющие промышленного значения. Поскольку этот процесс вызван объективной необходимостью, а затраты на непромышленные объекты довольно велики, они должны учитываться в общественно-необходимых затратах геологоразведки [5].

Нормативный прибавочный продукт  $m_r$  рассчитывается в ОНЗ определенной долей от себестоимости геологоразведочных работ. Эта доля должна устанавливаться средним значением для всей геологоразведочной отрасли.

В составе ОНЗ геологоразведки должны учитывать дифференциальный горный доход ( $R_{gr}$ ), однако не полностью, а лишь в той мере, которая принадлежит геологоразведке; некоторые исследователи называют ее геологоразведочной рентой. Таким образом, формула цены 1 т разведанных запасов полезных ископаемых принимает вид:  $Ц_{р.з} = ОНЗ = C_r + m_r + R_{gr}$ .

Использование естественных ресурсов характеризуется значительной дифференциацией производительности труда на отдельных месторождениях, которая возникает из-за различия природных и экономико-географических условий (масштаб запасов, содержание в них полезных компонентов, минеральный и химический состав полезных ископаемых, условия их

залегания и т. д.). В результате этого при равных затратах объем и качество продукции на лучших месторождениях всегда будут выше, а себестоимость производства ниже, чем на средних и тем более на худших месторождениях.

Повышенная производительность труда при эксплуатации природных ресурсов в более благоприятных условиях приводит к возникновению в отраслях, связанных с выявлением, разведкой и эксплуатацией месторождений, избыточного прибавочного продукта, представляющего собой излишек сверх прибавочного продукта, создаваемого в обычных условиях производства. Этот излишек и называют дифференциальным горным доходом.

В общем виде дифференциальный горный доход приближенно можно рассчитать по выражению:  $R_g = (C_a + m_a) - (C_i + m_i)$ , где  $(C_a + m_a)$  и  $(C_i + m_i)$  — цена производства конечной продукции соответственно на замыкающем (худшем) и оцениваемом месторождениях.

По способу образования различают две основные формы дифференциального горного дохода — I и II. Известно, что дифференциальный горный доход I образуется вследствие повышения производительности труда при эксплуатации полезного ископаемого месторождения с наиболее благоприятными горно-геологическими и другими естественными условиями. Именно форма I дифференциального горного дохода характеризует природную ценность месторождения и ее следует включать в ОНЗ отраслей, связанных с выявлением и эксплуатацией природного ресурса.

Дифференциальный горный доход II образуется путем применения к полезному ископаемому более совершенной технологии добычи, обогащения и переработки, усиления технической вооруженности труда, применения эффективных видов материалов, реагентов, энергии и т. п., т. е. при более интенсивном и полном использовании полезного ископаемого. Дифференциальный горный доход II, как и дифференциальный горный доход I, возникает на основе различий месторождений по природным и экономико-географическим условиям. Однако в отличие от дифференциального горного дохода I условием различий в издержках производства выступают здесь не столько особенности полезного ископаемого, сколько технико-экономический уровень его эксплуатации. Эта форма дифференциального горного дохода близка к чистой прибыли предприятий и объединяется с ней. Поэтому при расчете цены конечного продукта той или иной отрасли, связанной с полезными ископаемыми, в состав ОНЗ следует включать дифференциальный горный доход только формы I.

В том случае, когда дифференциальный доход рассчитывается по выражению  $R_g = (C_a + m_a) - (C_i + m_i)$ , он представляет собой общую сумму, для которой до сих пор не найден механизм разделения на I и II форму. Между тем в состав цен на конечные продукты геологоразведки, горнодобывающей и перерабатывающей отраслей должен входить только дифференциальный горный доход I.

Для определения всей величины дифференциального горного дохода I  $R_g^I$  И. В. Горюнянским предложена формула, которая учитывает все природные особенности месторождений и которая, по нашему мнению, может быть успешно использована при расчетах на конеч-



Пример распределения дифференциального горного дохода I, равного 200 тыс. р.

| Отрасль            | Себестоимость<br>1 т полезных<br>ископаемых,<br>р. | Доля<br>себестоимости,<br>% | Сумма дохода I по отраслям    |
|--------------------|----------------------------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|
| Геологоразведочная | 0,4                                                | 8,7                         | $200/100 \times 8,6 = 17,4$   |
| Горная             | 3                                                  | 65,2                        | $200/100 \times 65,2 = 130,4$ |
| Обогащение         | 0,8                                                | 17,4                        | $200/100 \times 17,4 = 34,8$  |
| Металлургия        | 0,4                                                | 8,7                         | $200/100 \times 8,7 = 17,4$   |
| Итого              | 4,6                                                | 100                         | 200                           |

ную продукцию геологоразведчиков, горняков, обогатителей и металлургов (химиков)

$$R_g^I = (R_g^I \text{ кол. } i + R_g^I \text{ кач. } i + R_g^I \text{ т. } i + \\ + R_g^I \text{ п. } i + R_g^I \text{ з. } i + \dots + \\ + R_g^I \text{ н. } i - 1 + R_g^I \text{ н.}),$$

где —  $R_g^I$  кол.  $i$ ,  $R_g^I$  кач.  $i$ ,  $R_g^I$  т.  $i$ ,  $R_g^I$  п.  $i$ ,  $R_g^I$  з.  $i$  ... — дифференциальный доход I, возникающий соответственно количеству, качеству, технологическим особенностям полезного ископаемого, промышленному и социальному освоению региона, степени экологической безопасности освоения месторождений и т. д.

И. В. Городнянским разработана методика расчета влияния каждого из учтенного в формуле природного фактора на величину дифференциального горного дохода I [3].

На первый взгляд формула И. В. Городнянского кажется громоздкой, трудновоспринимаемой. Однако при использовании электронно-вычислительной техники расчеты  $R_g^I$  производятся легко и быстро в каждый момент времени.

Определение общего значения  $R_g^I$  в любом блоке месторождения еще не дает основания для решения цены конечного продукта каждой из вышеуказанных смежных отраслей. Для этой цели общую сумму  $R_g^I$  необходимо разделить между этими смежными производствами — геологоразведочной отраслью горнодобывающими, обогатительными и металлургическими предприятиями.

Наше предложение по этому поводу сводится к следующему. Поскольку источником создания избыточного прибавочного продукта служит прибавочный труд людей, прилагаемый к данному природному ресурсу с использованием материальных затрат, целесообразно дифференциальный горный доход I распределять между геологоразведочными, горными, обогатительными и металлургическими предприятиями пропорционально затраченному или живому и овеществленному труду, т.е. себестоимости (таблица).

Обозначая долю себестоимости в общей ее сумме, отнесенной к 1 т полезного ископаемого, через соответствующие коэффициенты  $K_r$ ,  $K_g$ ,  $K_o$ ,  $K_m$  расчеты можно производить по формуле  $(R_g^I/100)K_r$ , д. о. м.

