

ОТЕЧЕСТВЕННАЯ ГЕОЛОГИЯ

№ 3 / 2019

Основан в марте 1933 года

Журнал выходит шесть раз в год

УЧРЕДИТЕЛИ



Министерство природных ресурсов и экологии
Российской Федерации



Российское геологическое общество



Центральный научно-исследовательский
геологоразведочный институт
цветных и благородных металлов

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главные редакторы: С.А.Аксенов
А.И.Иванов

Н.В.Милетенко (зам. главного редактора),
Т.М.Папеско (зам. главного редактора),
А.И.Черных (зам. главного редактора)

Е.М.Аксенов, А.И.Варламов, С.С.Вартанян,
А.И.Жамойда, А.А.Кременецкий, М.И.Логвинов,
Г.А.Машковцев, Н.В.Межеловский, И.Ф.Мигачев,
А.Ю.Розанов, Г.В.Седельникова, И.Г.Спиридонов,
В.И.Старостин, Е.Г.Фаррахов

Содержание

<i>Кобылкин Д.Н.</i> Поздравление Е.А.Козловского с 90-летием	3	<i>Юшманов Ю.П.</i> Золотоносные вихревые структуры в сдвиговых дуплексах Дальнего Востока: Центральная Колы- ма, Нижнее Приамурье	55
<i>Киселев Е.А.</i> Поздравление Е.А.Козловского с 90-летием	4		
90-летие Евгения Александровича Козловского	5	ЛИТОЛОГИЯ, ПЕТРОЛОГИЯ, МИНЕРАЛОГИЯ, ГЕОХИМИЯ	
ИНФОРМАЦИЯ			
Итоги IX международной научно-практической конференции «Научно-методические основы про- гноза, поисков, оценки месторождений алмазов, благородных и цветных металлов»	7	<i>Хачатрян Г.К., Колесникова Т.И.</i> Методика исследования оливина и хромдиопсида с помощью ИК-Фурье микроскопа и возможности её использования при шлихо-минералогических поисках месторождений алмаза	63
МЕСТОРОЖДЕНИЯ РУДНЫХ И НЕРУДНЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ		<i>Карнаухова Г.А.</i> Обстановки осадконакопления и особенности со- става донных отложений в Ангарских водохрани- лищах	74
<i>Голенев В.Б., Куликов Д.А.</i> Прогнозные ресурсы твёрдых полезных ископае- мых и их аналоги в мировой практике	17	РЕГИОНАЛЬНАЯ ГЕОЛОГИЯ	
<i>Лихачев А.П.</i> Возможность самообогащения рудным веществом и тяжёлым изотопом серы (³⁴ S) мантийных магм, формирующих Pt-Cu-Ni месторождения и пер- спективное место для локализации руд в Нориль- ском районе	32	<i>Калмыков Н.П.</i> О полихронном местонахождении плейстоценовых млекопитающих на северо-западном побережье оз. Байкал	83
<i>Новрузов Н.А., Саттарзаде Н.А.</i> Основные черты минералого-геохимических осо- бенностей руд месторождения Филизчай (Азер- байджан)	50	КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ	
		<i>Филатов Е.И., Филатова Л.К.</i> Краткий очерк основ металлогении	90

Редакция: *Т.М.Папеско, А.П.Фунтикова*
Компьютерная верстка *А.В.Кондратьев*

Решением Высшей аттестационной комиссии Министерства образования науки
Российской Федерации журнал включён в «Перечень ведущих рецензируемых
научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные
научные результаты диссертаций на соискание учёной степени доктора и
кандидата наук»

Подписано в печать 07.06.2019

Адрес редакции: 117545, г. Москва, Варшавское шоссе, д. 129, корп. 1
Телефон: (495) 315-28-47. Факс: (495) 315-43-47. E-mail: ogeo@tsnigri.ru

Сайт: http://tsnigri.ru/o_geology

Сайт электронной библиотеки: <http://elibrary.ru>

Типография ФГБУ «ЦНИГРИ»

Уважаемый Евгений Александрович!

От всей души поздравляю Вас с Днём рождения, с блестящей датой – 90 лет! Такой рубеж по силам преодолеть только человеку такого масштаба, такой жизненной энергии и мужества, какими наделены Вы.

Ваш трудный жизненный путь – великий пример того, как подросток из белорусского села, испытавший на себе все тяготы войны, благодаря усердию, трудолюбию и настойчивости, стал крупным государственным деятелем – Министром геологии СССР.

Уже на первых этапах производственной работы, Вы проявили себя как талантливый профессионал – природный геологоразведчик и руководитель. Особо хочется отметить Вашу плодотворную деятельность на посту Министра геологии СССР. Именно в эти годы стало уделяться повышенное внимание комплексному анализу минерально-сырьевой базы страны, перспективам развития отрасли, широкому привлечению науки и планомерному техническому перевооружению геологоразведочного производства. Резко увеличились объёмы и производительность работ, широко внедрялись новые формы организации процесса. Грамотная стратегия развития отрасли способствовала резкому росту новых геологических открытий.

Большой широтой отличаются Ваши научные интересы. Среди них проблемы минерально-сырьевых ресурсов нашей страны и мира, пути их развития и использования, методика и технология разведки полезных ископаемых, в том числе на основе привлечения новых принципов геолого-экономического моделирования.

Существенный личный вклад внесён Вами в организацию проходки уникальной Кольской сверхглубокой скважины. При Вашем содействии создан мощный, хорошо оснащённый флот отрасли. Получила путёвку в жизнь новая система исследования недр «Космос–воздух–земля–скважина».

Истинный патриот родной земли, мастер с величайшей организованностью, чёткостью, принципиальностью в принятии решений и требовательности в их исполнении – и сегодня являетесь лидером отечественной и мировой геологии.

Желаю Вам, уважаемый Евгений Александрович, сохранить свой огромный заряд жизненной энергии, крепкого здоровья, счастья и больших творческих успехов!



Министр природных ресурсов и экологии
Российской Федерации

Д.Н.Кобылкин

Уважаемый Евгений Александрович!

От имени Федерального агентства по недропользованию и от меня лично примите самые тёплые и сердечные поздравления по случаю Вашего 90-летия!

Вы входите в плеяду выдающихся геологов России. Период Вашего руководства Министерством геологии СССР по праву относят к «золотому веку геологии», а Вас называют «легендой геологической отрасли». С Вашим именем связаны интенсивное развитие минерально-сырьевой базы СССР, геологической науки, масштабный научно-технический прогресс в отрасли и техническое перевооружение геологоразведочного производства.

Вы лично принимали участие в открытии месторождений таких важнейших видов минерального сырья, как нефть в Западной Сибири, алмазы близ Архангельска, олово на Дальнем Востоке России. При Вашем участии был основан мощный, хорошо оснащённый флот отрасли, базу которого сформировали на Черном море, в Мурманске и Владивостоке.

По Вашей инициативе на правительственном уровне утвердили научно-практическую систему исследования недр «Космос–воздух–земля–скважина», которая подняла исследование недр на новый научный уровень. Благодаря применению принципиально новой отечественной технологии, научных методов управления и организации работ оказалась возможной проходка уникальной Кольской сверхглубокой скважины. Успешно решая производственные и научные проблемы, Вы заслуженно завоевали известность и славу талантливого организатора. Ваш высокий авторитет в геологии и в обществе основан на огромном жизненном опыте, объективности, честности и смелости суждений, твёрдой гражданской позиции, бескорыстном служении Родине. Ваш постулат о смысле профессии геолога – «знать о прошлом и прекрасно понимать будущее» – наказ поколениям, которые выберут эту профессию, и повод задуматься тем, кто уже работает в отрасли и принимает ответственные решения.

Ваша научная, организационная и общественная деятельность заслуженно отмечена орденами Ленина, Трудового Красного Знамени, «За заслуги перед Отечеством» IV и III степеней, званиями лауреата Ленинской премии, двух Государственных премий Российской Федерации, Заслуженного геолога Российской Федерации и другими высокими наградами.

В этот замечательный день позвольте выразить Вам, Евгений Александрович, своё уважение и пожелать крепкого здоровья, бодрости духа, счастья и благополучия!



Заместитель Министра
природных ресурсов и экологии
Российской Федерации –
руководитель Федерального агентства
по недропользованию

Е.А.Киселев

90-летие Евгения Александровича Козловского

7 мая 2019 г. исполнилось 90 лет Министру геологии СССР в 1975–1989 гг., заслуженному деятелю науки и техники РСФСР, вице-президенту РАЕН, крупному учёному, внесшему огромный вклад в развитие отечественной геологической отрасли **Евгению Александровичу Козловскому**.

В годы Великой Отечественной войны Евгений Александрович Козловский принимает участие в партизанском движении Белоруссии. После окончания в 1948 г. Минского артиллерийского училища, и в 1953 г. Московского геологоразведочного института Е.А.Козловский начал трудовую деятельность в геологических организациях Дальнего Востока. При его непосредственном участии в Хабаровском крае был открыт и в рекордные сроки подготовлен к промышленному освоению Комсомольский оловорудный район. За большой вклад в решение этой проблемы в числе других геологов Евгению Александровичу было присвоено звание лауреата Ленинской премии. За время работы на производстве он сформировался как профессионал-геологоразведчик, руководитель, способный в сложных условиях успешно управлять геолого-производственным процессом. На материалах собственных исследований подготовил и защитил во МГРИ кандидатскую диссертацию.

В 1965 г. Е.А.Козловский был назначен на должность начальника Технического управления Министерства геологии РСФСР, а в 1970 г. утверждён членом коллегии Министерства. С его приходом в Министерстве разрабатывается и осуществляется обширная программа научно-технического прогресса при проведении геологоразведочных работ, освоении новой техники и технологии, организации работ. По результатам собственных исследований в 1973 г. он успешно защитил докторскую диссертацию.

В этом же году Е.А.Козловский становится директором Всесоюзного института экономики минерального сырья и геологоразведочных работ (ВИЭМС) и делает всё возможное, чтобы поднять роль института в отрасли.

В 1974 г. Е.А.Козловский назначается заместителем Министра геологии СССР, а в декабре 1975 г. – Министром геологии СССР. Данный этап его трудовой деятельности оказался весьма плодотворным. Особенно высоко проявились гражданская позиция Евгения Александровича, государственный подход к решению проблем геологии, минерально-сырьевой базы страны, творческая разноплановость в осуществлении научных, технических, производственных и социальных проблем. С присущей ему принципиальностью и прямоотой Е.А.Козловский всегда отстаивал интересы геологии.



Благодаря настойчивости Министерства Правительство оказывало постоянную поддержку отрасли, что высоко подняло престиж геологии и роль геолога в стране. Неслучайно в этот период состоялись крупнейшие геологические открытия месторождений нефти и газа в Западной и Восточной Сибири, алмазов в Архангельской области, цветных, редких, благородных металлов, уранового сырья и других полезных ископаемых на территории СССР. Эти открытия позволили укрепить и расширить минерально-сырьевую базу, которая и в настоящее время является одним из главных факторов, определяющих социально-экономическую обстановку в стране.

Научная деятельность Е.А.Козловского характеризуется широким диапазоном исследований. В его работах сформулированы принципы развития и использования минерально-сырьевой базы. К кардинальным геологическим проблемам Евгений Александрович относит изучение строения, состава и эволюции Земли, комплексное изучение земной коры. Он успешно осуществлял руководство Межведомственным научным советом по проблемам изучения недр Земли и сверхглубокого бурения Государственного комитета СССР по науке и технике (ГКНТ). Проходка уникальной Кольской сверхглубокой скважины оказалась возможной в результате применения принципиально новой отечественной технологии, научных методов управления и организации работ,



Заседание редколлегии «Горной энциклопедии», 1984 г. В центре – главный редактор Е.А. Козловский, слева – Министр нефтяной промышленности Н.А. Мальцев, справа – вицепрезидент АН СССР А.Л. Яншин, Министр угольной промышленности Б.Ф. Братченко, заместитель главного редактора Л.М. Гейман.

чему способствовал и личный вклад Е.А.Козловского. На правительственном уровне утверждается новая научно-практическая система исследования недр «Космос–воздух–земля–скважина», которая должна была поднять исследование недр на новый уровень. Евгением Александровичем создана научная школа, положившая начало новым подходам к системе управления, в том числе технологическими процессами и разведкой месторождений на основе геолого-экономического моделирования. Е.А.Козловский – первооткрыватель ряда месторождений, автор свыше 40 изобретений и открытий, почти 600 научных работ, в том числе 45 монографий. Е.А.Козловский являлся главным редактором многотомного издания «Геология СССР», «Горная энциклопедия» (в пяти томах), монографии «Кольская сверхглубокая», «Геологическое строение СССР и закономерности размещения полезных ископаемых» (в десяти томах), «Справочника инженера по разведочному бурению» (в двух томах) и др. За большой вклад в развитие минерально-сырьевой базы Е.А.Козловский награждён орденами и медалями СССР, России и зарубежных стран, удостоен Ленинской (1964) и Государственных премий (1998, 2002). Ему присвоены звания «Заслуженный деятель науки и техники РСФСР», «Заслуженный геолог России», а также «Почётный разведчик недр», «Почётный нефтяник», «Почётный

работник газовой промышленности», «Почётный работник угольной промышленности». Награждён знаком «Шахтерская слава» трёх степеней.

А настоящее время Е.А.Козловский полон творческих сил, как всегда устремлён на защиту геологии и системы исследования недр, сохраняет глубокое уважение к труду разведчика недр. Исключительная душевность, серьёзность восприятия и понимание коллег – это отличительная черта выдающегося Учёного и Человека!

Его жизненная позиция – яркий пример служения Делу и Отечеству!

От всей души поздравляем уважаемого Евгения Александровича с юбилеем и желаем ему крепкого здоровья, благополучия и неиссякаемой жизненной энергии.

*Учёный совет ФГБУ «ЦНИГРИ»
Редколлегия журнала*

Итоги IX Международной научно-практической конференции «Научно-методические основы прогноза, поисков, оценки месторождений алмазов, благородных и цветных металлов»



Фото 1. Слева направо: академик РАН Н.П.Похиленко, советник генерального директора АО «Росгеология» Б.К.Михайлов, генеральный директор ФГБУ «ЦНИГРИ» А.И.Черных, президент Российского геологического общества В.П.Орлов, заместитель руководителя Роснедр С.А.Аксёнов, председатель Союза старателей России В.И.Таракановский, заместитель Генерального директора ФГКУ «Росгеолэкспертиза» В.П.Полёванов, советник генерального директора ФГБУ «ВНИГНИ», директор института геолого-экономических проблем РАН В.Н.Бавлов, научный руководитель ФГБУ «ЦНИГРИ» А.И.Иванов

17–19 апреля 2019 г. в Центральном научно-исследовательском геологоразведочном институте цветных и благородных металлов прошла IX Международная научно-практическая конференция «Научно-методические основы прогноза, поисков, оценки месторождений алмазов, благородных и цветных металлов». Конференция состоялась при поддержке Федерального агентства по недропользованию, Российской академии наук и Российского геологического общества (фото 1).

На конференции зарегистрировались 293 участника, представлено 199 докладов: из них устных – 110, стендовых – 50, заочных – 39. В конференции участвовали представители 83 организаций: подведомственные Роснедра – 7, РАН – 10, ВУЗы – 6, недропользователи – 36, иностранные участники – 7, государственные органы – 6, АО «Росгео» – 8, прочие – 3.

С приветствиями на открытии конференции выступили: генеральный директор ФГБУ «ЦНИГРИ» А.И.Чер-

ных, заместитель руководителя Роснедр С.А.Аксёнов, президент РосГео В.П.Орлов, председатель Союза старателей России В.И.Таракановский, директор ИГМ СО РАН Н.Н.Крук, член-корреспондент РАН Н.А.Горячев, проректор МГРИ Ю.П.Панов, академик РАН Н.П.Похиленко, заместитель генерального директора ФГБУ «Росгеолфонд» Г.П.Ковтонюк.

В рамках конференции состоялись: Пленарное заседание; Круглый стол; Секция благородных металлов; Секция цветных металлов; Секция алмазов; Стендовая сессия. На всех заседаниях конференции было заслушано 110 докладов.

На Пленарном заседании были рассмотрены современное состояние минерально-сырьевой базы АБЦМ и направления по её укреплению, особенности государственного регулирования геологоразведочных работ (ГРП) по воспроизводству минерально-сырьевой базы (МСБ), развитие цифровых технологий прогнози-

вания твёрдых полезных ископаемых (ТПИ), геолого-генетические и прогнозно-поисковые модели рудны месторождений (фото 2).

Пленарное заседание конференции открыл *С.А.Аксёнов* (Роснедра) (фото 3). В своём сообщении он рассмотрел основные тенденции ГРП по воспроизводству минерально-сырьевой базы твёрдых полезных ископаемых и особенности государственного регулирования ГРП на современном этапе, в частности новую стадийность ГРП, направленную на оптимизацию геологоразведочного процесса, увеличение поискового задела, повышение уровня ликвидности фонда недропользования. В качестве наиболее важных задач государства в среднесрочной перспективе названы: совершенствование механизма информационного обеспечения недропользования, проведение прогнозно-минералогических работ в целях увеличения площадей для лицензирования по заявительному принципу, создание благоприятного инвестиционного климата для развития юниорных компаний, поддержка крупного и среднего бизнеса в освоении месторождений и воспроизводстве МСБ, в первую очередь, в регионах опережающего развития.

В докладе *А.И.Черных* с соавторами (ЦНИГРИ) проанализированы состояние и качество минерально-сырьевой базы благородных металлов Российской Федерации, приведено её сравнение с мировой МСБ, рассмотрена роль в запасах и добыче золота и серебра собственно золоторудных, комплексных и россыпных месторождений (фото 4). Отмечены проблемы воспроизводства МСБ и предложены возможные пути их решения. Выделены следующие направления: усиление роли профессиональных знаний в практике ГРП, увеличение финансирования и принятие нормативных документов,

направленных на стимулирование недропользования.

Н.Н.Крук с соавторами (ИГМ РАН) отметил, что текущая ситуация в минерально-сырьевом секторе России характеризуется неуклонным снижением количества и качества объектов, пригодных для промышленного освоения, уменьшением прироста запасов по целому ряду стратегических полезных ископаемых. Одной из причин этого является несоответствие существующих прогнозно-поисковых методик современному научному уровню. Основой нового методического подхода, по предложению авторов, могут стать разработка на основе комплексных исследований серии генетических моделей месторождений, включающих всю совокупность геологических и аналитических данных, и создание систем баз данных, обеспечивающих хранение и обработку информации.

Т.А.Головина (АО «Полиметалл УК») рассказала, как на практике функционирует горнорудная компания «Полиметалл УК». Основные направления развития ГРП в компании – поиск и разработка новых участков на действующих месторождениях, создание централизованных предприятий по переработке руды из различных источников (хабов), поиск «с нуля» новых крупных месторождений.

Доклад *В.Л.Лося* (AMP РК, Казахстан), *И.С.Гольдберга* (Interesources Pty Ltd, Австралия) касался необходимости модернизации прогнозирования рудных объектов. Предложена прогнозно-поисковая технология IONEX, которая основана на высокоточных анализах пород и может применяться на открытых и частично открытых территориях. В Казахстане с помощью данной технологии выявлены новые закономерности в размещении рудных объектов, выделены перспективные на



Фото 2. Слева направо: член-корреспондент РАН Н.А.Горячев, директор ИГМ СО РАН Н.Н.Крук, заместитель руководителя Роснедра С.А.Аксёнов, генеральный директор ФГБУ «ЦНИГРИ» А.И.Черных, президент Росгео В.П.Орлов, председатель Союза старателей России В.И.Таракановский



Фото 3. Заместитель руководителя Роснедр С.А.Аксёнов



Фото 4. Генеральный директор ФГБУ «ЦНИГРИ» А.И.Черных

золотое, медное и полиметаллическое оруденение площади, предложена концепция изучения недр и цифрового прогнозирования рудных полезных ископаемых.