Таким образом, цена должна устанавливаться не на месторождение, а только лишь на 1 т разведанных и погашенных при эксплуатации запасов полезных ископаемых по формуле:  $\text{Ц.р.} = \text{ОНЗ.р.} = C + m + R_g^I r$ , где: C — себестои-

мость геологоразведочных работ (за 5—10 лет), отнесенная к 1 т запасов полезного ископаемого, р.;  $m$  — нормативный прибавочный продукт, создаваемый трудом геологоразведчиков, отнесенный к той же 1 т разведанных запасов, р.;  $R_g^I r$  — часть дифференциального горного дохода формы I, получаемая при эксплуатации 1 т полезного ископаемого и распределяемая геологоразведочной службе.

Результаты проведенных нами исследований по нескольким видам полезных ископаемых показали, что удельный вес дифференциального горного дохода I формы в цене разведанных запасов полезных ископаемых значительно превышает сумму себестоимости и нормативного прибавочного продукта; на некоторых месторождениях с хорошими природными условиями это превышение многократно.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агошков И. М., Перваго В. Н., Хрущев Н. А. Цена разведанных запасов полезных ископаемых//Разведка и охрана недр. 1974. № 5. С. 25—29.
2. Агошков И. М., Гольдман Е. Л. Цена разведанных запасов месторождений полезных ископаемых.— М.: ИПКОН АН СССР, 1990.
3. Городнянский И. В. Горная рента в механизме равных экономических возможностей// Горный журнал. 1988. № 10. С. 27—31.
4. Каганович С. Я. Методические основы определения расчетных цен на разведанные запасы//Разведка и охрана недр. 1974. № 5. С. 32—36.
5. Каждан А. Б., Кобахидзе Л. П. Геолого-экономическая оценка месторождений полезных ископаемых. М.: Недра, 1985. С. 84—99.
6. Кобахидзе Л. П. Особенности формирования цен на разведанные запасы полезных ископаемых и продукты их переработки//Советская геология. 1982. № 11. С. 31—35.
7. Сечевица А. М., Заверткин В. Л. Цена разведанных запасов полезных ископаемых в недрах и хозяйственная эффективность геологоразведочных работ//Геология и разведка. 1990. № 3. С. 140—142.
8. Соколовский Ю. А. Экономика разведки и оценки недр.— М.: Недра, 1989. С. 37—57.
9. Судо М. М. О форме, экономическом содержании и цене конечного продукта//Советская геология. 1989. № 7. С. 101—105.



## Экономика топливно-энергетических ресурсов

В. В. АЛЕКСЕЕВ, С. И. НАУГОЛЬНОВ, С. А. СЕЛЕЗНЕВ

Ежегодное увеличение объемов геологоразведочных работ осуществляется за счет механизации и автоматизации производственных процессов, оснащения отрасли новой, более совершенной техникой. Одновременно с этим увеличивается и энергоемкость работ. Поэтому все более возрастает актуальность проблемы экономии топливно-энергетических ресурсов (ТЭР).

Основными направлениями решения этой проблемы являются: внедрение в производство технологий ведения работ, позволяющих снизить энергозатраты на единицу продукции; увеличение общего КПД энергоустановок за счет улучшения технического состояния оборудования и использования вторичных энергоресурсов; создание четкой, научно обоснованной системы нормирования и учета ТЭР.

О степени рационального использования энергоресурсов наиболее объективно можно судить при сравнении фактических затрат электроэнергии на единицу продукции с научно обоснованными нормами, установленными для данного вида работ, применяемой техники и технологии их ведения.

Геологоразведочная отрасль не имеет научно обоснованных, объективно необходимых норм расхода ТЭР и пользуется нормами, разработанными на основании отчетных данных за предыдущий период работ. Поэтому в течение ряда лет на кафедре механизации и автоматизации горных и геологоразведочных работ МГРИ проводились исследования по энергоемкости технологических процессов горных работ и разведочного бурения в области энергопотребления и нормирования расхода топлива и электроэнергии. Проведенные в производственных условиях эксперименты позволили выявить ряд факторов, непосредственно и опосредованно влияющих на энергопотребление горно-буровых машин, механизмов и комплексов.

Изучение этих факторов методами математической статистики и сопоставления их с результатами и выводами других исследователей (работы СКБ «Геотехника», ЦНИГРИ, ВИЭМСа и др.) позволило выделить важнейшие из них. Эти факторы стали основой энергетической модели того или иного технологического процесса (бурение скважин, проходка подземных горных выработок и т. д.). Проведенные исследования позволили установить достоверность и адекватность разработанных моделей (средние отклонения от фактических энергозатрат 5—7 %), уточнить некоторые важные показатели, а отдельные — установить заново.

Среди показателей, оказывающих непосредственное влияние на энергопотребление в том или ином технологическом процессе, были выделены планово-нормативные (действующие временные нормы на отдельные операции) горно-геологические (условия ведения работ) и технико-технологические показатели (параметры применяемого оборудования и технологические режимы работы).

В основу разработки норм расхода электроэнергии положены математические модели. Определение удельных затрат по этим моделям производилось по удельным затратам при фик-

сированных условиях ведения производственного процесса, который разбивался на отдельные части (по условиям однородности указанных выше показателей), средневзвешенные удельные затраты вычислялись по затратам при фиксированных условиях.

По средневзвешенным удельным затратам энергии определялись технологические и общепроизводственные нормы ее расхода. Все это дало возможность планировать нормы расхода электроэнергии и топлива на предстоящий период в соответствии с условиями ведения работ, а также проводить анализ энергозатрат на отдельные технологические процессы, и, сравнивая расчетные и фактические затраты, находить источники потерь энергии, устанавливая основные направления ее экономии.

Задача нормирования расхода топлива решалась с учетом разнообразия географических, климатических условий ведения работ, а также характера потребления электроэнергии различными технологическими процессами. Так, была выяснена зависимость между расходом топлива двигателем внутреннего сгорания (ДВС) и режимом потребления мощности отдельными потребителями (от постоянной нагрузки на вентиляторах и компрессорах до резкопеременной на буровых станках). Это влияет на фактические удельные затраты топлива на единицу выработанной электроэнергии или на единицу объема работ. Разработана методика нормирования расхода топлива на отдельный агрегат (индивидуальная норма), на подразделение и организацию любого уровня планирования (средневзвешенная норма организации).

На основе моделей потребления электроэнергии и топлива были созданы методики их нормирования, прошедшие апробацию в подразделениях и организациях Мингео СССР. Положительные отзывы производственных организаций позволили опубликовать эти методические рекомендации с целью использования в практике нормирования расхода топлива и электроэнергии на буровых, горноразведочных работах.

Однако фактором, сдерживающим внедрение этих методик в практику нормирования, может стать большой объем необходимых вычислений для определения удельных затрат энергии и значительное число входных параметров. Каждая из моделей учитывает по 40—50 различных факторов, что обеспечивает высокую подтвержденность на практике. Однако например при разведке скважины на отдельные интервалы для расчета удельных затрат энергии в одинаковых условиях приходится проводить большой объем однотипных вычислений. Поэтому методические рекомендации содержат большое количество справочного материала и могут дополняться разработанными программами для ЭВМ, которые позволяют автоматизировать весь процесс расчета, от подготовки исходной информации (заполняются выдаваемые ЭВМ таблицы) до получения конечного результата — нормы расхода топлива и электроэнергии.

Разработанные программы для ЭВМ СМ-1800 дают возможность рассчитывать необходимые топливно-энергетические параметры, производить поэлементный анализ затрат энергии. Такими программами могут пользоваться и специалисты в области вычислительной техники. Программы работают в интерактивном ре-

жиме и полностью визуализируют как ввод исходных данных, так и вывод промежуточных результатов. Впрочем, блок-схемы важнейших из них приведены в соответствующих методических рекомендациях.

Используя данную методику, можно создать собственные программы для других ЭВМ.

## Инженерная геология

УДК 624.131.1

© Г. К. Бондарик, В. Л. Невечеря,  
В. В. Пендин

### Прогнозирование состояния природно-технических систем криолитозоны Западной Сибири

Г. К. БОНДАРИК, В. Л. НЕВЕЧЕРЯ, В. В. ПЕНДИН

В ходе освоения крупных месторождений нефти и газа в криолитозоне Западной Сибири в хозяйственное пользование вовлекаются крупные территории, в пределах которых сооружаются комплексы для добычи, очистки и транспорта газа. Эти комплексы образуют сложно построенную региональную природно-техническую систему (ПТС), состоящую из сети незаконномерно расположенных по площади локальных ПТС, представленных газовыми промыслами, головными и линейными компрессорными станциями (Г. К. Бондарик, 1981)\*. Специфической особенностью этой региональной ПТС является то, что локальные ПТС оказывают не только косвенное влияние на природные условия и друг на друга, но и взаимосвязаны системой коридоров, в которых проложены газопроводы, автомобильные дороги, вдоль-трассовые ЛЭП, а в пределах месторождений и водоводы.

Рассматриваемые ПТС сооружаются в условиях севера Западной Сибири; характерными особенностями их являются: широкое распространение пылевато-глинистых пучинистых обводненных грунтов, глубокое сезонное промерзание—оттаивание, частое чередование островов талых и многолетнемерзлых грунтов, практически повсеместное заболачивание.

В процессе техногенных взаимодействий в масштабе всей ПТС происходит изменение инженерно-геологических условий, нередко превосходящее изменения, вызванные влиянием отдельных сооружений. Искусственные взаимодействия приводят к развитию криогенных процессов: солифлюкции, термокарста, термоэрозии, сезонного и многолетнего пучения, заболачивания. Возможность возникновения и интенсивность процессов определяется устойчивостью инженерно-геологических условий к искусственным взаимодействиям. Под устойчивостью некоторой приповерхностной области литосферы, рассматриваемой в качестве литосистемы (Г. К. Бондарик, 1981) понимается относительная стабильность ее состояния при искусственных взаимодействиях\*\*. По устойчивости можно выделить три типа литосистем: устойчивые, относительно устойчивые и неустойчивые. Если система устойчива, то интенсивность процессов практически не изменяется при освоении территории. В относительно неустойчивой системе интенсивность процессов уменьшается во времени, места их проявления локализуются и система приходит в равновесное состояние\*\*\*. Неустойчивая система характеризуется увеличением набора и активизацией процессов во времени, которые часто, практически полностью, разрушают ландшафты осваиваемой территории (биогеоценозы), катастрофически изменяя экологическую обстановку и обуславливая широкое развитие инженерно-геологических процессов. Это обстоятельство делает остро необходи-

\* Бондарик Г. К. Общая теория инженерной (физической) геологии. — М.: Недра, 1981.

\*\* Нахождение изображающей точки внутри области допустимых состояний.

\*\*\* Координаты системы находятся в пределах  $R \pm \sigma_R$ , где  $R$  — независимая переменная.

мой разработку методики оценки будущих состояний литосистемы в условиях искусственного взаимодействия.

Прогнозная оценка устойчивости инженерно-геологических условий необходима для:

разработки рекомендаций по управлению состоянием региональных, локальных и элементарных природно-технических систем (ПТС);

обоснования пространственно-временной структуры мониторинга ПТС; инженерно-геологического обоснования разработки природоохранных мероприятий.

Прогнозную оценку устойчивости литосистем и их инженерно-геологических условий при искусственных взаимодействиях предлагается осуществлять поэтапно. На первом этапе разрабатывается региональный инженерно-геологический прогноз на основе анализа данных о состоянии литосистемы до и после освоения территории. Оценка инженерно-геологических условий техногенно нарушенных территорий проводится в соответствии с методикой, согласно которой устойчивость территории по отношению к техногенным воздействиям может быть оценена по степени изменения координат литосистемы и, в первую очередь, таких наиболее изменчивых, как температура многолетнемерзлых пород, мощность и влажность грунтов слоя сезонного оттаивания—промерзания.

Для получения информации о степени изменения этих компонентов и инженерно-геологических условий в целом при оценке устойчивости Уренгояского и Медвежьего месторождений природного газа разработана и апробирована методика изучения техногенно нарушенных территорий, основная особенность которой состоит в том, что исследования проводятся в рамках трех уровней с повышением детальности работ на каждом последующем уровне. В процессе исследований широко используются космо- и аэрофотоматериалы, данные режимных наблюдений и материалов повторных исследований.

Прежде всего проводится дешифрирование космоаэрофотоматериалов и составляется карта природных комплексов освоенной территории. Особо показательные материалы по динамике изменения инженерно-геологических условий получаются, если выполнены

аэрокосмоснимки до начала освоения изучаемой территории, в процессе ее эксплуатации и на момент исследований. По материалам космосъемки среднего уровня генерализации составляется карта природных комплексов, позволяющая оценить типы и виды техногенных нарушений. На основе этой карты выбираются ключевые участки (КУ) следующего уровня исследований. Работа на КУ выполняется в масштабе 1:25 000 с использованием АФС масштабов 1:10 000—1:25 000. По возможности КУ располагаются попарно, соответственно с одинаковыми, но нарушенными и ненарушенными условиями с тем, чтобы выделить изменения, обусловленные естественным развитием природной обстановки. Съёмка выполняется на ландшафтной основе. Задачи ее следующие:

оценка изменений компонентов инженерно-геологических условий под влиянием искусственных взаимодействий;

получение данных, необходимых для сравнительной оценки степени изменения компонентов инженерно-геологических условий и оценки проявлений инженерно-геологических процессов.

Исследования проводятся в целом в соответствии с методикой средне-масштабной инженерно-геокриологической съёмки, но виды и объемы работ могут изменяться весьма существенно.

В процессе проведения съёмки установлено, что наиболее чувствительные компоненты инженерно-геокриологической обстановки достаточно быстро изменяются не только под влиянием искусственных взаимодействий, но и в ходе естественного развития природных условий. Для того, чтобы выделить эти изменения, выполняется съёмка в пределах участков, которые в процессе освоения территории не подвергались техногенным взаимодействиям.

Особо большой объем информации получаем, если перед освоением была проведена инженерно-геологическая съёмка этой территории. Тогда КУ следует располагать в пределах КУ первоначальной съёмки. На каждом КУ основные объемы работ приурочены к пяти профилям, расположенным параллельно друг другу на расстоянии 1 км, причем профили располагают так, чтобы они пересекали нарушенные и ненарушенные части основных



типов природных комплексов (в случае КУ с техногенными нарушениями) и были максимально приближены к профилям первоначальной съемки. В целом получаем данные в количестве, достаточном для статистической обработки и количественной оценки изменений. Особое внимание уделяется изучению динамики проявления криогенных процессов, обусловленных нарушением естественных условий. Оценивается интенсивность и характер их проявления на участках с разными типами и видами техногенных нарушений.