Ю.К.Голубев (ЦНИГРИ) оценил современное состояние МСБ алмазов Российской Федерации, её развитие на период до 2040 г., подчеркнул актуальность открытия новых месторождений алмазов, рентабельных для отработки, с прогнозными ресурсами (ПР) не менее 400 млн. кар.

В.В.Кузнецов (ЦНИГРИ) рассмотрел направления работ по укреплению МСБ цветных металлов Российской Федерации. Выдвинул на первый план необходимость создания резервной МСБ меди за счёт объектов медно- и золото-медно-порфирового типов в Дальневосточном регионе; проведения поисковых работ в районах действующих горнодобывающих предприятий на Южном Урале, Рудном Алтае, Восточном Забайкалье и Салаире в целях выявления ПР категорий P_2 и P_1 для вовлечения их в оценочную стадию; проведения опережающих поисково-ревизионных, прогнозно-минерогенических работ в известных металлогенических зонах Среднего Урала, Енисейского кряжа, Тывы, Приморья для выделения новых площадей с оценёнными прогнозными ресурсами кат. P_3 медно-колчеданного и медно-порфирового и колчеданно-полиметаллического типов в качестве поискового задела; ускоренного ввода в строй разведанных месторождений взамен выбывающих предприятий с истощённой МСБ меди.

На заседании **Круглого стола** «Проведение ГРР по заявительному принципу: опыт, состояние, перспективы» заслушаны доклады, в которых отражены актуальные вопросы, связанные с лицензированием недропользования, оценкой эффективности применения заявительного принципа в российских условиях.

В сообщении *А.И.Иванова, А.И.Черных* (ЦНИГРИ) отмечена необходимость минимизации рисков получе-

ния отрицательных результатов при проведении ГРР, в связи с чем важен анализ всех имеющихся геологических, геофизических, геохимических, ландшафтно-геоморфологических и других материалов при разработке оптимальной методики ведения работ (фото 5). Авторами рассмотрены типичные сложности и риски, возникающие при ГРР поисковой стадии, а также выработаны направления действий для их сокращения: установление на начальной стадии работ вероятных геолого-промышленных и формационных типов оруденения в целях составления прогнозно-поисковой модели потенциального месторождения и определения прогнозно-поискового комплекса; проведение прогнозных исследований для выделения рудоносных структур; адаптация прогнозно-поискового комплекса к конкретным ландшафтным условиям; мониторинг выполняемых ГРР, своевременная корректировка их направления.

Доклад *В.И.Таракановского* (Союз старателей России) посвящался проблемам золотодобычи из «техногенных» месторождений. Отмечалось, что в условиях истощённой сырьевой базы решающее значение для успешной работы золотодобывающих предприятий малого и среднего бизнеса имело бы вовлечение в отработку техногенных россыпей, однако несовершенство «Закона о недрах» в части определения «техногенных запасов» является сдерживающим фактором. Союз старателей России предлагает следующие пути решения возникших вопросов: предоставлять недропользователям техногенные россыпи и участки без проведения аукционов и конкурсов на основании рассмотрения заявок предприятий комиссиями с участием представителей Роснедр и органов исполнительной власти; разрешить недропользователям проводить добычу драгоценных металлов из техногенных россыпей в границах предоставленного лицензией горного отвода без геологического изучения недр; отменить требование проведения государственной экс-



Фото 5. Научный руководитель ФГБУ «ЦНИГРИ» А.И.Иванов

пертизы техногенных запасов; упростить процедуру продления лицензий на отработанные месторождения для освоения техногенных запасов.

Т.С.Волоковых (Министерство природных ресурсов и лесопромышленного комплекса Архангельской области) рассказала об отсутствии воспроизводства МСБ алмазов при растущих объёмах их добычи на территории Архангельской области. Предлагаемые ею меры поддержки алмазодобывающей отрасли в регионе включают: стабильное финансирование из средств бюджета РФ прогнозно-поисковых и поисково-оценочных работ; финансовое стимулирование результативности работ; внедрение и развитие государственно-частного партнёрства; увеличение максимальной площади участка недр, предоставляемого для геологического изучения, поисков и оценки месторождений алмазов, до 1500 км²; сокращение сроков аренды лесных участков при проведении ГРП на алмазы; предоставление возможности геологического изучения особо охраняемых природных территорий с последующим выведением из их границ выявленных месторождений.

Доклады сотрудников ФГКУ «Росгеолэкспертиза» были посвящены правовому регулированию и администрированию процесса лицензирования. Д.Л.Никишиным рассмотрены существующий порядок предоставления участков недр для геологического изучения, направления модернизации системы лицензирования и законодательные инициативы по совершенствованию законодательства о недрах. Л.Е.Ламбеовой определены основные проблемы при проектировании по заявительному принципу и охарактеризованы нормативные изменения, внесённые последними приказами Минприроды России.

С.Т.Гимадеев (ООО Артель старателей «Золотой Полюс») поделился опытом работы компании «Золотой Полюс» по заявительному принципу, отметил сложности отведения лесных участков для целей геологическо-

го изучения, разведки и добычи полезных ископаемых в Забайкальской области. Предложил упростить процедуру оформления лесных участков для работы, привести в соответствие с приказами Минприроды нормативные документы регионального уровня, разработать чёткий алгоритм предоставления в аренду лесных территорий при наличии в их пределах особо защитных участков.

В рамках заседаний **Секции благородных металлов** было заслушано 37 докладов. Их тематика охватила широкий круг вопросов, касающихся актуальных проблем прогноза, поисков и оценки месторождений и напрямую связанных с ними вопросов фундаментальной и прикладной геологии месторождений благородных металлов. Рассмотрен спектр проблем – от металлогенических особенностей благороднометалльной минерализации до тонких, глубоко проработанных аспектов исследования вещества. В выступлениях проанализирована актуальность переоценки территорий на новые формационные типы оруденения, так как известные типы оруденения, являющиеся основой добычи в регионах, частично исчерпали свой потенциал. Важный резерв для развития поисковых работ – районы со сложными ландшафтно-геоморфологическими условиями, которые требуют новых методик обнаружения скрытых и перекрытых месторождений.

Доклад *Ю.Г.Сафонова* (ИГЕМ РАН) был посвящён оценке современного состояния научно-методических основ прогнозирования золоторудных месторождений на территории России. Автором поднимались общие методологические вопросы в теории и практике разномасштабного металлогенического прогнозирования и приводились конкретные примеры результативности прогнозов.

В следующих докладах освещались не менее важные проблемы. Так, *И.А.Чижова* рассказала о разработанной в ИГЕМ РАН оригинальной методике компьютерной экспресс-оценки и выбора перспективных золоторудных объектов для постановки поисковых работ. *Е.Н.Афанасьева* (ВСЕГЕИ) привела оценку перспектив выявления золоторудных объектов в Куолярвинском рудном узле (Северная Карелия). *Р.М.Багатаев* (ДГУНХ) доложил аудитории о результатах проведённых поисковых работ на рудное золото в черносланцевых толщах Горного Дагестана. *А.В.Молчанов* ознакомил с новыми данными, полученными сотрудниками ВСЕГЕИ, о золотоносности Алдано-Становой металлогенической провинции и перспективах локализации новых площадей для постановки среднемасштабных геолого-минералогических работ. *В.А.Ванин* (ИЗК СО РАН) сделал доклад о возможностях прогноза золотого оруденения с помощью геолого-структурных методов (на примере месторождения Голец Высочайший в Северном Забайкалье). *В.И.Безруков* (ВСЕГЕИ) озвучил основные направления и предварительные результаты прогнозирования золоторудных месторождений в восточной (российской) части Балтийского щита. Представитель частного бизнеса *О.А.Наталевич* (ООО «Верданди») в докладе проде-

монстрировала подход к прогнозу локализации «слепого» оруденения на основе 3D модели структурной схемы строения месторождения. *Н.А.Бакшеев* (СНИИГТиМС) сообщил о выявленном наборе признаков и критериев поиска промышленных скоплений золота в Егорьевском рудно-россыпном районе (Салаирский кряж). *А.В.Волков* с соавторами (ИГЕМ РАН) поднял в докладе важную тему об исследовании геодинамических обстановок формирования месторождений золота и других стратегических металлов в Арктической зоне России. *М.П.Брысин* (ЦНИГРИ) представил интересные и весьма перспективные результаты применения нового ионно-сорбционного метода геохимических поисков для выявления эпitherмального золото-серебряного оруденения на примере Каларского рудного поля в Горной Шории. В докладе *Е.М.Шемакиной* (МГУ) рассматривались инновационные методы прогнозирования оруденения, возможности использования в целях прогноза материалов дистанционного зондирования Земли из космоса.

Характеристикам золотосодержащего медно-молибден-порфинового пояса Таймыра и Северной Земли и перспективам выявления крупного золоторудного месторождения в пределах Светлинской площади Северо-Восточного Таймыра посвящён доклад *Б.С.Петрушкова* и *В.Ф.Проскурнина* (ВСЕГЕИ). Большой интерес вызвало сообщение *А.С.Вяльцева* (АО «Полиметалл УК») о современном подходе к оценке ресурсов в компании «Полиметалл». *Ж.Ж.Мовланов* (ИМР, Республика Узбекистан) рассказал о критериях прогнозной оценки территории Северный Нуратау на золото. *Г.П.Кимом* (ИМГРЭ) были рассмотрены важные вопросы о задачах разномасштабных геохимических работ при реализации стратегии развития МСБ РФ до 2035 г. *В.П.Хворостов* (ПАО «Высочайший») осветил в двух своих выступлениях проблемы выделения (с прогнозом месторождений мирового класса Au-Ag и Au-Cu порфинового типа) перспективных площадей Prabu Hills, Songkang в магматической дуге Сунда-Банда на острове Ломбок (Индонезия) и прогноза перспективных на тип «HS» золоторудных площадей на Камчатке, с использованием КА «Терра» и мультиспектрометра ASTER (на примере Ветровамской, Малетойваямской, Сэзроваямской и других площадей Корякского нагорья). *А.М.Вахрушев* (ЦНИГРИ) поднял актуальный вопрос об использовании Государственной Системы Координат (ГСК-2011) при работах геологической отрасли, о формировании единого информационного пространства и требований к функционалу ГИС. *Д.А.Куликов* (ЦНИГРИ) доложил о разработке методического руководства по оценке прогнозных ресурсов АБЦМ.

С докладом о золоторудных месторождениях Якутии выступил *В.Ю.Фридовский* (ИГАБМ СО РАН). Им были представлены новые, ранее неопубликованные данные, полученные сотрудниками института. О проблемах генезиса золоторудных месторождений сообщил также *Б.Б.Дамдинов* (ГИН СО РАН). *Л.И.Дементеев* (ГП

«Центральная ГГЭ», Республика Узбекистан) представлены данные по рудному участку Бабатаг, расположенному в Южном Узбекистане, а *Ю.Н.Николаевым* (МГУ) – о промышленных перспективах Олойской металлогенической зоны. Неподдельный интерес у присутствующих на секции геологов вызвали закончившиеся дискуссией доклады, посвящённые проблемам образования серебряных руд на примере месторождения Кимпиче (Якутия) (*В.В.Аристов*, ИГЕМ РАН) и построению геолого-генетической модели золоторудного месторождения Ветреное (Магаданская область) (*Н.В.Бондаренко*, ЦНИГРИ).

Особенный интерес для академической аудитории представляли доклады о современных проблемах исследования рудных месторождений, новых и нетрадиционных методах изучения рудного вещества. Так, с докладом о роли хромита в процессах платинометалльного рудообразования выступила *М.А.Юдовская* (ИГЕМ РАН). Она осветила проблему образования скрещенных типов платинометалльного оруденения – хромит-сульфид-ЭПГ минерализации. Оживлённую дискуссию вызвал доклад *В.Д.Абрамовой* (ИГЕМ РАН) о результатах исследования микропримесей в сульфидах с помощью новейшей методики изучения вещества (ЛА-ИСП-МС). Были представлены данные методических и аналитических работ с галенитом, пиритом, сфалеритом, арсенопиритом, пирротинитом, молибденитом, пентландитом и халькопиритом. *А.А.Савичевым* (ООО «Норильскгеология») рассмотрены оригинальные методики оценки фертильности гранитных интрузивов на основе изучения типоморфных особенностей породообразующих и аксессуарных минералов гранитоидов. Доклад, также касающийся новейших методик исследования рудного вещества, представлен *Е.А.Наумовым* (ЦНИГРИ). Им с помощью рентгеновской микротомографии были получены новые сведения об особенностях распределения золота в сульфидах и силикатной матрице.

Новые и оригинальные материалы о роли органического вещества при концентрации и перераспределении рудных компонентов представлены *А.Е.Будяком* (ИГХ СО РАН). Доклад *С.Г.Кряжева* (ЦНИГРИ) был посвящён вопросам изотопно-геохимической зональности золоторудных месторождений в углеродисто-терригенных толщах. *А.Н.Барышевым* (ЦНИГРИ) сделан обзорный доклад, касающийся актуальных проблем металлогении и построения прогнозно-поисковых моделей. *В.Д.Конкин* (ЦНИГРИ) ознакомил с перспективами выявления благороднометалльного оруденения в пределах Прибайкальского региона.

В целом хотелось бы отметить высокий уровень докладов. Обращает на себя внимание намечающийся прогресс в развитии продуктивного сотрудничества между организациями различной ведомственной принадлежности с ВУЗами и частными компаниями (как недропользовательскими, так и сервисными, предоставляющими важные услуги при геологоразведочных и поис-

ковых работах). Как правило, в результате такого взаимодействия появляются наиболее интересные результаты. Примером могут служить доклады *А.А.Савичева* с соавторами (совместная работа ООО «Норильскгеология» и ИГМ СО РАН), *Е.М.Шемякина* и *П.А.Починалина* (МГУ и ООО «Иннотер») и др.

Широкий спектр вопросов рассмотрен на **Секции цветных металлов** (27 докладов), касающихся прогноза и поисков месторождений Cu, Pb, Zn, Ni, Co, редких элементов в пределах металлогенических провинций России (фото 6).

Так, в докладе *Т.В.Серавиной* (ЦНИГРИ) приведены приоритетные направления прогнозно-металлогенических и поисковых работ на месторождениях свинца и цинка в терригенно-карбонатных комплексах (типа Sedex). К перспективным регионам, заслуживающим постановки поисковых работ на данный тип оруденения, относятся Приаргунская МЗ (Забайкальский край), Ангаро-Большепитская МЗ (Красноярский край), Центрально-Новоземельская МЗ (Архангельская область), Кыллахская МЗ (Республика Саха (Якутия)), Прибайкальская МЗ (Иркутская область), Омулёвская и Приколымская МЗ (Магаданская область).

Доклад *В.В.Кузнецова* (ЦНИГРИ) посвящён другому широко распространённому типу месторождений свинца и цинка – колчеданно-полиметаллическому в вулканогенных породах (VMS – месторождения рудноалтайского и нойон-тологийского типов), для которых разработан прогнозно-поисковый комплекс для выделения разноранговых площадей, где необходима постановка прогнозно-металлогенических и поисковых работ.

Представитель компании Amur Minerals Corporation Рэндольф Льюис в своём докладе рассказал о проекте и стратегии разработки медно-никелевого месторождения Кун-Манье. По оценке JORC запасы месторожде-

ния составляют 155,1 млн. т руды с содержанием никеля 1,02%. Такие запасы позволят обеспечить работу предприятия минимум на 15 лет.

В ряде докладов сотрудников ЦНИГРИ рассмотрены научные аспекты геологии месторождений Рудного Алтая: геодинамические условия формирования колчеданно-полиметаллического оруденения (*Н.Г.Кудрявцева*), его связи с кремнекислыми вулканитами и петрохимические особенности (*Л.К.Филатова*), генетические вопросы (обнаружение труб палеозойских «курильщиков» в гидротермальных постройках Захаровского месторождения Рубцовского рудного района) (*С.В.Кузнецова*).

Прогнозно-поисковые работы на золото-колчеданно-полиметаллическое оруденение проводятся и на Салаирском кряже. Основные черты размещения оруденения в пределах Салаирской металлогенической зоны отражены в докладе *О.В.Мурзина* и *Н.М.Мурзиной* (СНИИГТиМС, АО «Росгео»), а условия локализации золото-колчеданно-полиметаллического оруденения Салаирско-Каменушинского рудного поля – в докладе *А.В.Инякина* (ЦНИГРИ). В них описана прогнозно-поисковая модель и поисковые критерии и признаки обнаружения данного типа оруденения, с помощью которых дан прогноз на поиски новых рудных тел на флангах и глубоких горизонтах известковых месторождений, а также новых объектов в пределах Салаирской минералогической зоны.

Свинцово-цинковые месторождения Енисейского кряжа относятся к трём геолого-промышленным типам: свинцово-цинковому стратиформному в карбонатных комплексах, колчедансодержащему цинково-свинцовому в кремнисто-карбонатных комплексах и колчеданно-полиметаллическому в терригенных комплексах. Петрохимические особенности рудовмещающих отложений трёх типов оруденения рассмотрены в докладе *М.М.Ха-*



Фото 6. Заседание секции цветных металлов

чатунова и М.Н.Зайцевой (ЦНИГРИ). Для каждого типа оруденения М.Н.Зайцевой и А.В.Инякиным (ЦНИГРИ) приведены также поисковые признаки, основанные на составлении эталонных моделей месторождений. К первому типу оруденения (по данным А.А.Стороженко с соавторами, ЦНИГРИ) относится выявленное Ангарской экспедицией Сухопитское свинцово-цинковое проявление, которое по результатам проведённых поисковых работ отвечает крупному перспективному объекту.

Состояние минерально-сырьевой базы Восточного Забайкалья, специализированной на золото-серебро-полиметаллическое оруденение, озвучила Д.А.Корчагина (ЦНИГРИ). Из её сообщения следует, что уровень прироста запасов свинца и цинка с попутным золотом и серебром не воспроизводится; обеспеченность действующих добычных предприятий прогнозными ресурсами полиметаллических руд недостаточна. Для решения проблем по воспроизводству и наращиванию МСБ свинца и цинка необходимо проведение поисковых и прогнозно-металлогенических работ в целях выявления новых и переоценки известных перспективных площадей, которые были начаты в последние годы силами ОСП «Читагеологоразведка» и сотрудниками ЦНИГРИ. Главный геолог ФГУП «Читагеологоразведка» А.И.Брель поделился опытом проведения и результатами геологоразведочных работ на полиметаллических золото-серебросодержащих объектах Юго-Восточного Забайкалья. При этом он затронул широкий круг вопросов от МСБ до конкретных поисковых работ, приведших к открытию рудопроявлений Талман и Кодак. В докладе Т.В.Серавиной с соавторами показано, что в Приаргунской минералогической зоне развиты два типа полиметаллического оруденения: колчеданно-полиметаллический в осадочно-вулканогенных (нойон-тологийский) и свинцово-цинковый колчеданный в терригенно-карбонатных (приаргунский) породах, даны характерные геологические и минералого-геохимические особенности каждого типа оруденения. Перспективам обнаружения серебро-полиметаллического оруденения нойонтологийского типа в пределах Александрово-Заводского рудного узла уделено внимание в докладе Н.Н.Богославца, а свинцово-цинкового приаргунского типа в пределах Кадаинского рудного узла – в докладе С.В.Алеко и А.А.Петухова.