По результатам съемки составляются ландшафтная и инженерно-геологическая карта и разрезы. Ландшафтная карта выполняется по общепринятой методике. Если на изучаемую территорию были составлены инженерно-геологические карты до освоения, то на карту, составляемую по материалам повторной съемки можно нанести только изменяющиеся компоненты инженерно-геологических условий.

После неформального анализа этих карт и всего полученного материала выполняются картографические модели полей компонентов инженерно-геологических условий для КУ, сохранивших естественные условия и для КУ с различными видами техногенных нарушений. При повторной съемке модели полей компонентов составляются также по материалам первоначальной съемки. При большой площади нарушений по материалам съемки на КУ составляется также карта интенсивности восстановления растительного покрова в масштабе 1 : 100 000, представляющая значительный интерес при разработке природоохранных мероприятий.

Для оценки степени изменения инженерно-геологических условий при том или ином виде взаимодействий выполняются детальные инженерно-геологические исследования отдельных площадок с использованием АФС масштабов 1 : 2000—1 : 5000 (третий уровень исследований). В качестве исходных материалов для детальной оценки условий на этих площадках до начала освоения используются материалы изысканий и последующих обследований, а также данные, полученные на ненарушенных участках этого типа природных комплексов.

Основной объем работ приурочен к инженерно-геологическим профилям, которые задаются по главным направлениям изменчивости, обусловленной видами и формами техногенных взаимодействий. Число точек наблюдений и скважин должно быть достаточным для статистической обработки материала. По материалам работ составляются ландшафтная и инженерно-геологическая карты и инженерно-геологические разрезы. Количественная оценка степени изменения ИГУ выполняется либо по уже рассмотренной методике, либо с использованием модели случайной величины (критерии Стьюдента и Фишера, дискриминантный анализ).

Корректировка материалов, получаемых при всех трех уровнях исследований, выполняется с использованием данных режимных наблюдений.

Региональный прогноз осуществляется на основе сравнительного анализа картографических и математических моделей полей геологических параметров, отражающих компоненты инженерно-геологических условий, изменяющиеся с большой скоростью. К ним относятся: расчлененность рельефа, термовлажностный режим грунтов, глубина залегания первого от поверхности водоносного горизонта, физико-механические свойства грунтов и др. В ходе анализа моделей полей следует получить ответ на вопрос о том как изменилась структура полей одних и тех же параметров под влиянием искусственных взаимодействий. Для решения этого вопроса необходимо построить карты разности и рассчитать парные коэффициенты корреляции между полиномиальными коэффициентами полиномов, аппроксимирующих сравниваемые поля. Региональный прогноз заключается в выявлении тенденции инженерно-геологических условий на основе анализа функций координат литосистемы по времени.

На втором этапе проводится прогнозное инженерно-геологическое районирование территории, в процессе которого выделяются участки квазиродные по характеру взаимодействия сооружений с приповерхностной частью литосферы. Процедура прогнозного инженерно-геологического районирования заключается в следующем:

выбор целевого предиката;

построение содержательной концептуальной модели;

количественное выражение компонентов инженерно-геологических условий;

построение и геологическая интерпретация моделей полей показателей компонентов инженерно-геологических условий;

расчет весовых коэффициентов;

нормирование количественных характеристик компонентов инженерно-геологических условий;

расчет интегрального показателя;

построение и геологическая интерпретация моделей поля интегрального показателя;

выбор граничных значений интегрального показателя;

выделение участков квазиоднородных в отношении характера взаимодействия сооружений с приповерхностной областью литосферы.

В качестве одного из целевых предикатов используется мера изменения состояния сооружений (от проектного) в процессе его эксплуатации, обозначаемая термином стабильность  $S$ .

Показатель стабильности варьирует в пределах от 1 до 0. Применительно к элементарной ПТС значение  $S=1$  соответствует полному отсутствию деформации сооружения, превышающих предусмотренные проектом, а при  $S=0$  сооружение выходит из строя в результате развития инженерно-геологических процессов.

Стабильность, оцениваемая по подсистеме «сооружение» характеризует состояние ПТС в целом. В то же время реальной может быть ситуация, когда величина  $S$  оказывается достаточно высокой и даже равной единице (за счет запаса прочности подсистемы «сооружение»), а подсистема «сфера взаимодействия» существенно изменяется под влиянием инженерно-геологических процессов. Таким образом, с экологической точки зрения стабильность ПТС оказывается не всегда эффективным средством оценки результатов деятельности человека.

Более чувствительная мера, относящаяся непосредственно к литосфере — скорость распространения наиболее опасного инженерно-геологического процесса (набора процессов) в пределах некоторой территории. Пространственно-временной градиент скорости

распространения процессов рассчитывается по следующей формуле:

$$\Delta P_{\xi i} = P_{\xi i t_{y+1}} - P_{\xi i t_y},$$

где площадь проявления инженерно-геологического процесса (в  $\text{км}^2/\text{км}^2$ ):  $P_{\xi i t_{y+1}}$  — на период времени  $t_{y+1}$ ;  $P_{\xi i t_y}$  — на период времени  $t_y$ .

Содержательная концептуальная модель ПТС представляет собой по сути дела качественный прогноз взаимодействия проектируемого сооружения с литосферой и включает набор компонентов, оказывающий влияние на развитие прогнозируемых инженерно-геологических процессов. Соответствие содержательной концептуальной модели натурным данным контролируется множественным коэффициентом корреляции связи количественных характеристик компонентов инженерно-геологических условий и целевого предиката. Практически за пороговое значение множественного коэффициента корреляции принимают 0,71, так как при этом поглощается более 50 % изменчивости целевого предиката.

Количественное выражение компонентов инженерно-геологических условий заключается в подборе геологических параметров, определяющих процесс взаимодействия сооружений с литосферой. При этом используются традиционные меры, такие как уклон местности, мощность различных слоев горных пород, показатели их свойств и др. В случае необходимости разрабатываются новые характеристики.

Изменчивость всех перечисленных показателей описывается математическими моделями — полями геологических параметров, геологическая интерпретация которых позволяет установить основные закономерности пространственной изменчивости компонентов инженерно-геологических условий.

С целью определения весовых коэффициентов необходимо провести специальное аналитическое исследование, направленное на выявление доли участия отдельных компонентов в общей прогнозной оценке. Такое исследование проводится на основе использования множественного корреляционного и регрессионного анализов связи показателей, характеризующих компоненты инженерно-геологических условий и целевого предиката

$$Y_y = f(X_1 X_2, \dots, X, \dots, X_p),$$

где  $Y$  — целевой предикат;  $X_1, X_2, \dots$ ,

$X, \dots, X_p$  — комплексные характеристики компонентов инженерно-геологических условий.

Материалом для получения этой зависимости служат данные инженерно-геологического обследования уже построенных и эксплуатируемых объектов, расположенных в пределах исследуемого района или в районах с аналогичными инженерно-геологическими условиями. Эти данные представляют собой как бы обучающую выборку, на основе которой проводится оценка стабильности ПТС. Весовые коэффициенты определяются по формуле

$$g_i = \frac{|\beta_i r_i|}{\sum_{i=1}^p |\beta_i r_i|}; \quad \sum_{i=1}^p g_i = 1,$$

где  $g_i$  — весовой коэффициент;  $\beta_i$  — стандартизированный коэффициент множественной регрессии;  $r_{iy}$  — парные коэффициенты корреляции между целевым предикатом и количественными характеристиками компонентов инженерно-геологических условий,  $p$  — число компонентов.

Нормирование количественных характеристик компонентов инженерно-геологических условий производится для перевода их в относительные величины, позволяющие производить дальнейшие расчеты вне зависимости от единиц измерения. Нормирование заключается в отнесении частных значений нормируемых переменных к максимально возможному в пределах рассматриваемой территории (региональный максимум):

$$R_i^n = R_i / R_{\max},$$

где  $R_i$  — частное значение нормируемого показателя;  $R_{\max}$  — региональный максимум этого показателя.

Преимуществом данного способа нормирования является то, что все нормированные значения показателей заключены в интервале от 0 до 1. При этом ноль характеризует наиболее благоприятное значение компонента, а 1 — наиболее неблагоприятное.

Интегральный показатель инженерно-геологических условий рассчитывается по формуле:

$$Y_2 = \sum_{i=1}^n g_i R_i^n,$$

где  $g_i$  — вес  $i$ -го компонента в интегральной оценке;  $R_i^n$  — нормированная

оценка  $i$ -го показателя;  $n$  — число рассматриваемых компонентов.

Модель поля интегрального показателя инженерно-геологических условий строится в масштабе 1 : 25 000 по стандартной методике. Проведение прогнозного инженерно-геологического районирования осуществляется на основе анализа структуры поля интегрального показателя и сводится, по существу, к определению граничных значений интегрального показателя. Установление граничных значений проводится на основе анализа графика взаимосвязи интегрального показателя и целевого предиката. Значения, отвечающие классификационным интервалам целевого предиката принимаются граничными. Участки, выделяемые в результате прогнозного районирования, квазигомогенные в отношении характера взаимодействия сооружений с приповерхностной частью литосферы. Каждый тип таких участков должен стать объектом регионального и локального литомониторинга. Число мест расположения площадок режимной сети необходимо определять на основе материалов районирования по соотношению длины участков трассы с различным типом взаимодействия ПТС «Газопровод—приповерхностная часть литосферы». При этом основное внимание должно уделяться участкам с наибольшей величиной интегрального показателя, т.е. с наиболее неблагоприятными условиями.

Карта районирования лежит в основе прогнозной оценки устойчивости литосистемы и ее инженерно-геологических условий в пределах локальных ПТС, выполняемой на следующем этапе методом инженерно-геологических аналогий.

На третьем этапе производится локальный прогноз устойчивости, необходимый для оптимального проектирования инженерных сооружений, их строительства и эксплуатации, а также с целью установления изменения во времени следующих параметров: глубины протаивания многолетнемерзлых пород, температуры многолетнемерзлых грунтов, величины просадки основания сооружений, притока воды, величины пучения и интенсивности развития инженерно-геологических процессов.

Локальный прогноз инженерно-геологических условий осуществляется



путем распространения данных, по имеющимся аналогам, на прогнозируемый объект. Основой для прогноза служит прогнозное инженерно-геологическое районирование и типизация техногенных воздействий. Переносу подлежат данные режимных наблюдений за температурой грунтов в основании сооружений, динамикой протаивания—промерзания, развитием инженерно-геологических процессов, изменением уровня грунтовых вод и др. Локальный прогноз имеет вероятностный характер. Прогнозируется математическое ожидание соответствующего параметра и его дисперсия. В случае отсутствия прямых аналогов можно использовать косвенные данные, полученные в процессе изучения опыта эксплуатации аналогичных сооружений в близких инженерно-геологических условиях.

Основной метод локального прогноза при отсутствии аналогов — расчетный, с помощью которого можно по-

лучить, например, глубину протаивания грунтов под теплым газопроводом, водоприток поверхностных и подземных вод в траншею и их тепловое воздействие на грунты, осадку грунтов при оттаивании и др.

Рассмотренная методика апробирована при прогнозной оценке устойчивости территории двух крупных осваиваемых месторождений природного газа, расположенных в криолитозоне Западной Сибири (Медвежье и Уренгойское). На основе оценки разработаны принципы размещения системы пунктов получения информации при создании литомониторинга месторождения Медвежье. Подготовлены рекомендации по обеспечению устойчивости грунтовых оснований сооружений газовых промыслов и газопроводов—коллекторов этого месторождения. Составлено инженерно-геологическое обоснование природоохранных мероприятий южной части месторождения Медвежье.

## Дискуссии, обсуждения

УДК 550.845

© А. В. Панкратов, В. М. Шве́ц, 1991

### Гидрогеохимический аспект защиты от парникового эффекта

А. В. ПАНКРАТОВ, В. М. ШВЕЦ

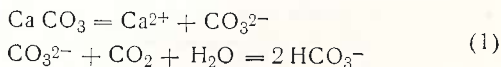
В настоящее время все более осознается катастрофическая опасность для человечества парникового эффекта. В 1989 г. выброс в атмосферу газов, создающих парниковый эффект, достиг 5,8 млрд т. Усиливающее друг друга разрушение окружающей среды и упадок экономики могут привести к тому, что климатическая катастрофа разразится на Земле уже в начале 21-го века.

Причина парникового эффекта, как известно, состоит в поглощении теплового излучения Земли углекислым газом и метаном. Накопление углекислого газа в атмосфере связано с его техногенным происхождением:  $\text{CO}_2$  — это продукт сгорания ископаемого топлива, выбрасываемый тепловыми электростанциями, транспортом и промышленными предприятиями. Метан, по-видимому, в основном продукт анаэробного бактериального разложения углеводородов. В качестве мер борьбы с выбросами  $\text{CO}_2$  ученые многих стран рассматривают идеи, связанные главным образом с заменой тепловых электростанций ядерными источниками энергии. Кроме того, предлагаются различные энергосберегающие мероприятия, которые позволили бы сократить мощность тепловых электростанций. Идея замены тепловых электростанций атомными подвергается серьезной критике, поэтому ТЭС еще долгие годы будут не-

альтернативны. Выдвигаются различные трудно реализуемые проекты, например, засыпка в океан в Антарктиде 1 млн т железных опилок для размножения планктона и др.

Мы предлагаем новый гидрогеологический подход к проблеме защиты Земли от парникового эффекта. Он основан на поглощении  $\text{CO}_2$ , выбрасываемого в атмосферу при сгорании ископаемого топлива, и его последующей утилизации в земных недрах.

Широко известно, что  $\text{CO}_2$  хорошо поглощается растениями, водной средой и др., а углекислота расходуется при углекислотном выщелачивании карбонатных пород по реакции



Химическое равновесие в этой реакции (карбонаты-бикарбонаты —  $\text{CO}_2$ ) зависит от количества  $\text{CO}_2$ , поступающего в раствор, и определяет миграцию карбонатных анионов в порах и трещинах пород, что в итоге может привести к карстообразованию, вторичному минералообразованию, формированию месторождений тревтина. С этим природным равновесием связано возникновение сталактитов и сталагмитов в карстовых пещерах и т. д.