М.В.Тучина с соавторами (ЦНИГРИ) осветила состояние и перспективы развития минерально-сырьевой базы медных предприятий Южного и Среднего Урала. Показано, что приросты запасов колчеданных месторождений не существенны и не обеспечивают воспроизводство цветных металлов. Значительную роль в этом аспекте на Урале стали играть медно-порфировые месторождения (Михеевское, Томинское). Прогнозно-поисковые работы проводятся на Южно-Подольском колчеданном рудопроявлении (Ю.В.Никешин и др., ЦНИГРИ) и Сибайском рудном поле, где выделены и количественно оценены два уровня оруденения, что позволило реко-

мендовать перспективный объект для поисков оруденения (М.В.Татарко, ЦНИГРИ).

Несколько докладов посвящены проблемам прогноза и поисков медно-порфирового оруденения. В сообщении И.Ф.Мигачёва, В.С.Звездова, Т.А.Чуриловой (ЦНИГРИ) проанализированы строение и металлогения андезитидных и базальтоидных вулканоплутонических поясов, контролирующих размещение медно-порфировых месторождений, влияние структурных условий формирования медно-порфировых штоков на морфологию и строение последних. Целенаправленно рассмотрены обстановки формирования крупных и сверхкрупных медно-порфировых месторождений в большинстве значительных вулканоплутонических поясов. Даны рекомендации по использованию полученных критериев в целях прогноза и поисков особо значимых соответствующих рудных объектов.

В докладах М.М.Гирфанова, А.В.Андреева, О.В.Авиловой, И.А.Старостина (ЦНИГРИ) представлены разработанные геолого-поисковая модель медно-порфировых объектов Кызыкчадрского рудного поля Республики Тыва и имеющая особо важное значение для прогноза и поисков оруденения схема рудно-метасоматической зональности рудопроявления Кызык-Чадр. Отмечается лентовидная в плане форма минерализованной зоны. Установлена минерализация двух сопряжённых рудно-формационных типов: золотосодержащего Мо-Си-порфирового и золото-сульфидно-кварцевого жильно-прожилкового.

Интерес у слушателей вызвали доклады о геохимических и геофизических методах поисков. Это, прежде всего, доклады С.А.Миляева и С.Г.Кряжева (ЦНИГРИ) на тему «Поисково-геохимические особенности наложенных ореолов рассеяния скрытых полиметаллических месторождений и В.С.Сенкевича (ООО «Сибгеоконсалтинг») «Глубинные геохимические поиски на флангах Мулинской впадины (Забайкальский край)». Поиски должны проводиться с использованием шнекового бурения, бурения малоглубинных скважин по профилям в совокупности с бурением глубоких скважин.

Доклад Ю.В.Воробьева, А.Д.Кузовенкова (ООО «СЗГК «Геокомплекс») посвящён геофизическим методам поисков (электроразведка, гравитаразведка, магниторазведка, спектрометрия, сейсморазведка), которые успешно используются при поисках колчеданного оруденения на Урале (Уткинское месторождение) и полиметаллического оруденения на Новой Земле (Павловское месторождение).

На Секции цветных металлов также были озвучены интересные доклады по другим видам минерального сырья. К ним относятся доклады К.В.Лобанова, Д.В.Жирова, М.В.Чичерова (ИГЕМ РАН, ГИ КНЦ РАН) «Рудносные структуры Печенгского рудного района», В.А.Истомина (ЦНИГРИ) «Литий – цветной металл XXI века»; А.В.Лаломова (ИГЕМ РАН) «Факторы формирования редкометалльных россыпей ближнего сноса и

создание компьютерной системы прогноза россыпного потенциала».

На **Секции алмазов** (фото 7) было представлено 54 доклада (из них 28 устных), затрагивающих различные проблемы воспроизводства МСБ алмазов: выделение новых площадей под поисковые работы; методические подходы, применяемые при прогнозировании алмазоперспективных площадей; совершенствование и апробация поисковых методов; геологическое изучение месторождений алмазов; изучение вещественного состава алмазоносных пород, минералов-индикаторов кимберлитов (МИК) и алмазов, а также общие проблемы, связанные с алмазообразованием.

Выделение новых площадей под поисковые работы рассмотрено в двух устных сообщениях. Доклад *Ю.К.Голубева* с соавторами (ЦНИГРИ) посвящён результатам анализа материалов геолого-геофизической изученности территории Архангельской области за 2018 г. Для проведения поисковых работ на коренные источники алмазов рекомендованы Ручьевская, Рочевская и Плесецкая площади. Отмечена необходимость количественной переоценки прогнозных ресурсов кат. Р₃ в сторону уменьшения, что обусловлено, с одной стороны, высокой степенью изученности отдельных площадей, где уже маловероятно обнаружение крупных месторождений, с другой, существенной недоизученностью иных площадей. Последнее требует постановки на ряде площадей прогнозно-минерагенических работ.

В докладе *Е.В.Проценко* и *А.В.Толстова* (НИГП АК «АЛРОСА») обосновывается необходимость вовлечения в опоскование перспективных на выявление алмазоносных кимберлитовых полей территории Сибирской платформы, обрамляющих Патомско-Вилуйский авлакоген: фланги Вилуйско-Мархинской зоны, в пределах которых выделены Юлегирская и Верхнемурбайская площади, а также Чаро-Синская минерагеническая зона, контролирующая новые прогнозируемые кимберлитовые поля. Предложена стадийность ГРР.

Методические подходы, применяемые при прогнозировании алмазоперспективных площадей, рассматривались в пяти устных докладах. В сообщении *Н.А.Прусаковой* с соавторами (ЦНИГРИ) показаны возможности выделения по комплексу глубинных геофизических факторов (с привлечением данных изучения ксенолитов из кимберлитов) в литосфере Лапландско-Беломорского гранулитогнейсового пояса (являющегося исключением из «правила Клиффорда») алмазоносной деплетированной литосферной мантии архейского возраста, что позволило положительно оценить перспективы на коренную алмазоносность как самого пояса, так и отдельных его участков. Этот подход позволил установить в пределах Зимнего Берега ряд участков, в пределах которых возможно обнаружение новых алмазоносных тел, не охваченных опоскованием в настоящее время.

Прогнозирование кимберлитового магматизма на территории Якутской алмазоносной провинции с исполь-

зованием глубинных геолого-геофизических критериев отражено в докладах *Ф.В.Мясникова*. Выделены долгоживущие кимберлитоконтролирующие структуры мантийного заложения – Далдыно-Оленёкская, Котуйканская и Мархинская, которые отнесены к минерагеническим зонам с возможной локализацией в их пределах перспективных площадей на обнаружение среднепалеозойского алмазоносного магматизма.

Е.В.Проценко и *Н.И.Горевым* (НИГП АК «АЛРОСА») указаны структурно-тектонические критерии прогнозирования площадей в пределах Вилуйско Мархинской минерагенической зоны, в заочном докладе *М.В.Мальцева* (ВГРЭ АК «АЛРОСА») – структурно-тектонические критерии локализации кимберлитов в пределах Сюльдюкарской площади.

Использование дистанционных методов при прогнозе и выделении разноранговых таксонов кимберлитового магматизма – тема доклада *Ю.Н.Серокурова* (ООО «Институт дистанционного прогноза руд»).

Проблемы алмазообразования на примере Якутской алмазоносной провинции рассмотрены в докладе *Н.П.Похиленко* с соавторами (ИГМ СО РАН) на основе изучения включений в алмазах и минералов-индикаторов кимберлитов. Сделан вывод о продуктивности на коренную алмазоносность кимберлитов исключительно среднепалеозойского возраста.

В докладе *Е.В.Щукиной* с соавторами (ИГМ СО РАН, ООО «Проекс-сервис») на основании изучения пиропов из южной части Архангельской области сделан вывод о потенциальной возможности обнаружения здесь алмазоносных кимберлитов.

Совершенствованию и апробации различных поисковых методов, в том числе при работе на эталонных объектах (месторождениях) и новых площадях, повышению эффективности работ посвящён ряд докладов.

Так, геофизическим методам поисков кимберлитов, эффективности аэромагнитной съёмки и электроразведочных технологий (метода переходных процессов (АМПП)) уделено внимание в двух докладах *П.С.Бабаянца* с соавторами (ГНПП «Аэрогеофизика»). Были изучены возможности применения различных аэрогеофизических методов при поисках алмазных месторождений. Отмечена необходимость апробации метода АМПП для поисковых работ в Архангельской области. Данный метод показал высокую эффективность его использования в Якутии и Африке. Вероятность применения метода при поисках алмазных месторождений в Архангельской области, а также эффективность электроразведки в целом, рассматриваются в докладах *И.И.Микоева* и *М.М.Лантева* (ЦНИГРИ).

В сообщении *А.Д.Кузовенкова* с соавторами (ООО «СЗГГК «Геокомплекс») описываются электроразведочные работы методом ВП (вызванной поляризации), который был апробирован на трубке Катока в Анголе. Показываются возможности оценки потенциальной алмазоносности с помощью этого метода.



Фото 7. Заседание секции алмазов

Н.Ф.Скопченко с соавторами (ЗАО КЦ «Росгеофизика») рассмотрел применение нейтронной съемки на эталонных трубках Зимнебережного района Архангельской области. Метод регистрации свободных нейтронов используется в комплексе с геоэлектрическими методами и газовой съёмкой.

П.А.Игнатов (МГРИ-РГГРУ) с соавторами на примере изучения керна поисковых скважин в пределах нового Слюдякарского кимберлитового поля привёл данные о структурных особенностях локализации кимберлитовых тел, выявлении минерализации во вмещающих породах, связанной с воздействием траппов и кимберлитов.

В заочных докладах сотрудников АК «АЛРОСА» представлены геофизические методы поисков, эффективные при поисковых работах: метод радиоволновой геоинтроскопии межскважинного пространства (РВГИ), применяющийся в Западной Якутии и эффективный в условиях мощных неоднородных перекрывающих кимберлитовые трубки отложений; аудиомангнитотеллурическое зондирование (АМТЗ), используемое при решении структурно-картировочных задач, выделении высокоомных узколокальных зон, отождествляемых с разрывными нарушениями, контролирующими кимберлитовые тела.

В нескольких сообщениях охарактеризованы особенности геологического строения коренных месторождений алмазов. Доклад *Р.Н.Пенделяка* с соавторами (АО «АГД Даймондс») посвящён трубке им. В.Гриба (Архангельская область). Были показаны её отражение в геофизических полях и особенности вскрытия поисковыми скважинами. *Ф.В.Каминский* (ГЕОХИ РАН) доложил о строении месторождения алмазов Гуаниамо (штат Боливар, Венесуэла), представленного кимберлитовыми силами позднепротерозойского возраста. В докладе *С.М.Саблукова* с соавторами (ООО ИНПК «РУСГЕО») рассматриваются строение и вещественный состав кор

выветривания на кимберлитах Накынского месторождения алмазов. В заочном докладе *В.Т.Подвысоцкого* (ЖГТУ, Украина) дана информация о позднепротерозойских алмазоносных конгломератах района Диямантина (штат Минас-Жерайс, Бразилия).

Некоторые доклады в той или иной мере освещают проблемы происхождения алмазов из северных россыпей Якутии. Так, в докладе *В.П.Афанасьева* (ИГМ СО РАН) рассматривается распределение алмазов V–VII разновидности в северных россыпях и делается вывод об их возможном переотложении из протерозойских коллекторов. В докладе *А.И.Дака* (СНИИГТиМС) приведены данные о широком распространении в северной части Западной Якутии однотипных по составу пикроильменитов, которые могут быть связаны с неизвестными источниками. В заочном докладе *И.Н.Богущи* с соавторами (НИГП АК «АЛРОСА») сообщено об алмазах II разновидности, встречающихся в россыпях северо-восточной части Сибирской платформы, которые предположительно могут быть связаны с неизвестным типом коренных источников, на территориях Среднеолёнского и Куонамского алмазоносных районов.

Проблеме оценки алмазоносности месторождений и потенциальной алмазоносности источников на основании изучения вещественного состава МИК посвящены доклады *И.В.Ащепкова* с соавторами (ИГМ СО РАН), *С.К.Симакова* (ООО «АДАМАНТ», резидент Сколково, Санкт-Петербург), *Ю.Б.Стегницкого*, *А.С.Иванова*, *О.В.Тарских* с соавторами (НИГП АК «АЛРОСА»). *Ю.Ю.Голубева* (ЦНИГРИ) предлагает использование валового вещественного состава кимберлитов при оценке их алмазоносности.

Ряд докладов посвящён изучению алмазов и МИК изместорождений и проявлений алмазоносного магматизма. Результаты изучения алмазов из трубки Удачная представлены в докладе *Д.В.Конюковой* с соавторами (МГУ); МИК из трубок Зимнебережного поля – *Е.А.Тор-*

буновой (МГУ), из аптских образований Воронежской антеклизы – *А.В. Черешинским* (ВГУ). Методика исследования МИК с помощью ИК-Фурье микроскопа и возможности этого метода при диагностике минералов рассмотрены *Г.К. Хачатрян* (ЦНИГРИ).

Общим вопросам алмазообразования посвящены три доклада. *Н.А. Божко* (МГУ) анализирует распространение алмазоносного кимберлитового и лампроитового магматизма во времени и связь усиления магматической активности с суперконтинентальной цикличностью – с фазами распада и сборки суперконтинентов. *В.А. Кривицким* (МГУ) рассматриваются вещественная составляющая тепловой энергии, сопутствующей всем геотектоническим процессам, в частности геохимическим, которые сопровождают подъём плюма – образование лёгких химических элементов (водорода, гелия, углерода, азота, кислорода), возможность использования лёгких элементов при нейтронной съёмке. *Н.И. Горевым* (НИГП АК «АЛРОСА») изучены вопросы механизма внедрения кимберлитовой магмы.

По итогам заслушанных докладов, а также последующей дискуссии было констатировано следующее: в ближайшее время в Российской Федерации неизбежно произойдёт падение добычи алмазов, в первую очередь из наиболее рентабельных месторождений; данная проблема особенно рельефно отражена во внепрограммном сообщении *С.И. Митюхина* (ООО «Алмазинтех»); необходима переоценка прогнозных ресурсов кат. Р₃ на основании создания прогнозных карт с учётом современных представлений о локализации алмазоперспективных площадей; при дефиците площадей под постановку поисковых работ необходимо проведение опережающих геолого-геофизических исследований в рамках прогнозноминерагенических работ, нацеленных на обоснование новых алмазоперспективных площадей.

Завершающим этапом работы Конференции стал выездной семинар, в котором приняли участие представители ПАО «Высочайший» (GV Gold), АО «Полиметалл», ТОО «Казцинк» и ФГБУ «ЦНИГРИ»

Программа семинара включала в себя посещение двух типовых золоторудных (Новофирсовское, Мурзинское) и четырёх полиметаллических (Корбалихинское, Степное, Зареченское, Змеиногорское) месторождений Рудного Алтая.

Рудноалтайские колчеданно-полиметаллические месторождения по комплексу характеристик относятся к колчеданным месторождениям в вулканогенных ассоциациях (VMS). Корбалихинское, Степное, Зареченское и Змеиногорское месторождения могут рассматриваться как эталонные объекты рудноалтайского типа и относятся к двум субформациям: свинцово-цинковой колчедансодержащей и медно-свинцово-цинковой колчеданной.

Был составлен путеводитель, в котором отражены основные аспекты геологического строения месторождений, региона в целом и история освоения Рудного Алтая.

Основной целью выездного семинара был обмен опытом между коллегами, знакомство с особенностями поисков, разведки, добычи и переработки золота и полиметаллов, а также обсуждение возможного расширения сотрудничества в этой сфере.

Участники семинара в сопровождении сотрудников ФГБУ «ЦНИГРИ» и АО «СНИИГГиМС» посетили месторождения, высоко оценив уровень производства на них, осмотрели карьеры, рудные склады и геологические музеи. Коллеги отметили, что выездные семинары на уникальные месторождения делают конференции ФГБУ «ЦНИГРИ» привлекательными для широкого круга как российских, так и зарубежных специалистов.



Фото 8. На Змеиногорском месторождении

Прогнозные ресурсы твёрдых полезных ископаемых и их аналоги в мировой практике

В.Б.ГОЛЕНЕВ, Д.А.КУЛИКОВ (Федеральное государственное бюджетное учреждение «Центральный научно-исследовательский геологоразведочный институт цветных и благородных металлов» (ФГБУ «ЦНИГРИ»); 117545, г. Москва, Варшавское шоссе, д. 129, корп. 1)

Приведён обобщённый обзор выделяемых в настоящее время в мировой практике аналогов российских прогнозных ресурсов твёрдых полезных ископаемых и основных принципов их классификации. Также представлен один из вариантов сопоставления российских прогнозных ресурсов с аналогичными категориями наиболее широко использующихся в мире классификаций (основные критерии сопоставления – степень экономической жизнеспособности проекта, степень достоверности геологической информации, обусловленной видами и масштабом выполненных работ, оценка осуществимости добычи).

Ключевые слова: прогнозные ресурсы, результаты геологоразведочных работ, Inferred Mineral Resources, Exploration Results, Exploration Target.

Голенев Владимир Борисович
доктор геолого-минералогических наук



golenev_vb@mail.ru

Куликов Данила Алексеевич
кандидат геолого-минералогических наук

kulikov@tsnigri.ru

Estimating Inferred Resources and their equivalents: worldwide practice

V.B.GOLENEV, D.A.KULIKOV (Central Research Institute of Geological Prospecting for Base and Precious Metals)

The article includes a summary review of the Russian «Inferred Resources» equivalents that are currently identified in various regions of the world and their main classification principles. The article also provides a possible way of comparing the Russian «Inferred Resources» with the equivalent categories of the most widely used classifications. The main comparison criteria are project economic efficiency; reliability of the geological data based on the types and scale of the work; evaluation of possible extraction.

Key words: Inferred Resources, Geological Exploration Results, Inferred Mineral Resources, Exploration Results, Exploration Target.

Прогнозные ресурсы – количество твёрдого полезного ископаемого в единицах массы, предполагаемое в земной коре в границах месторождений и за их пределами по совокупности геологических, геохимических, геофизических и других признаков, отдельных горно-буровых пересечений, а также по аналогии, отвечающее текущим и перспективным требованиям промышленности, и которое может быть переведено в запасы при положительных результатах более детальных геологоразведочных работ.

Согласно «Классификации запасов и прогнозных ресурсов твёрдых полезных ископаемых», утверждённой приказом МПР РФ от 11 декабря 2006 г. № 278 и введённой в действие с января 2008 г. (далее классификация), по степени обоснованности прогнозные ресурсы подразделяются на три категории: P_1 , P_2 , P_3 .

Классификация [2] прогнозных ресурсов увязана со стадийностью, масштабом и комплексом выполненных геологоразведочных работ, металлогеническим рангом прогнозируемого объекта.

Прогнозные ресурсы категории P_1 учитывают возможность расширения границ распространения полезного ископаемого за контуры запасов категории C_2 или выявления новых тел полезного ископаемого на проявлениях и месторождениях. Для количественной оценки ресурсов этой категории используются геологически обоснованные представления о размерах и условиях залегания известных тел, количестве и качестве полезного ископаемого. Оценка ресурсов основывается на результатах поисковых работ масштаба 1:10 000 (редко 1:25 000) и крупнее, включающих геологическое картирование, бурение скважин и проходку горных

выработок, геофизические и геохимические исследования участков недр возможного нахождения полезного ископаемого, а в пределах месторождений, в том числе и на геологической экстраполяции структурных, литологических, стратиграфических и других особенностей, установленных на более изученной их части, ограничивающих площади и глубину распространения полезного ископаемого, представляющего промышленный интерес.