В литературе описаны различные химические способы поглощения углекислого газа щелочными растворами, холодным ацетоном, аминами. Поглощение  $\text{CO}_2$  из продуктов сгорания топлива, в т. ч. из выбросов тепловых электростанций технически реализовано (Oil and Gas Journal, 1986, N 39, p. 61). В качестве поглотителей применяют амины триэтиламин, диэтиламин и др. Существовало, что при этом, кроме  $\text{CO}_2$ , могут поглощаться и другие кислотные газы, создающие кислотные дожди. Таким образом, принципиально вопрос поглощения  $\text{CO}_2$  с химической точки зрения решается просто. Рассмотрим его с позиций борьбы с парниковым эффектом.

Тепловая электростанция мощностью 1000 Мвт выбрасывает в год около 7 млн т  $\text{CO}_2$  или около 20 тыс. т/сут. Маломощная ТЭС (например, районная ТЭС г. Москвы) выбрасывает около 500 т/сут  $\text{CO}_2$ . Чтобы поглотить это количество газа, необходимо соизмеримое количество адсорбентов, что практически нереально. Однако в этой проблеме есть выход — регенерация поглотителя. Сложнее стоит вопрос о судьбе выделенных тонн углекислого газа. Мы думаем, что с нерешенностью этой проблемы и связана причина того, что очевидная и простая идея поглощения  $\text{CO}_2$ , выделяемого при сгорании топлива, не рассматривается. Безусловно, лучшим выходом было бы практическое использование  $\text{CO}_2$ , т. е. его применение в народном хозяйстве. Углекислый газ как массовое сырье применяется в химической промышленности для производства соды, поташа, мочевины, в доменном производстве, им заполняются огнетушители, используется в виде сухой углекислоты, применяется в кондитерском деле и др. Однако по приближенным расчетам количество используемого  $\text{CO}_2$  составляет десятую часть его выбросов.

Что же делать с основной массой выбрасываемого в атмосферу углекислого газа? В ответе на этот вопрос и состоит смысл нашей идеи, заключающейся в предложении закачивать углекислый газ в глубокие водоносные горизонты.

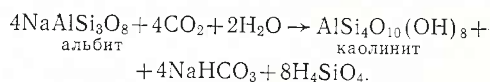
Закачка природных газов через скважины в водоносные горизонты — прием, описанный в литературе. Так, применяется закачка углекислоты в горизонты, содержащие углекислые минеральные воды с целью поддержания высокой концентрации растворенной в воде  $\text{CO}_2$ . Запатентованы способы закачки  $\text{CO}_2$  в нефтеносные пласты (Oil and Gas Journal, 1986, N 1, p. 48). Этот прием используется для поддержания пластового давления с целью улучшения условий добычи нефти. При этом  $\text{CO}_2$  добывается из продуктов сгорания тепловых электростанций — транспортируется по многокилометровым трубопроводам на нефтепромыслы. После добычи нефти углекислый газ выделяется в атмосферу. Широко известны подземные хранилища горючего газа, способность вмещать сотни миллиардов метров кубических газа и более. Например, в Канаде ежегодно закачивается до 2,5 млрд  $\text{м}^3$  газа, в США предельные объемы хранения газа составляют более 200 млрд  $\text{м}^3$ .

Однако при закачке  $\text{CO}_2$  в глубокие горизонты следует учитывать не только непосредственное его растворение в воде (имеются данные о насыщенности подземных вод  $\text{CO}_2$  до 10—20 л/л), но и химическое взаимодействие с породой (углекислотное выщелачивание), а также возможность вытеснения воды из порового про-

странства с образованием искусственной залежи.

Процессы, возникающие при закачке  $\text{CO}_2$ , качественно известны.

В неравновесных в целом гидрогеохимических системах вода—порода—газ существуют частичные или локальные равновесия. Закачка  $\text{CO}_2$  в систему приведет к нарушению таких равновесий. В зависимости от конкретного состава системы возникнут различные ситуации, из которых можно рассмотреть следующие: 1) при растворении  $\text{CO}_2$  в подземных водах происходит изменение их химического состава таким образом, что это вызывает конгруэнтное растворение горных пород, например, известняков по реакции (1). Растворение углекислого газа заканчивается (при постоянном давлении  $\text{CO}_2$ ) тогда, когда установится новое равновесие между породами и подземными водами иного, чем до растворения состава; 2) при растворении  $\text{CO}_2$  в подземных водах происходит инконгруэнтное растворение горных пород, в результате которого образуются новые вещества. Некоторые из них растворяются в воде, а другие остаются в породе, изменяя ее литологический и минеральный составы. Примером может служить образование кор выветривания при растворении пород, содержащих полевые шпаты:



Таким образом, в обоих случаях, процесс заканчивается установлением нового термодинамического равновесия в изменившейся геологической системе.

Количество  $\text{CO}_2$ , которое пойдет на переход от равновесного состояния в первоначальной системе к равновесному состоянию в новой геологической системе (при постоянном давлении  $\text{CO}_2$ ), в основном и будет определять емкость водоносных горизонтов по отношению к  $\text{CO}_2$ . Нахождение этой величины должно стать предметом физико-химического моделирования применительно к конкретным гидрогеохимическим системам. Очевидно, при этом нельзя пренебрегать методами физико-химической гидродинамики и кинетики — областью физической химии, мало разработанной применительно к гидрогеохимическим системам.

Мы предлагаем закачивать  $\text{CO}_2$  в глубокие горизонтально и пологозалегающие закрытые гидрогеологические структуры, обычно сложенные песчано-алевритовыми и карбонатными породами. Эти структуры не должны быть связаны с зоной активного водообмена и земной поверхностью и не должны содержать ценные в народнохозяйственном отношении пресные, минеральные и промышленные воды. Таким образом, с экологической и геолого-экономической точек зрения предлагаемый способ допустим.

В то же время совершенно очевидно, что реализация способа требует предварительного физико-химического изучения процессов взаимодействия  $\text{CO}_2$  с породами и водами глубоких горизонтов и последующего создания соответствующей службы мониторинга.

Выбор гидрогеологических структур для закачки  $\text{CO}_2$  должен содержать оценку таких параметров, как проницаемость, состав, мощность и глубина залегания пласта-коллектора, объем порово-трещинного пространства. Конечно, должны учитываться и затраты на закачку

CO<sub>2</sub>, сооружение скважины, строительство компрессорной станции, газопровода и др.

Для примера рассчитаем расход энергии на закачку CO<sub>2</sub> по отношению к производству энергии, сопровождающемуся выделением CO<sub>2</sub>. Примем глубину залегания пласта-коллектора около 1 км, следовательно, закачиваемый газ надо компримировать до давления не менее 10 МПа. При сгорании угля с образованием 1 моля CO<sub>2</sub> выделяется количество теплоты, равное 393 кДж. Для сжатия 1 моля CO<sub>2</sub> требуется: до 10 МПа — 11 кДж, до 20 МПа — 13 кДж, т. е. около 3 % от произведенной энергии (расчет выполнен по формуле)  $A = \int_{P_1}^{P_2} RT \ln P$ ,

где  $A$  — работа,  $P$  — давление,  $P_1$  и  $P_2$  — соот-

ветственно начальное и конечное давление,  $R$  — газовая постоянная,  $T$  — температура, °К.

С учетом КПД тепловых электростанций и компрессоров цифра 3 % увеличивается в несколько раз и в зависимости от конкретного оборудования и технологии достигает 15—30%. При строгом экономическом расчете эти цифры, по-видимому, понизятся, т. к. они рассчитаны на закачку всего объема CO<sub>2</sub> и не учитывают того, что часть поглощенного CO<sub>2</sub>, а также оксиды азота и окислы серы утилизируются в химической промышленности. Это примерные расчеты не учитывают всех статей расхода на реализацию предложенного метода, но свидетельствуют об экономической его возможности.



**Кафедра экономики Московского геологоразведочного  
института**

*осуществляет подготовку инженеров-экономистов  
по специальности*

*07.14 Экономика и управление в отраслях  
горной промышленности и геологоразведке  
на контрактной основе с геологическими и горными  
предприятиями по следующим специализациям:*

- 07.14.01.1 ЭКОНОМИКА И ПЛАНИРОВАНИЕ В ГОРНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ
- 07.14.01.2 ОРГАНИЗАЦИЯ И ПЛАНИРОВАНИЕ В ГЕОЛОГОРАЗВЕДКЕ
- 07.14.03 ОРГАНИЗАЦИЯ И НОРМИРОВАНИЕ ТРУДА
- 07.14.04 ОРГАНИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВОМ
- 07.14.05 ОРГАНИЗАЦИЯ И ПЛАНИРОВАНИЕ ВНЕШНЕЭКОНОМИЧЕСКИХ  
СВЯЗЕЙ ПРЕДПРИЯТИЯ

**Перечень специализаций может быть расширен по заказу предприя-  
тий:**

ЭКОНОМИКА МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ И ОЦЕНКА МЕСТОРОЖДЕНИЙ  
БУХГАЛТЕРСКИЙ УЧЕТ И АНАЛИЗ ХОЗЯЙСТВЕННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ  
ФИНАНСЫ И КРЕДИТ

*Кафедра проводит повышение квалификации  
и переподготовку инженерных кадров в условиях  
рыночных отношений*

**В программе:** теоретические основы макро- и микроэкономики, орга-  
низация производства и управления (менеджмент), маркетинг, бухгал-  
терский учет и анализ, техника коммерческих операций, организация и  
планирование внешнеэкономических связей предприятия, экономико-ма-  
тематическое моделирование и ЭВМ, иностранный язык, деловые игры и  
другие предметы.

*Срок обучения один год по очной и два года по заочной форме. Стои-  
мость переподготовки и повышения квалификации инженерных кадров  
10,5 тыс. руб.*

**Заявки направляйте по адресу:**  
**117485, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 23А, кафедра экономики**

# **ПОЛОЖЕНИЕ**

## **об Ассоциации выпускников Московского геологоразведочного института имени Серго Орджоникидзе (АВ МГРИ)**

### **Общие положения**

Ассоциация выпускников МГРИ образуется для:  
укрепления научных и производственных связей института и инженеров всех выпусков (отечественных и зарубежных);

объединения усилий с целью оказания помощи институту для повышения профессионального уровня преподавания, использования передового научного и производственного опыта;

оказания помощи выпускникам института в профессиональном и научном совершенствовании;

углубления и совершенствования учебного процесса с учетом мнений выпускников института, работающих в различных отраслях науки и производства;

восстановления и поддержания связей между выпускниками института;

использования опыта и авторитета выпускников в воспитательной работе новых поколений студентов;

развития материально-технической базы института;

того, чтобы наш институт действительно стал опорным пунктом знаний для всех желающих, чтобы он стал школой современного менеджмента и общественной жизни, школой управления и бизнеса.

### **Членство в Ассоциации**

Членом Ассоциации может быть любой выпускник института (как гражданин СССР, так и другой страны).

Коллективным членом Ассоциации может быть любая организация (партия, экспедиция, предприятие, рудник и т. п.), в которой работает не менее трех выпускников института.

Члену Ассоциации выдается специальный нагрудный знак, а коллективному члену (организации) вручается сертификат установленного образца.

### **Права членов Ассоциации**

Член Ассоциации участвует в работе ее органов и может быть избран в руководящие органы.

Член Ассоциации активно участвует в научных конференциях института.

Член Ассоциации может затребовать любую научную информацию по интересующим вопросам и заказывать ее через Совет Ассоциации.

Член Ассоциации пользуется преимущественным правом зачисления на факультет повышения квалификации, участия в различных формах совершенствования личной подготовки.

Член Ассоциации имеет право личной рекомендации для приема в институт молодежи на льготных условиях.

Член Ассоциации может принимать участие во встречах выпускников, выступать с инициативой по организационным формам встреч.

Коллективные члены Ассоциации имеют право получать информацию о молодых специалистах перед их распределением и направлять в институт молодежь на льготных условиях.

Член Ассоциации имеет право пользоваться гостиницей института (после завершения ее реконструкции).

#### **Обязанности членов Ассоциации**

Член Ассоциации глубоко осознает предназначение Ассоциации и проводит ее патриотическое начинание в местах своей жизни и работы, пропагандируя институт, способствуя притоку в институт наиболее талантливой молодежи.

Член Ассоциации содействует повышению уровня учебно-педагогической и общественной работы в институте, рекомендуя для этих целей высококвалифицированных специалистов науки и практики.

Член Ассоциации помогает своим трудом созданию картотеки выпускников института, вовлекает их в Ассоциацию, информирует о целях и задачах Ассоциации.

Член Ассоциации способствует привлечению денежных средств организациями и отдельными лицами для укрепления материально-технической базы института.

#### **Руководство Ассоциацией**

Высшим органом Ассоциации является Конференция, которая проводится ежегодно и рассматривает все вопросы, связанные с деятельностью Ассоциации.

На отчетно-выборной Конференции, проводимой раз в пять лет, избирается Президент и Совет Ассоциации, которые осуществляют руководство работой между Конференциями. Численность Совета определяется Конференцией.

В районах и регионах, в которых количество выпускников превышает 50 человек, создается территориальное отделение Ассоциации во главе с вице-президентом. Решение об организации принимает Совет Ассоциации.

При проведении мероприятий общественного или международного значения может проводиться съезд Ассоциации.

#### **Финансирование Ассоциации.**

Ассоциация строит свою деятельность на условиях самофинансирования и не является коммерческой организацией.

Член Ассоциации платит вступительный взнос 10 р. и ежегодный членский взнос — 5 р.

Коллективный член Ассоциации (организации) платит вступительный взнос от двух до десяти тысяч рублей (в зависимости от объема финансирования).

Член Ассоциации (зарубежный) вносит вступительный и ежегодные взносы в конвертируемой валюте.

Ассоциация принимает добровольные взносы и пожертвования от различных организаций и частных лиц.

Ассоциация за счет вышеуказанных денежных поступлений образует специальный фонд, который используется для финансирования деятельности организации, улучшения материально-технической базы института, поощрения научных исследований и поддержки различных инициатив, выдвигаемых членами Ассоциации.