Прогнозные ресурсы категории P_2 учитывают возможность обнаружения в рудном районе, узле, поле новых месторождений, предполагаемое наличие которых основывается на положительной оценке выявленных проявлений полезного ископаемого, а также геофизических и геохимических аномалий, природа и возможная перспективность которых установлены единичными выработками. Количественная оценка прогнозных ресурсов, представления о размерах предполагаемых месторождений, минеральном составе и качестве полезного ископаемого основаны на комплексе его прямых и косвенных признаков, на материалах отдельных пересечений, а также на аналогии с известными месторождениями того же рудно-формационного (геолого-промышленного) типа. Выявляются при поисках масштаба 1:10 000–1:25 000, частично 1:50 000 геологической съёмке с поисковыми работами и (в отдельных случаях) при геологической съёмке с комплексом прогнозно-поисковых работ, геолого-минерагеническим картированием масштаба 1:200 000. Прогнозные ресурсы в количественном выражении с привязкой к локальным площадям служат основой для постановки детальных поисковых работ.

Прогнозные ресурсы категории P_3 учитывают потенциальную возможность открытия месторождений того или иного вида полезного ископаемого на основании благоприятных геологических и палеогеографических предпосылок, выявленных в оцениваемом районе при средне-мелкомасштабных дистанционных аэрокосмических и наземных геолого-съёмочных, геофизических и геохимических работах. Оцениваются при геолого-съёмочных работах масштаба 1:200 000 с комплексом прогнозно-поисковых работ, геолого-минерагеническим картированием масштабов 1:200 000 и 1:500 000, а также по итогам геологического картографирования масштаба 1:1 000 000. Их количественная оценка проводится без привязки к конкретным объектам. Количественно оценённые ресурсы служат основанием для постановки геологического картографирования масштаба 1:50 000 и поисковых работ более крупного масштаба.

Экономическая значимость прогнозных ресурсов определяется кондиционной принадлежностью прогнозируемых объектов, которая не определена классификацией [2]. На практике к кондиционным относятся прогнозные ресурсы, которые в обозримой перспективе могут быть переведены в балансовые запасы при положительных результатах более детальных гео-

логоразведочных работ. Кондиционные прогнозные ресурсы подлежат государственному учёту, для них определяется очерёдность проведения геологоразведочных работ последующих стадий, в том числе за счёт средств федерального бюджета, и целесообразность лицензирования. В некоторых случаях в результате геологоразведочных работ может быть локализовано количество полезного ископаемого, не отвечающее минимальным требованиям промышленности либо не являющееся перспективным для изучения по другим обстоятельствам, которое можно квалифицировать как «некондиционные» прогнозные ресурсы. К некондиционным относятся прогнозные ресурсы, перевод которых в обозримой перспективе в балансовые запасы не возможен по геологическим обстоятельствам (положение, количество и качество полезного ископаемого) и (или) модифицирующим факторам (горнотехнические, технологические, металлургические, экономические, маркетинговые, социальные, инфраструктурные, экологические, правовые, налоговые, политико-административные условия и другие (не геологические) обстоятельства, которые могут повлиять на эффективность добычи, обогащения, передела и сбыта полезного ископаемого и продуктов его переработки). Некондиционные прогнозные ресурсы не подлежат государственному учёту, и продолжение геологоразведочных работ на таких объектах в обозримой перспективе нецелесообразно.

Экономическое значение (кондиционная принадлежность) прогнозных ресурсов категорий P_1 и P_2 определяется: по новым объектам (без запасов) геолого-экономической оценкой по укрупнённым показателям – технико-экономическое соображение (ТЭС), технико-экономический расчёт (ТЭР), – представляющей сочетание прямых экономических расчётов и оценки по аналогии; по месторождениям – по аналогии, сравнением модифицирующих факторов, положения, количества и качества прогнозных ресурсов с показателями разведочных кондиций для запасов этого же месторождения. Достоверность экономической оценки прогнозных ресурсов категории P_2 ниже, чем P_1 , в связи с более низким уровнем обоснованности модифицирующих факторов, положения, количества и качества полезного ископаемого. При этом прогнозные ресурсы всех категорий не участвуют в разработке технико-экономического обоснования (ТЭО) разведочных кондиций, но являются основой для планирования перспектив по возможности увеличения производительности предприятия и продления срока его существования, а также учитываются при выборе площадей для размещения объектов инфраструктуры.

Количество и качество прогнозных ресурсов категории P_3 отражаются в геологическом отчёте о результатах геологоразведочных работ соответствующей стадии без составления ТЭС, ТЭР. Прогнозные ресурсы этой категории априори являются экономически значимыми

с позиции целесообразности постановки более детальных геологоразведочных работ, так как их параметры принимаются по аналогии с балансовыми запасами месторождений (апробированными кондиционными прогнозными ресурсами категории P_1 проявлений) полезного ископаемого того же геолого-промышленного типа, находящихся в сходных с прогнозируемыми новыми объектами географо-экономических условиях. Однако могут быть отнесены к некондиционным по некоторым модифицирующим факторам, например, если они расположены на закрытых для добычи территориях заповедников, населённых пунктов и др.

Положение, количество и качество прогнозных ресурсов определяются геологическими наблюдениями прямых и косвенных признаков наличия полезного ископаемого или по аналогии сравнением степени подобия геолого-структурных, металлогенических и других признаков нахождения полезного ископаемого эталонного объекта с такими же признаками прогнозируемого объекта. Модифицирующие факторы для прогнозных ресурсов определяются в основном по аналогии, и только для новых, нетрадиционных геолого-промышленных типов, технологий и способов добычи и переработки полезного ископаемого – прямыми наблюдениями, объёмы которых ограничены и уменьшаются согласно снижению категории по обоснованности.

Геологическая обоснованность прогнозных ресурсов снижается от категории P_1 к P_3 . Это связано с комплексом и масштабом геологоразведочных работ, обычно применяемыми при изучении перспективных объектов на разных стадиях. Прогнозные ресурсы категории P_1 наиболее достоверны, так как в большей степени, чем другие категории, базируются на результатах горно-буровых работ, P_2 менее достоверны и базируются на результатах геологического картирования, геофизических и геохимических исследований при единичных горных (канавы, шурфы) пересечениях и скважинах, P_3 имеют самую низкую достоверность, базируются на результатах региональных работ (дистанционные аэрокосмические методы, геологическое картирование, геолого-структурные, палеогеографические и другие построения, геохимические и геофизические исследования) при практическом отсутствии горных выработок и скважин.

Прогнозные ресурсы имеют аналоги в соответствующих классификациях основных стран с развитой горнодобывающей промышленностью:

1) обобщающий стандарт CRIRSCO (Денверского союза 1997 г.), куда входят классификации: австралийская JORC (Австралийско-Азиатский стандарт, разработанный Объединённым комитетом по запасам руды Австралийско-Азиатского института горного дела и металлургии, Австралийского института геолого-геофизических исследований и Австралийского совета по минеральному сырью), общеевропейская Reporting

Code (PERC), канадская CIM, разработанная Канадским институтом горного дела, металлургии и нефти, отражённая в канадском стандарте National Instrument 43-101, американская (США) SME Guide, 2007, южноафриканская SAMREC, чилийская IMEC и др.;

2) «Рамочная классификация ископаемых энергетических и минеральных запасов и ресурсов Организации Объединённых Наций» (UNFC-2009) для инвентаризации международных минеральных ресурсов;

3) «Классификация ресурсов/запасов твёрдого топлива и минерального сырья» GB/T 17766-1999 Китайской Народной Республики;

4) Индийская Indian national mineral resource (IS-12595:1989).

Один из возможных вариантов соотношения кондиционных прогнозных ресурсов с некоторыми мировыми аналогами приведён в табл. 1, а сопоставление основных критериев, используемых для квалификации прогнозных ресурсов по категориям обоснованности и их некоторых мировых аналогов, – в табл. 2.

Как и классификация прогнозных ресурсов в Российской Федерации, стандарты CRIRSCO [4, 9] базируются на критерии геологической обоснованности (изученности), по которой наблюдается довольно близкая корреляция классификаций. Экономическая значимость прогнозируемого объекта и жизнеспособность проекта освоения, так же как и кондиционная принадлежность прогнозных ресурсов в классификации РФ, напрямую не участвуют в определении категории и оцениваются Компетентным лицом, не уступая по детальности проработки модифицирующих факторов, сложившейся в РФ практике геолого-экономической оценки прогнозных ресурсов. Стадийность и масштаб работ, в отличие от российских стандартов, напрямую не участвуют в классификациях, но косвенно учитываются при определении геологической обоснованности, исходя из возможности используемых поисковых методов выявлять прямые или косвенные признаки наличия полезного ископаемого.

Прогнозные ресурсы категории P_1 (при реальной перспективе рентабельного освоения в обозримый период) сопоставляются по геологической и экономической обоснованности с предполагаемыми минеральными ресурсами (Inferred Mineral Resources) классификаций стандартов CRIRSCO [3, 4, 6, 11–13].

Inferred Mineral Resources (предполагаемые минеральные ресурсы) – количество и качество полезного ископаемого оценены с невысокой степенью достоверности на основании ограниченных геологических данных и проб. Контур, сплошность тел и характер распределения показателей качества полезного ископаемого предполагаются, но не проверены и не доказаны. Геологическая информация получена в результате применения соответствующих виду полезного ископаемого методов при изучении по нерегулярной сети выходов коренных пород, горных выработок и скважин.

1. Один из возможных вариантов сопоставления прогнозных ресурсов твёрдых полезных ископаемых с некоторыми мировыми аналогами

Российская Федерация	CRIRSCO (Австралия, США, Канада, ЮАР, европейский союз и др.)	UNFC-2009 (ООН)	GB/T 17766-1999 (КНР)	IS-12595:1989 (Индия)
Известные месторождения				
P ₁	Inferred*	3.2, 2.2, 3	333	Possible
P ₂	Exploration Target	3.2, 2.3, 3	?34	Prospective
Новые объекты				
P ₁	Inferred	3.2, 3.1, 4	333	Possible
P ₂	Exploration Target	3.2, 3.2, 4	?34	Prospective
P ₃	Exploration Results	3.2, 3.3, 4	Эквивалент отсутствует	Prognostic

Примечание. *Эквивалентом этой же категории только на известных месторождениях вместе с прогнозными ресурсами P₁ могут быть запасы категории C₂, подсчитываемые на стадии оценка при отсутствии запасов более высоких категорий, участков детализации и иных работ по определению достоверности запасов категории C₂.

При этом объём такой информации ограничен или отсутствует уверенность в её качестве и достоверности. Из-за низкого уровня достоверности геологической информации Inferred не используются для определения технико-экономических параметров отработки при оперативном планировании развития горных работ (Pre-Feasibility Study, Feasibility Study аналоги ТЭО временных и постоянных разведочных кондиций РФ) и поэтому не могут переводиться в ту или иную категорию запасов (Reserves) руды. С достаточной уверенностью можно ожидать, что при более детальных геологоразведочных работах большая часть Inferred будет переведена в более достоверные и обоснованные Indicated Mineral Resources. Участки недр, не имеющие реальных перспектив для рентабельной эксплуатации в обозримый период (аналог некондиционных прогнозных ресурсов категории P₁), в состав Inferred не включаются.

В классификациях минеральных ресурсов стран, где действует стандарт CRIRSCO, эквиваленты категорий P₂ и P₃ не выделяются, хотя в отдельных стандартах, гармонизированных с CRIRSCO, можно найти «частичные» эквиваленты, например, «целевые ориентиры геологоразведочных работ» в Кодексе JORC [3]. В качестве эквивалента прогнозных ресурсов категории P₂ авторы статьи рассматривают Exploration Target (или Exploration Potential), а P₃ – Exploration Results, которые выходят за рамки классификаций и упоминаются только в соответствующих стандартах геологической отчётности.

Начиная с самых ранних этапов изучения недр до тех пор, пока полнота изученности не позволит с уверенностью, соответствующей требованиям Inferred Mineral Resources, оценить количество и качество полезного ископаемого, любая информация об объекте представляется в обязательной геологической отчётности о результатах геологоразведочных работ (например, отчётности по запасам и ресурсам Австралийской (ASX) или новозеландской (NZX) фондовых бирж) как Exploration Results (результаты исследований) или Exploration Information (информация об исследованиях). К Exploration Results относятся как общая информация о металлогении, геолого-структурной позиции и возможном геолого-промышленном типе изучаемого объекта, так и качественная или приближённо количественная оценка предполагаемого масштаба проявления полезного ископаемого. При этом термины «ресурсы» (Resources) и «запасы» (Reserves) во избежание неправильного истолкования при описании объектов, для которых невозможно с уверенностью, соответствующей требованиям к минеральным ресурсам, оценить количество и качество полезного ископаемого, не употребляются.

В некоторых стандартах отчётности Exploration Results представляют собой неделимое понятие, например, в канадском стандарте CIM [6, 10]. Однако в большинстве случаев предусмотрен набор терминов, позволяющих разделить объекты по степени изученности на ранних стадиях. Так, в стандартах JORC [3], SAMREC [13], SME [12] и CRIRSCO [4, 9] наряду с Exploration

2. Сопоставление основных критериев, используемых для квалификации прогнозных ресурсов твёрдых полезных ископаемых и их некоторых мировых аналогов по категориям обоснованности

Классификация (страна)	Категории	Стадии (этапы) и масштаб работ	Степень экономической целесообразности	Степень геологической достоверности
Российская Федерация	P ₁	Месторождения – поиски, оценка и разведка; новые объекты – поиски (масштаб 1:10 000 и крупнее, крайне редко 1:25 000)	Категория P ₁ и некоторые мировые аналоги На новых объектах кондиционная принадлежность определяется вместе с категорией P ₂ геолого-экономической оценкой (ТЭС, ТЭР=англ. Scoring Study) по выявленным параметрам, аналогии и укрупнённым показателям; на месторождениях в ТЭО не учитываются, но рассматриваются как перспективная сырьевая база увеличения производительности и продления срока существования горнодобывающего предприятия и учитываются при выборе площадей для размещения объектов инфраструктуры	Достаточно для оценки возможности расширения границ распространения полезного ископаемого за контуры запасов C ₂ или выявления новых рудных тел на рудопроявлениях и месторождениях; для количественной оценки используются геологически обоснованные представления о масштабе, условиях залегания, сортности и качестве полезного ископаемого, базирующиеся на данных горно-буровых работ и опробования, в меньшей степени – геологического картирования, геофизических и геохимических работ, экстраполяции структурных, литологических, стратиграфических и других особенностей, установленных на более изученных участках
CRIRSCO, CIM (Канада), PERC (европейский стандарт), JORC (Австралия), SME (США), SAMREC (ЮАР)	Inferred Mineral Resources.	Масштаб не определён, разведка нижнего уровня (англ. Grassroot Exploration Project): бурение, каналы, шурфы, геофизические и геохимические работы, рядовое опробование и технологические исследования	Предварительная с высокой степенью риска без детального обоснования модифицирующих факторов экономическая оценка разумных перспектив эффективности освоения по вопросам, влияющим на выбор системы разработки, технологий добычи, обогащения и переработки полезного ископаемого; чтобы подчеркнуть низкую точность оценки, результаты представляются как «порядок величины»; участки недр, которые не имеют реальных перспектив для рентабельной эксплуатации в обозримый период, в состав Inferred Mineral Resources не включаются*	Количество и качество полезного ископаемого оцениваются на основе ограниченных геологических данных и опробования выходов на поверхность, траншей, шурфов, подземных выработок и скважин или экстраполяции за пределы детально изученного участка недр; геологические данные достаточны для предположения, но не для однозначного доказательства геологической непрерывности тел полезного ископаемого, масштабов и характера распределения показателей качества; неопределённость подчеркивают, называя оценку вычислением, округляя количество полезного ископаемого до 2 значимой цифры, используя термин «приблизительно»
UNFC-2009 (ООН)	3.2, 2.2, 3	Некоммерческие проекты на известных месторождениях	E3.2 F2.2 для рентабельной добычи и сбыта имеются приемлемые перспективы, но для достоверного определения экономической и иной целесообразности добычи не достаёт информации	G3 – оценка основана главным образом на прямых данных: геологическое картирование масштаба 1:10 000 и крупнее, геохимическое опробование по первичным ореолам рассеяния, наземные геофизические работы, каротаж скважин, горные работы (каналы/шурфа) и бурение по сети, опробование, количество и качество полезного ископаемого определяются по геологическим данным и опробованию с низким уровнем достоверности
	3.3, 2.2, 3		E3.3 F2.2 на основе реалистичных прогнозов будущих рыночных условий в настоящее время считается, что для рентабельной добычи и сбыта нет приемлемых перспектив в обозримом будущем	

Продолжение табл. 2

Классификация (страна)	Категории	Стадии (этапы) и масштаб работ	Степень экономической целесообразности	Степень геологической достоверности
UNFC-2009 (ООН)	3.2, 3.1, 4	Геологоразведочные проекты на новых объектах (масштаб 1:10 000)	Категория Р ₁ и некоторые мировые аналоги	
			E3.2 F3.1 выявлена потенциальная возможность обнаружения отдельного месторождения, и существует необходимость продолжения более детальных работ для подтверждения наличия такого месторождения в таких форме, качестве и количестве полезного ископаемого, что это позволит провести оценку обоснованности добычи	G4 – ни один проект добычи и переработки сырья не осуществим в связи с высокими рисками, связанными со значительным диапазоном неопределённости и низкой достоверностью оценки количества и качества полезного ископаемого, основанной на прямых данных; должны быть документально рассмотрены полный диапазон неопределённости в отношении размеров потенциального месторождения, возможность (вероятность) того, что потенциальное месторождение будет иметь коммерческое значение
	3.3, 3.1, 4		E3.3 F3.1 не выявлена потенциальная возможность обнаружения отдельного месторождения и нет необходимости продолжения более детальных работ	
GB/T 17766-1999 (КНР)	Предполагаемые установленные ресурсы (333)	Предварительные работы (небольшая часть 333)	Простая технико-экономическая оценка по общим промышленным индексам	
		Поиски (большая часть 333)	Концептуальная проработка проекта по общим промышленным индексам	Цель – найти потенциальное месторождение (залежь) полезного ископаемого и принципиальная оценка осуществимости добычи
		Общая разведка (основная часть 333)	Предварительные технико-экономические исследования (отработка экономически целесообразна в обозримом будущем) или концептуальная проработка проекта по проверенным промышленным индексам (принципиальная оценка осуществимости добычи)	Цель – вывод о промышленном значении месторождения. Основная часть потенциала объекта должна быть изучена для возможности квалификации по фактическим данным со средней (332) и низкой (333) степенью достоверности и оставшая – по косвенным данным (?34); если объект не имеет промышленной ценности, проект завершается без регистрации ресурсов в национальной базе
IS-12595:1989 (Индия)	Possible Identified Resources	Детальная разведка (небольшая часть 333)	ТЭО, предварительные технико-экономические исследования или концептуальная проработка проекта по проверенным промышленным индексам	
		Редко при общем предварительном изучении II подстанции масштабов 1:25 000–1:12 500	Первоначальная геолого-экономическая или другая аналогичная оценка проекта; какие-либо технико-экономические исследования, оценка экономической эффективности вовлечения ресурсов в хозяйственный оборот, как правило, не проводятся	Достаточно для первого приближения к количественной коммерческой оценке потенциального месторождения, основанной на: предполагаемой выдержанности промышленной минерализации, устанавливаемой по геологическим признакам, опробованию по очень редкой либо неравномерной сети, геологической интерпретации результатов геофизических и геохимических работ, аналогии с месторождениями того же геолого-промышленного типа
		В основном при ре-пиональных работах масштабов 1:2 000 и крупнее		