Расходование средств разрешается только Советом Ассоциации. Отчет о расходах средств утверждается ежегодно на Конференции Ассоциации.

*Примечание. Положение об Ассоциации выпускников МГРИ может быть изменено, дополнено или заменено по решению Конференции. (Принято 26 октября 1990 г. на Совете Ассоциации и одобрено Ученым Советом МГРИ)*

**Расчетные счета для коллективных и зарубежных членов ассоциации:**

*Рублевый счет № 61120917 Черемушкинский ПСБ МФО 20149*

*Валютный счет № 67089160 во Внешэкономбанке СССР*



# ВЫПУСКНИКУ МОСКОВСКОГО ГЕОЛОГО- РАЗВЕДОЧНОГО ИНСТИТУТА ИМ. С. ОРДЖОНИКИДЗЕ

В стране происходят бурные события, меняется общественно-политическая обстановка. В этих условиях требуется по-новому осмыслить роль и предназначение высшего учебного заведения, мобилизовать опыт науки и производства для создания преобразованного института. Это должно поднять его роль как головного института, центра геологической и общественной мысли. Будущий инженер в стенах своего института должен получить подготовку на новом уровне, наиболее современными методами и быть уверенным в том, что его родной институт всегда примет выпускника, поддержит и поможет ему на жизненном пути.

Именно с целью совершенствования учебного и научного процесса Ученый совет института образовал Ассоциацию выпускников МГРИ. Нет необходимости повторять, что мы не мыслили совершенствования всей научно-педагогической работы без объеди-

нения выпускников института, использования их богатого жизненного опыта. Опираясь на него, по крупицам собирая все доброе и деловое, мы хотим укрепить весь процесс подготовки специалиста, сделать связь поколений более ощутимой и весомой.

Для проведения работы с выпускниками МГРИ мы продумываем различные общественно-профессиональные формы, изучаем отечественный и зарубежный опыт. Мы надеемся после завершения подготовительной работы провести I съезд Ассоциации выпускников МГРИ (примерно вторая половина 1991 г.) и на нем рассмотреть подробно организационные меры и формы нашей совместной деятельности.

С надеждой и пониманием того, что каждый из Вас может сделать для нашего общего дела, мы приглашаем Вас стать членом Ассоциации и принять активное участие в ее работе.

На первом этапе перед Ассоциацией стоит задача создать картотеку выпускников МГРИ и материальную основу (Фонд Ассоциации). С просьбой оказать помощь в этом мы обращаемся к Вам.

С наилучшими пожеланиями

Президент  
Ассоциации выпускников МГРИ  
Е.А. Козловский

Ректор МГРИ  
Л.Г. Грабчак

## Contents

|                                                                                                                                                                                                                                                         |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <i>Shvets V. M.</i><br>Training of engineers for the Geological Survey of country . . . . .                                                                                                                                                             | 4  |
| <i>Sobin O. A.</i><br>The faculty of raising professional skill . . . . .                                                                                                                                                                               | 8  |
| REGIONAL GEOLOGY AND TECTONICS                                                                                                                                                                                                                          |    |
| <i>Sokolovskiy A. K.</i><br>Urgent geotectonic problems discussed at the XXVIII-th session of the International Geological Congress . . . . .                                                                                                           | 10 |
| <i>Gavrikova S. N., Sokolovskiy A. K., Galanin A. V., Nikolaeva L. L., Orlov V. N., Fedchuk V. Ya., Baranov Yu. B.</i><br>Features of the structure of the Stanovaya folded region . . . . .                                                            | 14 |
| <i>Kostenko N. P., Korchuganova N. I.</i><br>Late orogenic structures of the Koryakskoe Highland . . . . .                                                                                                                                              | 20 |
| GEOPHYSICS                                                                                                                                                                                                                                              |    |
| <i>Kamenetskaya R. M., Kamenetskiy F. M., Mamaev V. A., Ozolina T. R., Timofeev V. M.</i><br>The application of aeroelectric prospecting to predicting areas promising for oil . . . . .                                                                | 24 |
| <i>Plyusnin M. I., Bilibin S. I., Babkov-Esterkin S. V.</i><br>Improvement of methods and technology of measurement of rock magnetic sensitivity . . . . .                                                                                              | 28 |
| <i>Novak O. B., Shimelevich M. I.</i><br>Non-linear and optimum mathematical methods to analyze geological-geophysical fields and their interaction . . . . .                                                                                           | 32 |
| <i>Demura G. V., Kljuev Yu. A., Lyzhin A. A., Nikanorov V. V., Nikitin A. A., Petrov A. V.</i><br>Algorithmic software provision for processing geological and geophysical data for the purpose of identification of poorly contrast features . . . . . | 39 |
| <i>Popov Yu. A., Korostelov V. M., Berezin V. V., Romushkevich R. A.</i><br>Thermal-physical studies of rocks and ores . . . . .                                                                                                                        | 43 |
| MINERALOGY, PETROGRAPHY, LITHOLOGY                                                                                                                                                                                                                      |    |
| <i>Bardina N. Yu., Popov V. S.</i><br>Systematization of metamorphic rocks and metasomatic facies occurring at shallow depths . . . . .                                                                                                                 | 48 |
| <i>Makarov V. P.</i><br>Distribution of lead isotope relative contents . . . . .                                                                                                                                                                        | 56 |
| <i>Onikienko L. D.</i><br>On high content hypogenic iron ores lying in the Mikhailovskoe deposit, Kurskaya magnetic anomaly . . . . .                                                                                                                   | 62 |
| METHODOLOGY, ECONOMICS, MANAGEMENT                                                                                                                                                                                                                      |    |
| <i>Vikentev V. A., Budrik V. G., Vorontsov V. A., Ilin V. V., Kushnarev P. I., Shumilin M. V., Yasnovskiy P. P.</i><br>Methodic aspects of raising efficiency of exploration . . . . .                                                                  | 65 |
| <i>Kazhdan A. B., Pakhomov V. I.</i><br>Methodological principles of the system analysis of various level geological information for prediction-prospecting purposes . . . . .                                                                          | 72 |
| <i>Bulygin R. M., Guskov O. I.</i><br>Appraisal of mineral reserves obtained at earlier stages of geological exploration . . . . .                                                                                                                      | 80 |
| <i>Kobakhidze L. P., Borisovich V. T., Gorodyskiy I. V.</i><br>On the cost of mineral reserves explored . . . . .                                                                                                                                       | 82 |
| <i>Alexeev V. V., Naugolnov S. I., Seleznev S. A.</i><br>Economics of energy resources . . . . .                                                                                                                                                        | 85 |
| ENGINEERING GEOLOGY                                                                                                                                                                                                                                     |    |
| <i>Bondarik G. K., Nevecherya V. L., Pendin V. V.</i><br>Prediction of the state of natural-technical systems of the cryolite zone in West Siberia . . . . .                                                                                            | 86 |
| DISCUSSIONS                                                                                                                                                                                                                                             |    |
| <i>Pankratov A. V., Shvets V. M.</i><br>Hydrogeochemical aspects of hot-house effect protection . . . . .                                                                                                                                               | 91 |