Продолжение табл. 2

Классификация (страна)	Категории	Стадии (этапы) и масштаб работ	Степень экономической целесообразности	Степень геологической достоверности
Российская Федерация	P ₂	Рудные поля месторождений – поиски масштабов 1:25 000–1:10 000, новые объекты – геологическая съёмка и поиски масштабов 1:10 000–1:50 000, редко геологическая съёмка с прогнозными поисковыми работами масштаба 1:200 000	На новых объектах кондиционная принадлежность определяется вместе с категорией P ₁ геолого-экономической оценкой (ТЭС, ТЭР=ингл. Scoring Study) или отдельно (концептуальная оценка) по выявленным параметрам, аналогии и укрупнённым показателям; на месторождениях в ТЭО не учитываются, но рассматриваются как перспективная сырьевая база увеличения производительности и продления срока существования горнодобывающего предприятия и учитываются при выборе площадей для размещения объектов инфраструктуры	Достаточно для оценки возможности обнаружения с привязкой к локальным площадям новых месторождений, предполагаемое наличие которых основывается на положительной оценке проявлений полезного ископаемого, геофизических и геохимических аномалий, природы и возможная перспективность которых установлены единичными выработками; количественная оценка прогнозных ресурсов, представления о минеральном составе и качестве полезного ископаемого основаны на комплексе прямых и косвенных признаков, на отдельных пересечениях и аналогии с известными месторождениями прогнозируемого рудно-формационного (геолого-промышленного) типа
	Exploration Target	Геолого-съёмочные, наземные геохимические и геофизические, буровые и горные работы, опробование, сопоставимые с российскими поисками масштабов 1:50 000 и 1:25 000	Оценка экономической целесообразности не производится, модифицирующие факторы не применимы, приводится информация по всем вопросам, которые могут повлиять на представления инвестора о стоимости участка или на его суждения о значимости результатов проведенных геологоразведочных работ	Высказывание о потенциале объекта (с указанием, что данные приближительны, чтобы подчеркнуть уровень неопределённости используется термин «около») и оценка этого потенциала в виде диапазона значений (в тоннах, единицах содержания или качественных значениях) при условии, что геологическая позиция объекта определена, но объём проведенных геологоразведочных работ недостаточен для оценки Mineral Resources и выяснения – приведёт ли дальнейшие работы на объекте к выявлению Mineral Resources
	Exploration Information Exploration Target	Не являются самостоятельной основой Scoring Study, но участвуют в ней вместе с более достоверными ресурсами с указанием доли и очередности освоения	Не являются самостоятельной основой Scoring Study, но участвуют в ней вместе с более достоверными ресурсами с указанием доли и очередности освоения	Не определено
UNFC-2009 ООН	3.2, 2.3, 3	Некоммерческие проекты на известных месторождениях	E3.2 F2.3 для рентабельной добычи и сбыта имеются приемлемые перспективы, но для достоверного определения экономической и иной целесообразности добычи не достаёт информации, которая может быть получена во вторую очередь	
	3.3, 2.3, 3		E3.3 F2.2 на основе реалистичных прогнозов будущих рыночных условий считается, что для рентабельной добычи и сбыта нет перспектив в обозримый период	

Продолжение табл. 2

Классификация (страна)	Категории	Стадии (этапы) и масштаб работ	Степень экономической целесообразности	Степень геологической достоверности
UNFC-2009 ООН	3.2, 3.2, 4	Геологоразведочные проекты на новых объектах (масштаб 1:50 000, 1:25 000)	Категория P ₂ и некоторые мировые аналоги E3.2 F3.2 выявлена потенциальная возможность обнаружения месторождений в каком-либо районе геологической провинции, однако для достаточной уверенности в этом необходимо продолжение геологоразведочных работ по подтверждению наличия месторождений	G4 – оценка главным образом по косвенным данным: дистанционные аэрокосмические методы, наземная геофизическая съёмка, литогеохимическое опробование, геологическое картирование, единичные скважины, каналы (шурфы), качественная оценка перспективности на основе предварительных полевых исследований, при наличии достаточных данных – оценка количества и качества полезного ископаемого
	3.3, 3.2, 4	Предварительные работы (в основном только ?34)	E3.3 F3.2 не выявлена потенциальная возможность обнаружения месторождений	Цель – найти участок с большим потенциалом, основная часть которого оценивается по косвенным данным (?34), иногда небольшая часть – по фактическим данным с низкой степенью достоверности (333)
	Прогнозные ресурсы, предварительно разведанные (?34)	Поиски (небольшая часть ?34) Общая разведка (очень мало ?34)	Степень экономической жизнеспособности не определяется в силу недостаточной информации; простая технико-экономическая оценка по общим промышленным индексам Концептуальная проработка проекта по общим промышленным индексам Предварительные технико-экономические исследования или концептуальная проработка проекта по промышленным индексам	
IS-12595:1989 (Индия)	Prospective Resources	В основном общее предварительное изучение II подстадии масштабов 1:25 000–1:12 500	Первоначальная геолого-экономическая или другая аналогичная оценка проекта; какие-либо технико-экономические исследования, оценка экономической эффективности вовлечения ресурсов в хозяйственный оборот, как правило, не проводятся	Достаточно для прогноза потенциала перспективных площадей на основе экстраполяции геологически благоприятных условий локализации известных месторождений, выявленных геофизических и геохимических аномалий, минерализованных зон и других косвенных признаков полезного ископаемого, возможные перспективы которых на выявление месторождения подтверждены единичными горными выработками или скважинами
Российская Федерация	P ₃	Новые объекты – региональные работы и геологическая съёмка масштабов 1:200 000–1:1 000 000, редко геологическая съёмка масштаба 1:50 000	Категория P ₃ и некоторые мировые аналоги По оценке, количеству и качеству полезного ископаемого всегда кондиционные, что обусловлено выбором в качестве аналогов месторождений с балансовыми запасами, которые находятся в сходных с прогнозируемым объектом географо-экономических условиях; но могут быть некондиционными по некоторым модифицирующим факторам	Достаточно для оценки возможности обнаружения без привязки к локальным площадям в пределах рудных районов, узлов, полей новых месторождений, предполагаемое наличие которых основывается на положительной оценке: геолого-структурной позиции, металлогении и косвенных признаков прогнозируемого полезного ископаемого, геофизических и геохимических аномалий; оценка количества и качества полезного ископаемого основаны на комплексных прямых и косвенных признаках, на аналогии с известными месторождениями прогнозируемого рудно-формационного (геолого-промышленного) типа

Окончание табл. 2

Классификация (страна)	Категории	Стадии (этапы) и масштаб работ	Степень экономической целесообразности	Степень геологической достоверности
Категория Р ₃ и некоторые мировые аналоги				
Стандарты CRIRSCO, JORC (Австралия), SME (США), SAMREC (ЮАР), PERC (общее европейский)	Exploration Results	Дистанционные аэрокосмические методы, наземные геологическая съёмка, геохимические и геофизические исследования, сопоставимые с работами масштабов 1:200 000–1:1 000 000 РФ	Экономическая неопределённость, модифицирующие факторы не применимы, оценка экономической целесообразности не производится, приводится информация по всем вопросам, которые могут повлиять на мнение инвестора о стоимости участка или на его суждения о значимости результатов геологоразведочных работ	Общая качественная оценка перспективности района; данные и информация, которые могут быть полезны инвесторам, но не входят в состав минеральных ресурсов или запасов руды (результаты геологического картирования, описания обнажений, опробования обнажений и единичных скважин и канав, геохимических и геофизических исследований, минералогическая, металлургическая и др. информация, исторические данные; оценка (качественная) масштабов и качества минерализации по аналогии с ближайшими месторождениями, если обосновано их подобие; обязательными являются хотя бы какие-то физические доказательства наличия и масштабов минерализации
Стандарт CIM (Канада)	Exploration Information			
UNFC-2009 (ООН)	3.2, 3.3, 4	Геологоразведочные проекты на новых объектах (масштаб 1:100 000 и мельче)	E3.2 F3.3 результаты региональных геологических исследований указывают на наличие благоприятных условий для потенциального открытия месторождений	G4 оценка основана на косвенных данных, полученных в ходе региональных работ: аэрокосмические методы, наземные геофизические работы, литогеохимическое опробование, геологическое картирование, опробование выходов минерализованных зон на поверхности, отбор штуфов, качественная оценка перспективности на основе предварительных геологических исследований
	3.3, 3.3, 4		E3.3 F3.3 результаты региональных геологических работ указывают на отсутствие благоприятных условий для открытия месторождений	
GB/T 17766-1999 (КНР)			Эквивалент отсутствует	
IS-12595:1989 (Индия)	Prognostic Resources	Общее предварительное изучение I подстадии масштабов 1:50 000 и мельче	Собранная геологоразведочная информация может быть полезной при первоначальной геологической или другой аналогичной оценке проекта	Достаточно для обоснования перспектив дальнейшего изучения на основе геологического картирования, региональных геохимических и геофизических исследований, дистанционных методов зондирования

Примечание. *В Scoring Study: по CRIRSCO, CIM, не включаются, по SAMREC, SME, включаются с пояснениями, что оценка не гарантирует экономического развития и выполнена на данных по оцениваемому проекту и месторождениям-аналогам или аналогичным операциям, по PERC, учитываются при планировании, проектировании предприятия и экономических исследованиях как часть Mineral Resources (при сравнении результатов «с» и «без»), но не служат самостоятельной основой Scoring Study, по JORC, могут включаться с указанием доли в общих минеральных ресурсах и последовательности освоения, но не являются самостоятельной основой Scoring Study.

Results применяется термин Exploration Target или Exploration Potential.

Exploration Results – это качественная оценка перспективности изучаемого района по аналогии с ближайшими месторождениями с доказательством подобия геологического строения и металлогении района прогноза и геолого-структурной позиции месторождений-аналогов и информация, которая может быть полезна инвесторам, но не входит в состав Декларации о минеральных ресурсах или запасах руды (описание и результаты опробования обнажений, единичных скважин и канав, результаты геохимических и геофизических исследований).

Exploration Target или Exploration Potential – это высказывание по результатам более детальных исследований о потенциале объекта или оценка этого потенциала, сформулированная в виде интервала значений, характеризующих количество и качество полезного ископаемого при условии, что геолого-структурная и металлогеническая позиция объекта прогноза определена, но объём проведённых геологоразведочных работ недостаточен для оценки Inferred Mineral Resources. Обязательное требование для оценки на этой стадии – предварительный полевой осмотр прогнозируемого объекта назначенным компетентным экспертом. Эти геологические данные позволяют планировать площади для получения Mineral Resources.

Единой точки зрения на возможность использования Inferred Mineral Resources и Exploration Target при ранней экономической оценке проекта (Scoping Study), аналог ТЭС и ТЭР при геолого-экономической оценке прогнозных ресурсов категории P_1 и P_2 не существует. CRIRSCO, CIM [6, 10] это не разрешают из-за низкой уверенности в оценке модифицирующих факторов. SAMREC [13], SME [12], PERC [11] запрещают использование Exploration Target, но разрешают включать Inferred в Scoping Study с пояснениями, что: 1) оценка не гарантирует экономического развития и выполнена на основе данных по оцениваемому проекту и месторождениям-аналогам или аналогичным операциям (SAMREC, SME) или 2) учитываются при планировании, проектировании предприятия и экономических исследованиях как часть Mineral Resources (при сравнении результатов «с» и «без»), но не служат самостоятельной основой Scoping Study (PERC). По JORC [3], Inferred и Exploration Target могут включаться в ранние экономические исследования Scoping Study с указанием доли в общих минеральных ресурсах и последовательности освоения, но не являются самостоятельной основой Scoping Study.

Включение Inferred Mineral Resources и Exploration Target в предварительные (Pre-Feasibility Study) и детальные экономические исследования не допустимо по всем стандартам.

«Рамочная классификация ископаемых энергетических и минеральных запасов и ресурсов Организации

Объединённых Наций» (UNFC-2009) [14] (с 2017 г. называется «Рамочная классификация ресурсов Организации Объединённых Наций») основана на выделении классов и подклассов проектов (стадий) освоения известных и предполагаемых месторождений, а также категорий и подкатегорий ресурсов.

Эквиваленты прогнозных ресурсов могут быть выделены в UNFC-2009 по:

известным месторождениям в рамках класса неkomмерческие проекты (два подкласса: 1) разработка, по предварительной оценке, низкой достоверности, возможна, но детали её не обоснованы; 2) разработка, по предварительной оценке, низкой достоверности, не возможна);

предполагаемым месторождениям (новым объектам) в рамках класса геологоразведочные проекты (подклассы не выделяются) – будущая добыча возможна при положительных результатах более детальных геологоразведочных работ.

Категории классификации выделяются по трём критериям: экономическая и социальная жизнеспособность проекта освоения месторождения (E), статус и обоснованность проекта добычи, обогащения, переработки и сбыта полезного ископаемого (F) и геологическая изученность (G). Для отражения комбинации этих критериев использована трёхмерная независимая схема числового кодирования.

Каждый критерий подразделяется на различные категории и подкатегории.

По геологической изученности (G) выделяются 4 категории. Из них прогнозным ресурсам соответствуют категории G3 и G4. G3 оцениваются по известным месторождениям (неkomмерческие проекты) с низкой степенью достоверности, G4 – по новым объектам (геологоразведочные проекты) главным образом по косвенным данным с низкой достоверностью. Для G4 ни один проект добычи и переработки сырья не может быть осуществлён в связи с высокими рисками, связанными со значительным диапазоном неопределённости и низкой достоверностью оценки количества и качества полезного ископаемого. При проведении оценки в ней должен быть документально описан полный диапазон неопределённости в отношении размеров потенциального месторождения и возможность (вероятность) того, что оно будет иметь коммерческое значение.

По обоснованности проекта добычи, обогащения и переработки сырья (F) выделяются 4 категории. Из них прогнозным ресурсам соответствуют категории F2 и F3. Категория F2 оценивается по известным месторождениям (неkomмерческие проекты), если целесообразность добычи при реализации определённого проекта разработки требует дополнительного обоснования по результатам более детальных работ. Предварительные исследования показывают наличие месторождения или тел полезного ископаемого такой формы, качества и количества, что обоснованность добычи с помощью

определённого (в широком смысле) проекта разработки может быть оценена положительно. Для подтверждения обоснованности добычи могут потребоваться дополнительные данные и(или) исследования. Ресурсы этой категории делятся на подкатегории в зависимости от очередности их подготовки к разработке:

F2.2 ресурсы первой очереди подготовки к коммерческой разработке;

F2.3 ресурсы второй очереди подготовки к коммерческой разработке.

Категория F3 оценивается с низкой степенью достоверности в рамках геологоразведочного проекта по новым объектам в результате предварительных исследований, основанных на концептуальном проекте разработки, обогащения и передела, свидетельствующих о необходимости сбора дополнительной информации, для оценки обоснованности добычи. Делятся на подкатегории в зависимости от степени их готовности к разработке:

F3.1, если в результате геологоразведочных работ на конкретном участке с достаточной степенью достоверности выявлена потенциальная возможность обнаружения отдельного месторождения и существует необходимость продолжения более детальных работ для подтверждения возможности его разработки;

F3.2, если результаты геологоразведочных работ указывают на потенциальную возможность обнаружения одного или нескольких месторождений в каком-либо районе геологической провинции (рудное поле и его аналоги), однако для приобретения достаточной уверенности в этом необходимо собрать дополнительные данные и (или) разработать дополнительные обоснования для продолжения геологоразведочных работ по подтверждению существования месторождения такой формы, качества и количества полезного ископаемого, что это позволит оценить обоснованность добычи;

F3.3, если результаты региональных геологических исследований на самых первых этапах геологоразведочных работ указывают на наличие благоприятных условий для потенциального открытия месторождений в одной из геологических провинций (рудный район, узел и их аналоги).

По экономической и социальной жизнеспособности проекта освоения (Е) выделяются 3 категории. Из них прогнозным ресурсам соответствует категория Е3, согласно которой нельзя предположить, что добыча и сбыт в обозримом будущем станут экономически целесообразными, либо оценки произведены на слишком ранней стадии, не позволяющей определить экономическую целесообразность. Делится на три подкатегории. Прогнозным ресурсам соответствуют две из них со следующей спецификацией, одинаковой как для известных месторождений (некоммерческие проекты), так и новых объектов (геологоразведочные проекты):

Е3.2, если для рентабельной добычи и сбыта имеются приемлемые перспективы, но для достоверного

определения экономической целесообразности добычи не достаёт информации, например, на этапе геологоразведочных работ;

Е3.3, если на основе реалистичных прогнозов будущих рыночных условий в настоящее время считается, что для рентабельной добычи и сбыта, нет приемлемых перспектив в обозримом будущем.

По известным месторождениям в рамках некоммерческих проектов эквивалентом кондиционных прогнозных ресурсов категории P_1 являются категории UNFC-2009 со спецификацией 3.2, 2.2, 3, P_2 – 3.2, 2.3, 3, некондиционных прогнозных ресурсов категории P_1 – 3.3, 2.2, 3, P_2 – 3.3, 2.3, 3. По новым объектам в рамках геологоразведочных проектов эквивалентом кондиционных прогнозных ресурсов категории P_1 являются категории UNFC-2009 со спецификацией 3.2, 3.1, 4, P_2 – 3.2, 3.2, 4, P_3 – 3.2, 3.3, 4, некондиционных прогнозных ресурсов категории P_1 – 3.3, 3.1, 4, P_2 – 3.3, 3.2, 4, P_3 – 3.3, 3.3, 4.

UNFC-2009 достаточно громоздкая, но позволяет найти эквивалент практически любой категории прогнозных ресурсов, принятых на практике их оценки в Российской Федерации. Некоторые затруднения вызывает подбор эквивалента категории P_2 в рамках некоммерческих проектов по известным месторождениям. Хотя справедливости ради можно отметить, что целесообразность выделения этой категории на известных месторождениях проблематична и в РФ. Также следует отметить недостаточное количество подкатегорий для характеристики геологической изученности (G) известных месторождений – всего 3, тогда как в РФ таких категорий до шести: четыре для запасов и две для прогнозных ресурсов. По новым объектам категория геологической изученности всего одна (G4), тогда как в РФ таких категорий для прогнозных ресурсов три. Поэтому для подбора эквивалента приходится привлекать изученность горнотехнических, технологических, металлургических и других условий добычи, обогащения и передела полезного ископаемого (по подкатегориям F3.1, F3.2, F3.3 для геологоразведочных проектов и F2.2, F2.3 для некоммерческих проектов).

Основной упор в UNFC-2009 делается на статус и обоснованность проекта добычи, обогащения и передела полезного ископаемого, далее следует экономическая и социальная жизнеспособность проекта освоения и на последнем месте геологическая изученность. В классификациях российской и CRIRSCO при оценке прогнозных ресурсов и их аналогов основное значение отдаётся геологической обоснованности (изученности). А модифицирующие факторы обосновываются на уровне или методических руководств по оценке прогнозных ресурсов (РФ), или Компетентного лица, ответственного за оценку (CRIRSCO).

В UNFC-2009 использование эквивалента прогнозных ресурсов при составлении ТЭО, проектировании и планировании добычи и переработки, также как в РФ и

странах, где принят стандарт CRIRSCO, не предусмотрено.

В Национальном стандарте Китайской Народной Республики (КНР) «Классификация ресурсов/запасов твёрдого топлива и минерального сырья» (GB/T 17766-1999) [5] использована трёхмерная числовая система кодирования, похожая на UNFC-2009. Первая цифра относится к экономической эффективности, вторая – к оценке осуществимости добычи, переработки и сбыта полезного ископаемого, третья – к степени геологической достоверности. Категории GB/T 17766-1999 находятся в прямом соответствии с этапами геологоразведочных работ и контролируются «промышленными индексами» (к качеству полезного ископаемого и техническим условиям добычи), рассчитанными при определённых технических и экономических условиях в течение определённого периода. Промышленные индексы служат основой для оконтуривания и определения количества и качества ресурсов и запасов полезных ископаемых (аналог кондиций в РФ).

Промышленные индексы подразделяются на общие и проверенные. Общие получают из опыта, накопленного в отрасли в ходе многолетних поисков и разведки, инженерно-технического и экономического контроля и добычи, применяются на стадиях предварительных работ и поисков. Проверенные получают в ходе инженерно-технического и экономического контроля путём выполнения нормативных процедур и после всестороннего рассмотрения техническими специалистами разных профессий следующих факторов: геологических, горно-технических, металлургических, полной утилизации, экономических, защиты окружающей среды, законодательных актов и нормативных документов, социальных, государственных и др. Как правило, их используют на стадиях общей и детальной разведки, проектирования и строительства горнодобывающих объектов и добычи полезных ископаемых конкретного месторождения.

Экономическая рациональность на момент оценки подразделяется на четыре категории. Прогнозным ресурсам соответствуют две из них:

«внутренние промышленные» код 3 означает, что добыча и переработка полезного ископаемого станут экономически целесообразными в обозримом будущем, и рассматриваются в ходе концептуальной проработки проекта на различных стадиях геологоразведочных работ;

«экономическое значение не установлено» код ? означает, что невозможно определить степень экономической жизнеспособности проекта добычи и переработки полезного ископаемого в силу недостаточной информации, рассматривается на этапе предварительных работ при простой технико-экономической оценке.

Недостаток этой части классификации – отсутствие деления ресурсов по экономическому значению, эквивалентному оценке кондиционной принадлежно-

сти прогнозных ресурсов РФ и индексам E3.2 и E3.3 UNFC-2009. В КНР, если объект не имеет промышленной ценности, проект завершается без регистрации ресурсов в национальной базе (так же, как и в РФ).

Оценка осуществимости добычи, переработки и сбыта полезного ископаемого подразделяется на три категории, из которых прогнозным ресурсам соответствует категория с кодом 3 – концептуальная проработка проекта, достоверность выводов по которой зависит от стадии работ и на поисках относится к низкой степени. На стадии предварительных работ уровень оценки осуществимости ещё ниже, чем у концептуальной проработки проекта, но код одинаковый. Что является недостатком по сравнению с UNFC-2009, где проработка этой части более детальная.

Степень геологической достоверности подразделяется на четыре категории, которые коррелируют с UNFC-2009. Прогнозным ресурсам соответствуют две из них:

«предполагаемые» с кодом 3 оцениваются по фактическим данным с низкой степенью достоверности как часть «Установленные ресурсы полезных ископаемых»;

«предварительно разведанные» с кодом 4 оцениваются по косвенным данным как «Прогнозные ресурсы».

С прогнозными ресурсами категории P_1 может быть сопоставлена категория «предполагаемые», выделяемая в GB/T 17766-1999 под кодом (333) по фактическим данным с низкой степенью достоверности как часть «Установленные ресурсы полезных ископаемых». Данная категория составляет большую часть ресурсов, получаемых на стадии поиски (цель работ – найти потенциальное месторождение (залежь) полезного ископаемого и провести принципиальную оценку осуществимости добычи). Наряду с более достоверными ресурсами категории (332) является основной частью на стадии общей разведки и имеет небольшой вклад в общие ресурсы, получаемые на всех других стадиях геологоразведочных работ (как более, так и менее детальных). Ресурсы категории (333) учитываются при экономической оценке на всех стадиях геологоразведочных работ – от простой технико-экономической оценки по общим промышленным индексам до ТЭО по проверенным промышленным индексам, а также при проектировании горнодобывающих предприятий и при составлении плана добычи.

С прогнозными ресурсами категории P_2 может быть сопоставлена категория прогнозные ресурсы «предварительно разведанные», выделяемая в GB/T 17766-1999 под кодом (?34) по косвенным данным. Данная категория составляет большую часть ресурсов, получаемых на стадии предварительные работы (цель – найти участок с большим потенциалом, основная часть которого оценивается по косвенным данным (?34) и небольшая часть – по фактическим данным с низкой степенью достоверности (333)). Категория (?34) имеет

небольшой вклад в общие ресурсы на стадии поиска и очень малый – на стадии общей разведки. Категория (?34) учитывается при простой технико-экономической оценке и концептуальной проработке проекта по общим промышленным индексам, а также при предварительных технико-экономических исследованиях или концептуальной проработке проекта по проверенным промышленным индексам.

Наиболее существенное отличие классификации GB/T 17766-1999 от всех других заключается в использовании эквивалента прогнозных ресурсов (333) на стадиях ТЭО, при проектировании добывающих и перерабатывающих предприятий, планировании добычи.

Важнейшее место в «Indian national mineral resource classification system» (IS-12595:1989) [1, 7, 8] отводится категории геологической достоверности, которая базируется на трёх основных факторах: геолого-промышленном типе месторождения, сложности его геологического строения и плотности сети опробования.

Эквивалентом прогнозных ресурсов категории P_1 по геологической достоверности может служить часть выявленных (Identified) условно учитываемых ресурсов (Conditional Resources), относящихся к категории возможные (Possible) IS-12595:1989. Эта категория представляет первое приближение к количественной коммерческой оценке полезного ископаемого на потенциальном месторождении. Оценка базируется на предполагаемой выдержанности промышленной минерализации (рудных тел), устанавливаемой по геологическим признакам, опробовании по очень редкой либо неравномерной сети, геологической интерпретации результатов геофизических и геохимических работ, аналогии с данными о модифицирующих факторах, количестве и качестве полезного ископаемого по месторождениям того же геолого-промышленного типа.

В качестве эквивалента прогнозных ресурсов категории P_2 можно рассматривать часть ещё не выявленных ресурсов (Undiscovered Resources), относящихся к категории перспективная ресурсная база (Prospective Resources) IS-12595:1989. Их оценка основывается не на определении количества и качества полезного ископаемого, а на прогнозе минерально-сырьевого потенциала на перспективных площадях, эквивалентных рудным районам, узлам, полям, на основе экстраполяции геологически благоприятных условий локализации известных месторождений, выявленных геофизических и геохимических аномалий, минерализованных зон, прослеженных при геологическом картировании, и других косвенных признаков наличия полезного ископаемого, возможные перспективы которых на выявление месторождения подтверждены единичными горными выработками или скважинами.

Эквивалентом прогнозных ресурсов категории P_3 можно рассматривать часть ещё не выявленных ресурсов (Undiscovered Resources), относящихся к категории потенциальная ресурсная база (Prognostic Resources).

Их оценка основывается не на определении количества и качества полезного ископаемого, а на прогнозе минерально-сырьевого потенциала перспективных площадей, эквивалентных рудным районам, узлам, полям, на основе геологического картирования и экстраполяции геологически благоприятных условий локализации известных в других районах месторождений, выявленных геофизических и геохимических аномалий, других косвенных признаков наличия полезного ископаемого.

IS-12595:1989 применяется в увязке со стадийностью геологоразведочных работ, которая несколько отличается от общепринятой в мировой практике и включает три стадии: 1) общее предварительное (рекогносцировочное) изучение регионов, 2) региональные и 3) детальные геологоразведочные работы. Эквиваленты прогнозных ресурсов оцениваются в основном на 1 и реже на 2 стадиях.

На стадии рекогносцировочного изучения решается задача выявления перспективных районов, площадей, зон и проявлений полезных ископаемых, представляющих потенциальный промышленный интерес. Определяются участки для более детального изучения. Региональные геологоразведочные работы обычно выполняются в две подстадии.

На подстадии I проводятся: анализ выполненных ранее геологоразведочных работ и обзор горнодобывающей промышленности в регионе; геологическое картирование масштабов 1:50 000–1:25 000; петрографические исследования; определение предполагаемого геолого-промышленного типа изучаемых объектов; подбор их аналогов; горные (шурфы и канавы), а при необходимости и буровые работы в ограниченном объёме. Основная часть перспективных площадей оценивается как потенциальная ресурсная база (Prognostic Resources), меньшая – как перспективная ресурсная база (Prospective Resources).

На подстадии II изучается геологическое строение перспективной площади (предполагаемого месторождения) с помощью: геологического картирования масштабов 1:25 000–1:12 500, бурения, геохимического опробования, химических анализов и минералогического изучения проб, лабораторных технологических исследований. Основная часть ресурсов оценивается по категории возможные (Possible), меньшая – как перспективная ресурсная база (Prospective Resources).

Геологоразведочная информация, собранная на подстадиях I и II, может быть полезной при первоначальной геолого-экономической или другой аналогичной оценке проекта.

По результатам региональных геологоразведочных работ масштабов 1:1000–1:2000 осуществляется общая оценка минерально-сырьевого потенциала площадей (эквивалентных рудным полям и проявлениям) и выбираются участки для более детального изучения. Минеральные ресурсы, оценённые на данной стадии,

рассматриваются как выявленные (Identified) условно учитываемые ресурсы (Conditional Resources) категории возможные (Possible) и иногда вероятные (Probable) ресурсы (последние – уже эквивалент запасов).

В IS-12595:1989 недостаточное внимание уделяется технико-экономической стороне оценки полезных ископаемых в недрах, обоснованию перспектив их рентабельного освоения и экономически эффективного сбыта на этапах региональных геолого-съёмочных и поисковых работ, охватывающих значительные территории, а также предварительного изучения и геологической оценки предполагаемых месторождений, которые осуществляются Геологической государственной службой Индии. Какие-либо технико-экономические исследования, оценка экономической эффективности вовлечения ресурсов в хозяйственный оборот, как правило, не проводятся. Выявленные перспективные участки предоставляются заинтересованным предпринимателям на лицензионной основе для более детального изучения и промышленной оценки. В случае положительной оценки объекта предприниматель обращается за получением лицензии на добычу полезного ископаемого. Получив лицензию, он осуществляет детальную разведку отдельных участков (месторождений) с подсчётом запасов и продолжает геологическое изучение недр в пределах выделенной ему площади.

Таким образом, эквивалент прогнозным ресурсам категории P_1 присутствует во всех рассмотренных классификациях. Аналоги прогнозным ресурсам категорий P_2 и P_3 в мировой практике также имеются, но в ряде стран выведены за рамки классификации и не входят в состав минеральных ресурсов и запасов, а рассматриваются как геологическая информация о результатах проведённых геологоразведочных работ без количественной оценки полезного ископаемого. Выделяются категории прогнозных ресурсов и их мировые аналоги по сходному набору признаков, определяющих геологическую обоснованность количества и качества полезного ископаемого, при идентичных масштабе и комплексе геологоразведочных работ ранних стадий, характеризуются близкими подходами к определению экономической жизнеспособности объектов с ресурсами и целесообразности проведения более детальных геологоразведочных работ на них.

На самых ранних этапах изучения в условиях крайне ограниченного объёма информации об объекте выполняется качественная оценка перспективности и возможного потенциала объекта путём сопоставления геолого-структурной и географо-экономической позиции изучаемого участка недр с ближайшими месторождениями предположительно такого же геолого-промышленного типа. Для этого даётся обоснование подобия металлогении и геологического строения, оценивается сходство геолого-структурных позиций полезного ископаемого. Производится оценка эквива-

лентных прогнозным ресурсам P_3 категорий. Только в GB/T 17766-1999 эквивалент отсутствует.

При наличии фактических данных (полезное ископаемое вскрыто единичными горными выработками и скважинами, прослежено геологическим картированием, геохимическими и геофизическими работами) и определении металлогенической и геолого-структурной позиции прогнозируемого месторождения проводится приближенно-количественная оценка его потенциала, зачастую в виде диапазона значений количества и качества полезного ископаемого, эквивалентная прогнозным ресурсам категории P_2 . Результаты приближенно-количественной оценки полезного ископаемого используются для установления принципиальной (предварительной) осуществимости добычи. Экономическая целесообразность освоения может не оцениваться, но тогда по всем вопросам, которые могут повлиять на перспективу экономически эффективного освоения, делается обзор.

Ограниченные геологические данные, полученные по редкой нерегулярной сети горных выработок и скважин, достаточные для того, чтобы подразумевать, но не достаточные, чтобы проверить непрерывность тел и качественных характеристик полезного ископаемого, позволяют выполнить оценку количества и качества полезного ископаемого прогнозируемого объекта, достоверность которой удовлетворяет требованиям категории P_1 и её эквивалентов в зарубежных классификациях, но не даёт достаточной уверенности для применения модифицирующих факторов. Определение экономической жизнеспособности объектов с ресурсами этой категории в мировой практике обычно выполняется на уровне ранней экономической оценки с различными оговорками (ТЭС, Scoping Study или близкие к ним) или реже концептуально (CRIRSCO, CIM (Канада), PERC (общеевропейский стандарт)).

Рассмотренные классификации отличаются как основными целями оценки, так и набором используемых для достижения этих целей критериев (зависящих от приоритетных принципов оценки). Как следствие, варьирует количество выделяемых категорий и некоторые детали их смыслового наполнения. Тем не менее благодаря постоянной работе по сопоставлению и сближению классификаций, стандарты стран-лидеров геологоразведки, выполненные в единой терминологии, хорошо коррелируют друг с другом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кавун К.П. Национальный кадастр и классификация запасов твёрдых полезных ископаемых в Индии // Разведка и охрана недр. 2003. № 1. С. 33–45.
2. Классификация запасов и прогнозных ресурсов твёрдых полезных ископаемых. Утверждена приказом МПР РФ от 11.12.2006 г. № 278.

3. *Кодекс JORC*. AusIMM / Перевод А.А.Немытова (группа IMC Montan). 2012.
4. *Руководство по гармонизации стандартов отчётности России и CRIRSCO*. – М.: ГКЗ РФ, 2010.
5. *Связующий документ между Национальным стандартом Китайской Народной Республики «Классификация ресурсов/запасов твёрдого топлива и минерального сырья» (GB/T 17766-1999) и «Рамочной классификацией ископаемых энергетических и минеральных запасов и ресурсов Организации Объединенных Наций 2009 года»*. Январь 2018 г.
6. *Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum CIM Standards on Mineral Resources and Reserves Definitions and Guidelines*. Adopted by CIM Council August 20, 2000.
7. *Geological Exploration as per UNFC Stages and Field Guidelines* by M. S. Jairam Deputy Director General Geological Survey of India.
8. *Indian National Mineral Resource Classification System, Its Evolution and Mapping with UNFC 1997/2004* by Dr. R.N.Meshram, Dr. S.S.Bhake, J.N.Patel. Indian Bureau of Mines, 2004.
9. *International Reporting Template for the Public Reporting of Exploration Results, Mineral Resources and Mineral Reserves*. CRIRSCO. October 2014.
10. *Mineral Recourse Reporting – Differences between CIM, JORC, and Others*. Tania Ilieva, Sep 1, 2016. (<https://www.micon-international.com/mineral-resource-reporting-differences-between-cim-jorc-and-others/08.09.2018>).
11. *Pan-European Standard for Reporting of Exploration Results, Mineral Resources and Reserves* («The Perc Reporting Standard»). The Pan-European Reserves and Resources Reporting Committee (PERC asbl) approved and published 15 March 2013.
12. *SME Guide for Reporting Exploration Information, Mineral Resources, and Mineral Reserves* prepared by: the Resources And Reserves Committee of the Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. and approved by: the board of directors of the Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Inc. July 2017.
13. *The South African Mineral Code* The South African Code for the Reporting of Exploration Results, Mineral Resources and Mineral Reserves. 2016.
14. *United Nations Framework Classification for Fossil Energy and Mineral Reserves and Resources 2009 incorporating Specifications for its Application / Ece Energy Series. № 42*. United Nations. – New York and Geneva, 2013.

ПОДПИСЧИКАМ

Оформить подписку на журнал «Отечественная геология»
можно в почтовых отделениях связи
по каталогу «Газеты. Журналы» ОАО Агентства «Роспечать»
(подписной индекс 70824)

Периодичность – шесть номеров в год.

На электронную версию журнала можно подписаться
на сайте Научной Электронной библиотеки: <https://elibrary.ru>

Возможность самообогащения рудным веществом и тяжёлым изотопом серы (^{34}S) мантийных магм, формирующих Pt-Cu-Ni месторождения и перспективное место для локализации руд в Норильском районе

А.П.ЛИХАЧЕВ (Федеральное государственное бюджетное учреждение «Центральный научно-исследовательский геологоразведочный институт цветных и благородных металлов» (ФГБУ «ЦНИГРИ»); 117545, г. Москва, Варшавское шоссе, д. 129, корп. 1)

Обосновывается возможность автономного (неконтаминационного) самообогащения Fe-Pt-Cu-Ni сульфидами и тяжёлым изотопом серы (^{34}S) мантийных магм с превращением их в рудоносные, способные формировать платино-медно-никелевые месторождения. Определены чётко выраженные и легко доступные для опознания признаки проявления процессов самообогащения с количественной оценкой вероятного скопления руд. В Норильском районе выделено новое место, перспективное на обнаружение рудных залежей.

Ключевые слова: Pt-Cu-Ni месторождения, Норильский район, неконтаминационное самообогащение мантийных магм рудным веществом и тяжёлым изотопом ^{34}S , лейкократовое габбро, перспективные площади.

Лихачев Александр Петрович
доктор геолого-минералогических наук



alexanderlikhachev@rambler.ru

The possibility of self-enrichment of the ore substance and the heavy sulfur isotope (^{34}S) of the mantle magmas that form Pt-Cu-Ni deposits and a promising area for ore localization in the Norilsk region

A.P.LIKHACHEV (Central Research Institute of Geological Prospecting for Base and Precious Metals)

The possibility of autonomous (noncontamination) self-enrichment of Fe-Pt-Cu-Ni with sulfides and heavy sulfur isotope (^{34}S) of mantle magmas and their transformation into ore-bearing ones capable of forming platinum-copper-nickel deposits is substantiated. Distinct and easily identifiable signs of self-enrichment processes with a quantitative assessment of the likely ore accumulation are identified. In the Norilsk region, a new area has been revealed, promising for ore deposits discovery.

Key words: Pt-Cu-Ni deposits, Norilsk region, noncontamination self-enrichment of mantle magmas with ore substance and ^{34}S heavy isotope, leucocratic gabbro, prospective areas.

Как известно, с течением времени прирост и обеспечение потребности для большинства полезных ископаемых связаны с поисками и освоением всё более скрытых, в основном глубинных месторождений, недоступных непосредственному опознанию. Для этого требуются выявление и применение новых поисковых признаков, преимущественно более сложных, основанных на детальном исследовании и анализе процессов, приводящих к накоплению ценных веществ.

В природных условиях увеличение (как и уменьшение) количества каждого химического элемента и каждого из его изотопов в основном происходит эволюционно, за счёт внутренних преобразований (дифференциации) исходно сложных материалов, совершаемых в сложных и многоэтапных процессах. Относительно простые и обычно случайные события в

виде контаминации и смешения веществ маловероятны и редко продуктивны.

Платино-медно-никелевые месторождения Норильского района (рис. 1) уникальны по составу и количеству рудных веществ и аномально обогащены тяжёлым изотопом серы ($\delta^{34}\text{S}$ до 12–14‰), в отличие от большинства других месторождений данного типа ($\delta^{34}\text{S}$ 2–7‰). Выяснение причин проявления этой особенности имеет важное научное и практическое значение в первую очередь в отношении определения перспективности территорий, а также в прогнозе, поиске и оценке новых месторождений.

Нередко проявленному феномену даётся простое и «очевидное» объяснение, которое сводится к ассимиляции магмой присутствующих в разрезе вмещающей толщи богатых ^{34}S сульфатов ($\delta^{34}\text{S}$ 18–20‰ и более),

главным образом ангидрита (CaSO_4). Однако такое представление не находит фактического подтверждения. Эвапориты в разрезе норильских толщ проявлены в виде субгоризонтальных слоёв сравнительно небольшой мощности (обычно менее 3–4 м). Поднимавшиеся магмы пересекали их в поперечных каналах, соприкасаясь с ними преимущественно в плоскостном, но не в объёмном варианте (см. рис. 1, Б). Они сразу же контактировали с практически холодной ($300^\circ\text{--}400^\circ\text{C}$) вмещающей толщей, которая почти мгновенно переводила их краевые части в твёрдое состояние с образованием зоны закалки, изолирующей магму от окружающей среды (см. рис. 1, Г). В составе рудоносных интрузий нет каких-либо признаков существенной ассимиляции вмещающих пород. Температура плавления ангидрита (1450°C) значительно выше внедряющейся магмы ($1200^\circ\text{--}1350^\circ\text{C}$), а на флюиды он мало реагирует. В рудных горизонтах норильских месторождений имеются места, где сульфидные выделения непосредственно контактируют с ксенолитами ангидрита (см. рис. 1, Д), но между ними нет существенного обмена изотопами серы: сульфиды имеют свойственные им значения $\delta^{34}\text{S}$, а сера ангидрита соответствует значениям его образований во вмещающих толщах. Так что в Норильском районе отсутствуют условия для значительной ассимиляции магмой вмещающих толщ и обогащения сульфидов тяжёлой сульфатной серой. Нет оснований и для их допущения на больших глубинах земной коры.

Ранее автором предполагалось и обосновывалось изначальное существование обогащённых изотопом ^{34}S и рудными компонентами сульфидов в мантийных источниках магм [10, 21]. В настоящей статье показано, что накопление рудных веществ и тяжёлого изотопа ^{34}S может быть связано также с внутренними преобразованиями исходного материала и формируемых при его плавлении магм: на стадиях их зарождения в мантии, подъёма в земную кору и становления в конечных камерах внедрения.

Условия на стадии зарождений магм схематически изображены на рис. 2, А. При этом полагается, что первичный (исходный) материал мантии состоит из окисно-силикатной (~98 мас.%), сульфидной (~1 мас.%) и металлической (~1 мас.%) фракций [10]. Как в целом, так и в каждой фракции он представляет собой термоградиентную котектическую систему, а каждая минеральная фаза в нём является изменяющимся по составу и температурной устойчивости твёрдым раствором [11, 12]. Поэтому плавление такого материала, приводящее к зарождению магм, всегда осуществляется парциально, в последовательности от легкоплавких к тугоплавким фракциям во всех его составляющих. Именно это фракционирование обеспечивает первичное накопление рудных веществ и тяжёлого изотопа ^{34}S .

Сначала образуются и, как правило, выносятся из зоны магнезиального образования сравнительно маломagneзиальные практически бессульфидные мафические

(MgO 6–8 мас.%) окисно-силикатные расплавы (см. рис. 2, А). Это приводит к увеличению количества сульфидов и рудных компонентов в остающемся материале и делает возможным образование в дальнейшем рудоносных магм.

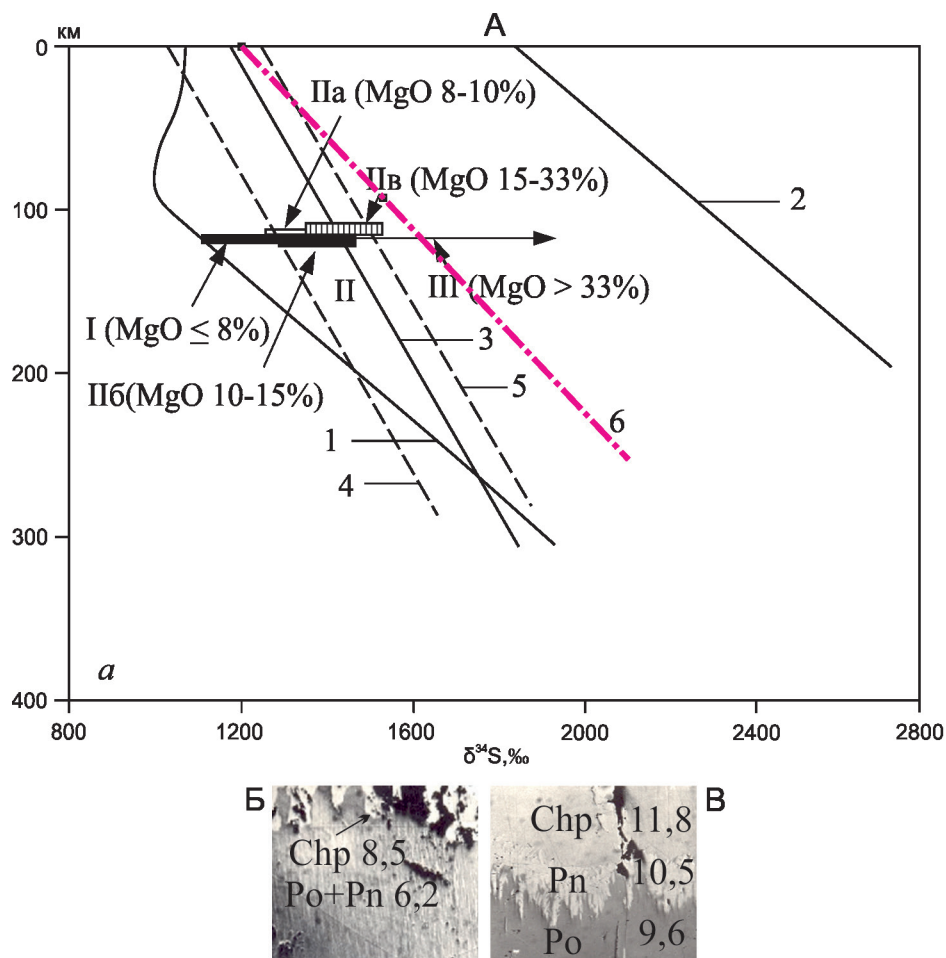
Затем зарождаются сульфидоносные мезомафические (MgO 8–33 мас.%) магмы, меняющиеся в составе в зависимости от степени плавления исходного вещества и формирующие соответствующие, известные в мире платино-медно-никелевые и платиновые месторождения.

За счёт оставшейся наиболее тугоплавкой и высокомагнезиальной части исходного материала ($\text{MgO} > 33$ мас.%) образуются бессульфидные ультрамафические продукты (например, гулинского типа), обогащённые тугоплавкими силикатным никелем, хромом, платиной, осмием и иридием.

Обычно процесс мантийного магнезиального образования не завершается полным плавлением исходного материала, а останавливается на той или иной стадии в основном в зависимости от температурных возможностей. Поэтому продукты его плавления, поступающие в земную кору и на её поверхность, часто представляют собой только ту или иную часть исходного вещества, обогащённую одними компонентами и обеднённую другими.

Подобное фракционирование происходит и на изотопном уровне. Ранние сравнительно низкотемпературные и маломagneзиальные выплавки (см. рис. 2, А, Па) несут в себе легкоплавкие сульфиды, обогащённые медью и тяжёлым изотопом ^{34}S . Примером являются сульфиды относительно маломagneзиальных магматических образований курейского типа, проявленных южнее Норильского района (MgO магм 8–10 мас.%, Ni/Cu 1:3–4, $\delta^{34}\text{S}$ 9–22‰) [3 и др.] и комплекса Дулут, США (MgO магм 8–10 мас.%, Ni/Cu 2–4:10, $\delta^{34}\text{S}$ до 16‰) [14 и др.].

Основная причина состоит в том, что, являясь малочисленными, изотопы ^{34}S менее прочно связаны в исходном веществе, чем многочисленные, структурообразующие ^{32}S [11]. Поэтому при нагреве, плавлении и растворении веществ они первыми покидают их, а при кристаллизации расплавов обогащают собой поздние минеральные фазы. Такая картина наблюдалась автором в экспериментах с сульфидными рудами норильских месторождений [10, 11]. Нагрев при 860°C в течение 6 часов приводил к выносу из исходного материала серы, обогащённой ^{34}S на 4,66% (величина $\delta^{34}\text{S}$ исходного материала равнялась 10,56‰, а остатка от него 5,9‰). В опытах по гидротермальному переотложению руд ранние продукты выноса обогащались ^{34}S на величину от 0,2 до 5,6%. При кристаллизации сульфидных расплавов поздно выделяющиеся, богатые медью фазы по сравнению с ранними обогащались ^{34}S на 2,3% (см. рис. 2, Б), подобно тому как это происходит и в природных условиях (см. рис. 2, В).



$\text{Ni}/\text{Cu}; \delta^{34}\text{S}, \text{‰}$
 Мантия $\sim 0,7; 0-5$
 Па - Курейка
 0,25; +9–22
 Па - Дулут
 0,33; до +16
 Пб - Норильск
 0,6; +8–12
 Пв - Джинчуан
 1,76; от –2 до +3
 Войсис Бэй
 1,84; от –4 до +2,7
 Печенга
 2,1; от –3 до +6
 Коматииты
 Ni/Cu от 3,1 до 64,8
 Рэглэн 3,1; 3–6‰
 Камбалда 13,5
 Абитиби 25,0

Рис. 2. Схема образования безрудных и рудоносных магм мафит-ультрамафитового ряда (А) и продукты кристаллизации сульфидных расплавов с проявлением фракционирования изотопов серы (Б, В) [10]:

А – 1, 2 – линии солидуса и ликвидуса пиролита, содержащего воды 0,1 мас.% [26], 3 – линия солидуса пирротина [5, 23], 4, 5 – приблизительные линии солидуса и ликвидуса сульфидов мантии, 6 – сухой солидус перидотита; I – участок зарождения сравнительно низкотемпературных бессульфидных магм мафического состава ($\text{MgO} \leq 8\%$); участки зарождения сульфидоносных магм: IIa – относительно низкотемпературные ($\text{MgO} 8-10\%$), несущие богатые медью (по отношению к никелю) сульфиды ($\text{Ni}:\text{Cu}=1:3-4$), IIб – среднетемпературные ($\text{Mg} 10-15\%$), включающие обогащенную медью сульфидную фракцию исходного вещества ($\text{Ni}:\text{Cu}=1:1,2-2,5$), IIв – высокотемпературные ($\text{MgO} 15-33\%$), содержащие бедные медью сульфиды ($\text{Ni}:\text{Cu}=1->10:1$); III – участок образования бессульфидных высокотемпературных магм ультрамафического состава ($\text{MgO} > 33\%$), справа – обобщенные данные по реальным объектам [14 и др.]; Б, В – изотопный состав серы продуктов кристаллизации синтетического (Б) и природного (В) сульфидных расплавов, Chp – халькопирит, Po – пирротин, Pn – пентландит, ув. 300

На стадии подъема магм в земную кору важными являются состояние и поведение серы и её изотопов в магматических расплавах, а также условия кристаллизации магм. Данные о растворимости серы в мафит-ультрамафитовых магмах приведены на рис. 3, А. Из него видно, что при охлаждении и по мере кристаллизации рассматриваемых магм растворимость присутствующей в них серы уменьшается. Её избыток накапливается в остающемся расплаве с последующей возможностью выделения из него самостоятельной

сульфидной жидкости преимущественно железистого состава (FeS).

При кристаллизации магм в стационарных (мало-подвижных) условиях и низком содержании в них серы снижение её растворимости не приводит к существенному накоплению сульфидов. В конечных продуктах они образуют мелкие и редкие («ликвационные») выделения, которые могут быть обогащены металлами платиновой группы бушвельдско-стиллутерского типа благодаря привносу и отложению их магматическими

Рис. 3. Схемы накопления рудного вещества и тяжёлого изотопа серы на пути подъёма магматической колонны в верхние части земной коры:

А – механизм накопления рудного вещества (сульфидной жидкости) в магматическом расплаве мафит-ультрамафитового состава при его охлаждении и кристаллизации: 1 – линия снижения растворимости сульфида железа в силикатном расплаве по мере его кристаллизации (синий цвет), приводящая к выделению и накоплению самостоятельного сульфидного расплава (красные линии 2) при каждом поступлении в зону кристаллизации новой порции магмы; цифры в кружках – поля различной степени насыщения магм сульфидом железа: 1 – ненасыщенное, 2 – насыщенное, 3 – перенасыщенное (по данным А.Налдретта и др., 1990, касающимся линии растворимости сульфида железа и с учётом результатов исследований других авторов [20 и др.]); Б – схема дифференциации магматической колонны и накопления в ней рудного вещества (цифры в кружках): 1 – «свежая» первичная магма, 2 – зона интрателлурической кристаллизации магмы и начальное выделение и накопление в ней сульфидного расплава (по схеме А), 3 – обратный поток магмы, содержащей выделения протооливина (черные кружки) и частиц сульфидной жидкости (красные точки и кружки), стрелками показано направление движения магмы и минеральных фаз, 4, 5 – зона накопления: 4 – протокристаллического плагиоклаза и 5 – сульфидного вещества; колонка справа – реальные соотношения минеральных веществ в природных и синтетических образованиях, которые могли быть проявлены в поднимающейся магматической колонне: 1 – ромбообразное зерно магнезиального протооливина в ассоциации с хромитом (чёрное округлое выделение) и сульфидами (тёмные более мелкие проявления), включённые в среднюю часть крупного кристалла протоплагиоклаза лейкократового габбро интрузии Норильск I (свидетельство наличия и кристаллизации мафических и рудных составляющих, опустившихся вниз поднимающейся магматической колонны) ув. 20; 2–5 – формы выделения сульфидной жидкости (белое) в силикатном расплаве пикритового габбро-долерита, меняющиеся с изменением его температуры (экспериментальные данные автора); В – схема последовательности (а, б, с, д, е) кристаллизации силикатного расплава сульфидоносных магм (MgO от 10 до 15 мас.%) в координатах четверной системы форстерит–диопсид–кремнезём–анортит: Di – диопсид, Fo – форстерит, An – анортит, En – энстатит, l – расплав, ol – оливин, pl – плагиоклаз, px – пироксен, sp – шпинель; цифры на диаграмме – температура, °C

флюидами. В условиях же многократной смены магмы и длительного поступления её новых («свежих») порций в зону кристаллизации возможны значительные («сегрегационные») скопления сульфидных масс, способных формировать Pt-Cu-Ni месторождения.

Наиболее благоприятными для самообогащения мантийных магм сульфидами и тяжёлым изотопом серы (^{34}S) являются случаи их медленного (с длительными остановками) подъёма в верхние части земной коры и начала кристаллизации до достижения ими конечных камер внедрения или излияния на земную поверхность (см. рис. 3, Б). При этом в зоне кристаллизации образуются преимущественно два главных протоминерала – оливин и плагиоклаз ($\pm$ шпинелиды, рис. 3, В, точки а, б, с, д). Зёрна первого из них, превышающие плотность магмы (силикатного расплава), опускаются вниз с возможностью частичного или полного перехода в расплавленное состояние из-за более высокой температуры окружающей среды, а второго, относительно лёгкого, всплывают вверх, продолжают кристаллизоваться (расти) и накапливаться в головной части магматической колонны (см. рис. 3, Б).

Здесь же (в зоне кристаллизации) из остаточного расплава, уменьшившегося в объёме и ставшего насыщенным и перенасыщенным серой, выделяются (ликвидируются) частицы сульфидной жидкости, не очищающие полностью от серы остающийся силикатный расплав. Её существенная часть сохраняется в нём. При этом происходит фракционирование изотопов серы: лёгкий изотоп ^{32}S предпочтительно остаётся в силикатном расплаве, а тяжёлый ^{34}S преимущественно переходит в сульфидный.

В дальнейшем выделяющиеся частицы сульфидной жидкости могут перемещаться вниз по магматическому каналу самостоятельно, под действием силы тяжести или в возвращающемся вниз конвективном потоке.

Продольная конвекция расплава в рассматриваемой магматической колонне вполне допустима. Для этого имеются необходимые условия: подвижная жидкость и значительный температурный перепад в ней. В реальности она наблюдается в лавовых озёрах современных вулканов, имеющих свободный выход магмы на дневную поверхность (например, у Гавайских вулканов и вулкана Эребус в Антарктиде).

Опускаясь, частицы сульфидной жидкости могут соприкасаться с нижележащей, ещё ненасыщенной серой магмой, что приводит к обогащению их цветными и благородными металлами и к переходу части серы в ненасыщенный ею свежий силикатный расплав. Переход серы сопровождается фракционированием её изотопов, аналогичным отмеченному выше: лёгкий ^{32}S предпочтительно перемещается в силикатный расплав, обогащая тем самым сульфидный тяжёлым изотопом ^{34}S .

Таким образом, сульфидная жидкость обогащается ^{34}S в каждом из двух последовательных процессов: при выделении её из магмы вследствие снижения в ней растворимости серы и при соприкосновении с ненасыщенным серой силикатным расплавом в ходе погружения сульфидных частиц вниз магматической колонны.

Перемещение сульфидов вниз магматической колонны ограничивается температурой магмы (см. рис. 3, Б). С глубиной её повышение приводит к «распылению» (диспергированию) сульфидов в силикатном расплаве, обеспечивающему их нахождение в нём во взвешенном

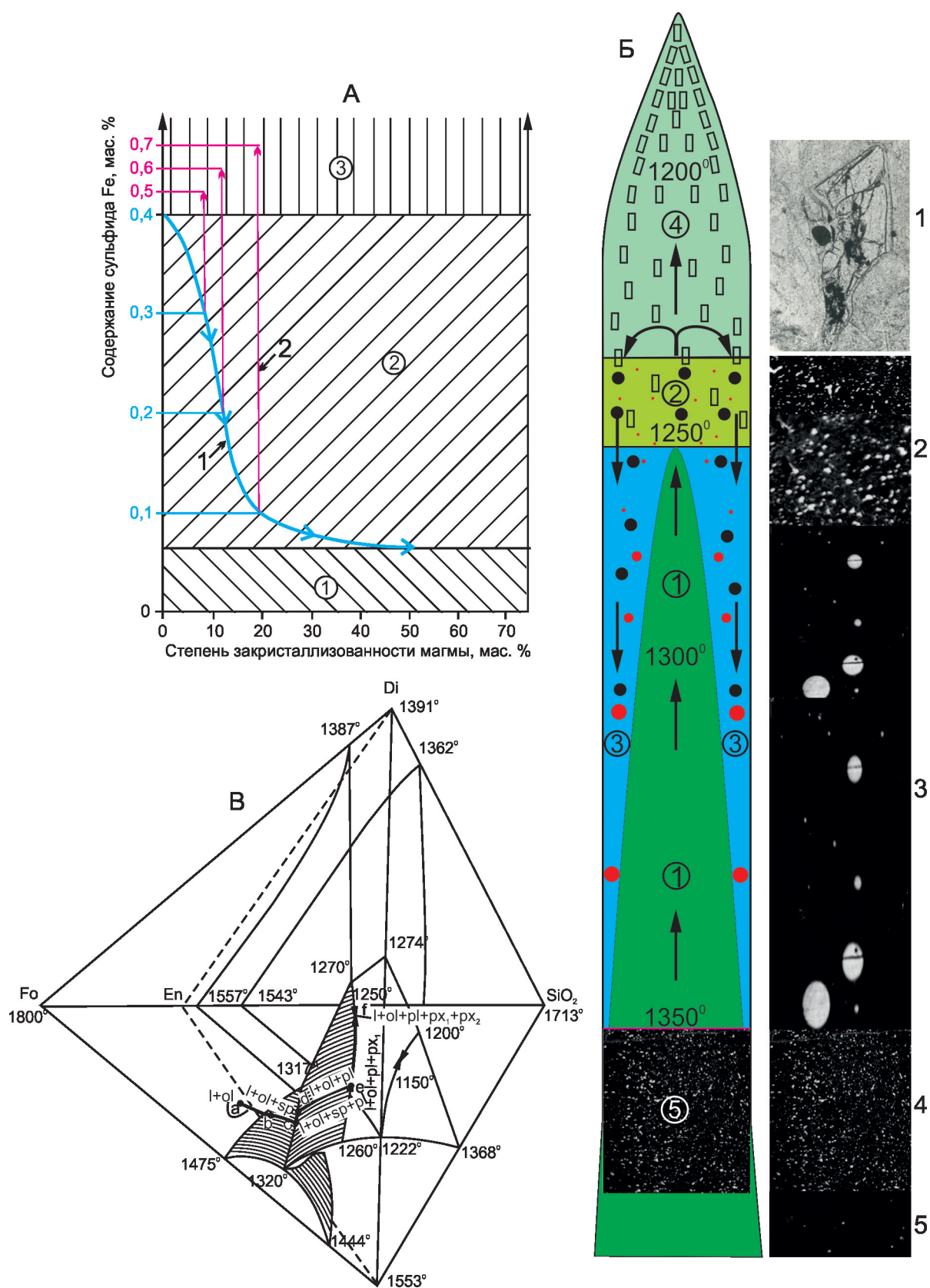


Рис. 4. Лейкократовое габбро, формы проявления и соотношения с вмещающими породами:

А – силл лейкократового габбро интрузии Норильск I, дифференцированный на лейкократовую часть вверх (светлая половина) и меланократовую вниз (место съёмки см. рис. 6, Г, место 1); Б – лейкократовое габбро, Г-п – таксито-пойкилоофитовый габбро-долерит; В – образец лейкократового габбро, интрузия Норильск I, рудник Северный, ум. 3; Г – структура лейкократового габбро, ув. 25; Д – резко зональный плагиоклаз, ув. 10; Е – миндалины слабоаскристаллизованного стекла в лейкократовом габбро силла месторождения Норильск I, ув. 30; Ж, З – включения лейкократового габбро (светлые участки) в пикритовом (Ж) и оливиновом (З) габбро-долеритах интрузии Норильск I, восточный борт центрального карьера рудника «Угольный ручей», ум. 3,5; И, К – включения графитизированного угля (чёрное) в верхней части силла лейкократового габбро интрузии Норильск I (см. рис. 6, Г, место 2), ум. 4,5; Л – контакт лейкократовое габбро с графитизированным углём пласта «Заметный», верхняя часть восточной ветви интрузии Норильск I, рудник «Северный», ум. 5; М – лейкократовое габбро с включением базальтового ксенолита, интрузия Норильск I, рудник «Угольный ручей», ум. 1,5

состоянии. В результате создаётся обогащённая сульфидным (рудным) веществом зона (см. рис. 3, Б, зона 5), за счёт которой в последующем (в конечных камерах внедрения магмы) могут формироваться платино-медно-никелевые месторождения [10].

Эффект диспергирования был выявлен автором в опытах по плавлению сульфидсодержащего пикритового габбро-долерита [10]. При температурах $\geq 1300^\circ\text{C}$ сульфидная жидкость расплывалась в окисно-силикатном расплаве и удерживалась в нём во взвешенном виде. Ниже 1300°C сульфидные выделения укрупнялись, приобретали каплевидные очертания и опускались в придонную часть расплавленного объёма.

Выявление этого эффекта имеет чрезвычайно важное значение, так как в нём раскрываются ранее неизвестные причины и условия подъёма тяжёлой сульфидной жидкости менее плотным окисно-силикатным расплавом из глубин мантии в верхние части земной коры. К тому же он вскрывает новые стороны и возможности процессов дифференциации сульфидно-силикатных систем, в том числе в вопросах промышленной концентрации медно-никелевых сульфидов в рудоносных магматических колоннах.

Возможность удержания сульфидной жидкости в силикатном расплаве во взвешенном состоянии имеет определённые ограничения. При её большом (критическом) количестве, а также при резком понижении температуры сульфидные частицы могут быстро объединяться в общую массу и переходить в «неподъёмное» состояние, перемещаясь на большие глубины и оставаясь в них.

Монокристаллические скопления каждого из глубинных протоминералов (оливина и плагиоклаза) служат указанием на возможность проявления процесса самообогащения магматической колонны сульфидами и изотопом ^{34}S . И чем объёмнее такие скопления, тем возможны большие накопления сульфидных масс.

Так как зёрна протооливина погружаются на большие глубины (с возможностью перехода их в расплавленное состояние), то маловероятно, что при геологоразведочных работах они могут обнаруживаться в пределах верхней коры. И, наоборот, скопления протокристал-

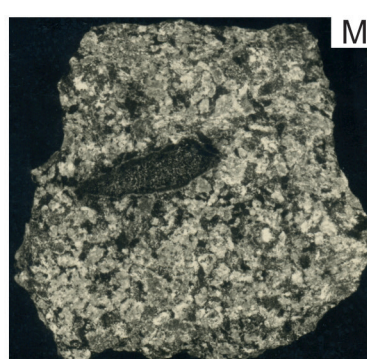
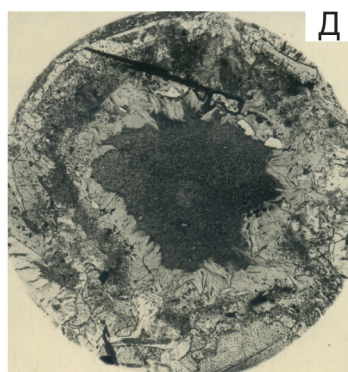
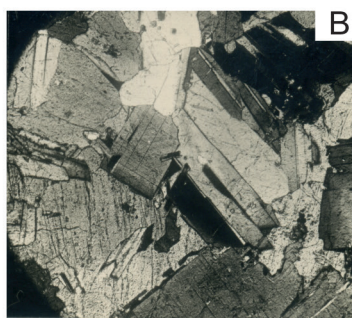
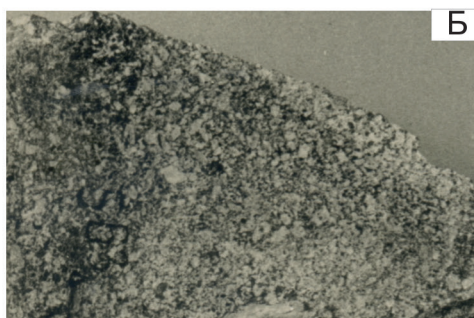
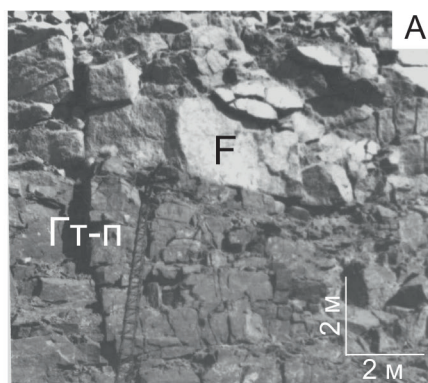
лов плагиоклаза, всплывающих и накапливающихся в головной части магматических колонн, являются наиболее доступными для обнаружения и оценки перспективности каждого магматического комплекса.

Явные признаки осуществления таких процессов (глубинной дифференциации магм на пути их подъёма в земную кору) проявлены в Норильском районе (см. рис. 1, А). Здесь во всех известных рудоносных интрузиях имеются скопления глубинного протоплагиоклаза битовнит-анортитового состава, представленные в виде образований лейкократового габбро (см. рисунки 4–8).

Как видно из рисунков, рудоносные интрузии состоят из периферической силлообразной части, практически безрудной (слабо сульфидоносной) и внутренней, вытянутой в одном направлении хонолитовидной, обогащённой магнием и рудным веществом – собственно рудоносной. Периферическая часть представлена относительно маломощным (от первых метров до 50–70 м) телом, сложенным лейкократовым габбро вверх и более меланократовыми таксито-пойкилоофитовым (до пикритового) и контактовым габбро-долеритами вниз (см. рис. 4, А).

Лейкократовое габбро [6, 10] представляет собой крупнозернистую породу светло-серого цвета (см. рис. 4, Б) с изменяющейся структурой от габбровой до офитовой (см. рис. 4, В). В малоизменённых разностях этой породы содержится резко зональный плагиоклаз (см. рис. 4, Г) состава An_{45-100} (60–90%), пироксены, преимущественно авгит (5–30%), оливин (0–10%), рудные, в том числе медно-никелевые, сульфиды (1–3%), вторичные и акцессорные минералы. В межзерновых участках встречаются округлые выделения слабоаскристаллизованного стекла, обычно замещённого хлоритовидным материалом (см. рис. 4, Д). Стекло образовано из-за быстрого охлаждения габбрового силла. Его выделения сформировали миндалины, отмечаемые также С.Ф.Служеникиным в габбровых фрагментах интрузии Норильск I [16].

По своей структуре, химическому (см. таблицу) и минералогическому составу лейкократовое габбро – типично магматическая порода протокумулятивного происхождения, сформированная в результате скопления



(путём всплытия) протоплагиоклаза, кристаллизующегося в промежуточных очагах и на пути внедрения мафит-мезомафитовых магм. Иных возможностей («ликвационной», наложенного флюидного плавления и др.) для её образования не существует, так как состав и эволюция магм данного типа (см. рис. 3, В) неспособны к такому развитию, а наложенные на них воздействия и их продукты не могут выборочно концентрировать химические элементы и формировать мономинеральные породы в больших (наблюдаемых) объёмах. Существующие в литературе высказывания подобного рода не сопровождаются какими-либо обстоятельными обоснованиями и анализом возможности осуществления допускаемых процессов.

Скопления протоплагиоклаза в природе проявлены довольно широко, но обычно в сравнительно небольших объёмах (см. таблицу и рис. 4, Е).

Рудоносная часть норильских интрузий (мощностью от первых метров до 300 м и длиной до 15 км и более) дифференцирована от оруденелых контактового (Гк), такситового (Гт) и пикритового (Гп) габбро-долеритов внизу, через сульфидоносный оливин-биотитовый (Гоб) и слабосульфидоносные оливиновый (Го), оливин-содержащий (Гос) и безоливиновый (Гбо) габбро-долериты до практически бессульфидного габбро-диорита (Гд) вверху (см. рисунки 1, В, 5, Б и 6, Г, Д).

В верхнем эндоконтакте рудоносной части интрузий (см. рисунки 6, А–Г и 9, А) находятся фрагментарные тела лейкократового габбро, верхних контактового

(Гвк), такситового (Гвт), пикритового (Гвп) и троктолитового (Гвтр) габбро-долеритов, которые по своему составу и структуре аналогичны породам периферического габбрового силла и являются его реликтами. Они довольно сильно подвержены вторичным изменениям. В них присутствует бедная вкрапленная минерализация халькопирит-пентландит-пирротинового состава, нередко отличающаяся относительно высоким содержанием металлов платиновой группы (см. рис. 9, А). Это дало основание выделять в верхней части рудоносных интрузий особый платиноносный малосульфидный горизонт [16]. В действительности сплошной горизонт отсутствует (см. рис. 8, А), а имеются отдельные тела с платино-медно-никелевой минерализацией, проявляющей явные признаки её флюидного наложения на более ранние породы силла лейкократового габбро, как и на вмещающие их образования, в том числе на так называемые эруптивные брекчии [16].

Надо сказать, что концентрация платиновой минерализации вокруг и в пределах ранее образованных пород (ксенолитов), включённых в платиноносные магматические комплексы, является довольно распространённым фактом (см. рис. 9, Б). Она связана с конвективной миграцией рудоносных флюидов вмещающей магмы к более холодному телу вследствие наличия между ними температурного перепада.

По характеру расположения в рудоносной части интрузива габбровые тела подразделяются на «эндо-контактовые» и «блуждающие» [6, 10]. Большинство

Химический состав лейкократового габбро интрузий Норильского и других районов

Состав	1	2	3	4	5	6	7	8
SiO ₂	46,28	46,95	46,50	47,54	47,82	45,54	47,09	46,14
TiO ₂	0,48	0,80	0,72	0,56	2,00	1,06	0,61	3,50
Al ₂ O ₃	20,84	19,88	19,51	20,05	19,99	23,39	21,35	20,93
Fe ₂ O ₃	1,72	2,22	2,70	1,58	2,10	1,98	2,05	3,80
FeO	5,16	6,56	6,02	4,93	6,48	6,98	6,44	6,27
MnO	0,08	0,11	0,10	0,08	Сл.	0,27	0,12	–
MgO	5,38	4,63	5,37	4,49	4,94	4,60	4,18	3,70
CaO	11,35	11,43	11,72	11,82	11,65	11,82	12,31	11,30
Na ₂ O	2,07	2,41	2,39	3,11	3,51	2,50	1,91	2,90
K ₂ O	1,40	1,56	1,04	1,14	0,67	0,44	0,71	0,60
P	0,02	0,04	0,09	0,08	0,56	0,13	0,20	0,42
S	0,57	0,49	0,06	0,22	–	–	–	–
CO ₂	0,39	0,07	0,74	0,75	Нет	–	–	–
H ₂ O [–]	0,36	0,32	0,47	0,49	0,07	0,72	0,56	–
H ₂ O ⁺	2,74	2,31	2,35	2,57	0,21	0,62	2,72	0,11
Сумма	98,84	99,78	99,78	99,41	100,0	100,05	100,27	99,67

Примечание. 1 – внутреннее габбро интрузии Норильск I (среднее из 3 анализов); 2 – внешнее габбро интрузии Норильск I (среднее из 5 анализов); 3 – внешнее габбро интрузии горы Чёрная (среднее из 4 анализов); 4 – внутреннее габбро интрузии Талнах (среднее из 2 анализов); 5 – осипит интрузии Трёхпирамидной горы (23); 6 – порфировидный долерит острова Малл (19); 7 – порфировидный анортитовый диабаз интрузии скалы Амо (18); 8 – витрофировое (осипитовое) габбро траппов Декана (2); Сл – следы; «–» – не анализировалось; Нет – не установлен.

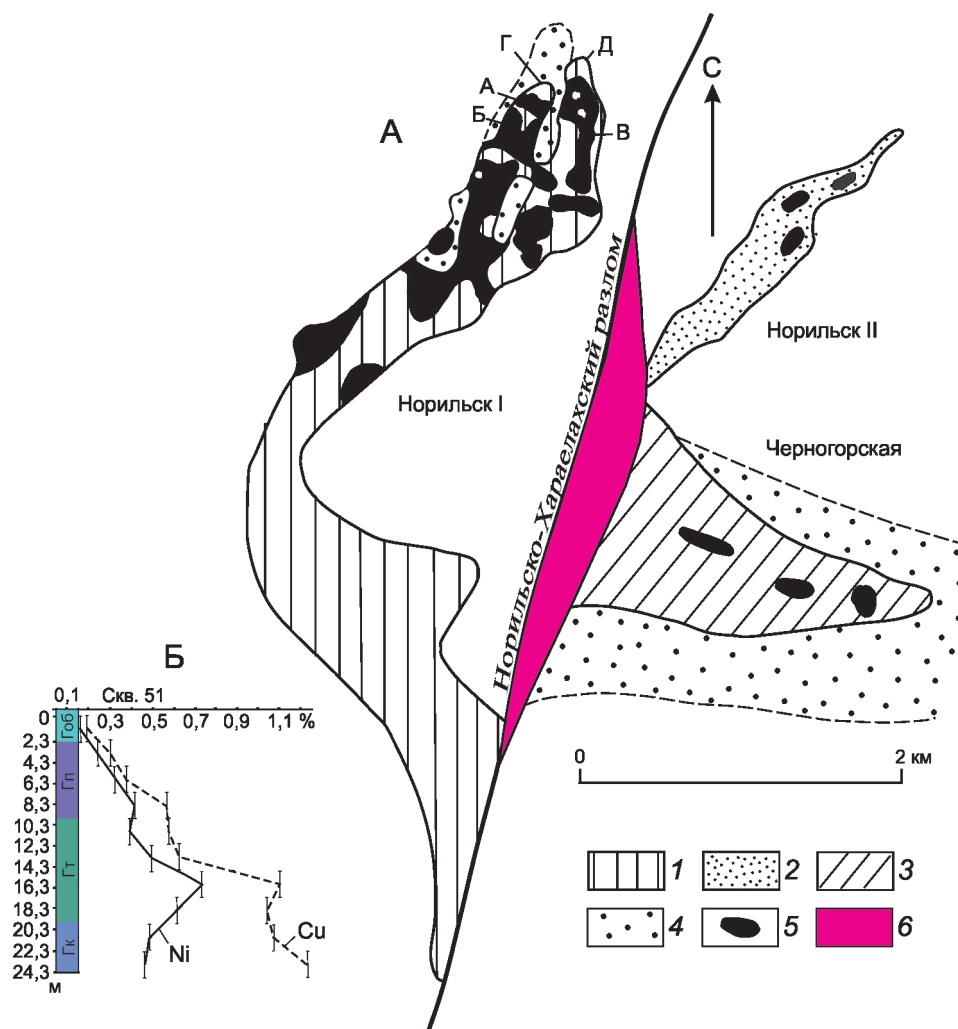


Рис. 5. Размещение рудоносных интрузий в Норильском рудном поле:

А – интрузии: 1 – Норильск I, 2 – Норильск II, 3 – Черногорская; 4 – периферические части интрузий (силлы лейкократового габбро); 5 – «внутреннее» габбро; 6 – перспективная площадь возможного нахождения богатых руд на глубине; Б – изменение содержания никеля и меди в разрезе рудного горизонта месторождения Норильск I, рудник «Угольный ручей», восточный борт центрального карьера, гор. 330 м (данные эксплуатационной разведки); Гоб – оливин-биотитовый, Гп – пикритовый, Гт – такситовый, Гк – контактовый габбро-долериты

габбровых обособлений относится к эндоконтактовым. Они размещаются в верхних частях интрузий (см. рисунки 6, А–В, 8, А и 9, А). Мощность эндоконтактовых тел изменяется от нескольких сантиметров до 90 м, протяжённость от десятков метров до 1,7 км.

Блуждающие габбровые обособления составляют незначительную часть габбровых тел. Они встречаются во всех дифференциатах интрузий в виде включений, нередко с резкими (но безреакционными) границами (см. рис. 4, Ж, 3), что указывает на их принадлежность к одной магматической системе. Размеры и морфология этих тел довольно разнообразны. Среди наиболее крупных обособлений (1–5 м по мощности и десятки

метров по протяжённости) преобладают уплощённые тела, ориентированные своей длинной осью параллельно контактам окружающих дифференциатов (см. рис. 6, В). Более мелкие (до сантиметровых включений) габбровые обособления имеют неправильную или округлую форму (см. рис. 4, Ж, 3).

Таким образом, существуют явные признаки наложения рудоносной части интрузий на периферическую габброидную часть. К ним относятся находящиеся в рудоносных телах крупные и мелкие реликтовые включения отдельных пород силла лейкократового габбро (см. рисунки 4 Ж, 3 и 6, А–В) и его полнообъёмные фрагменты с наложенной платиновой минерализацией

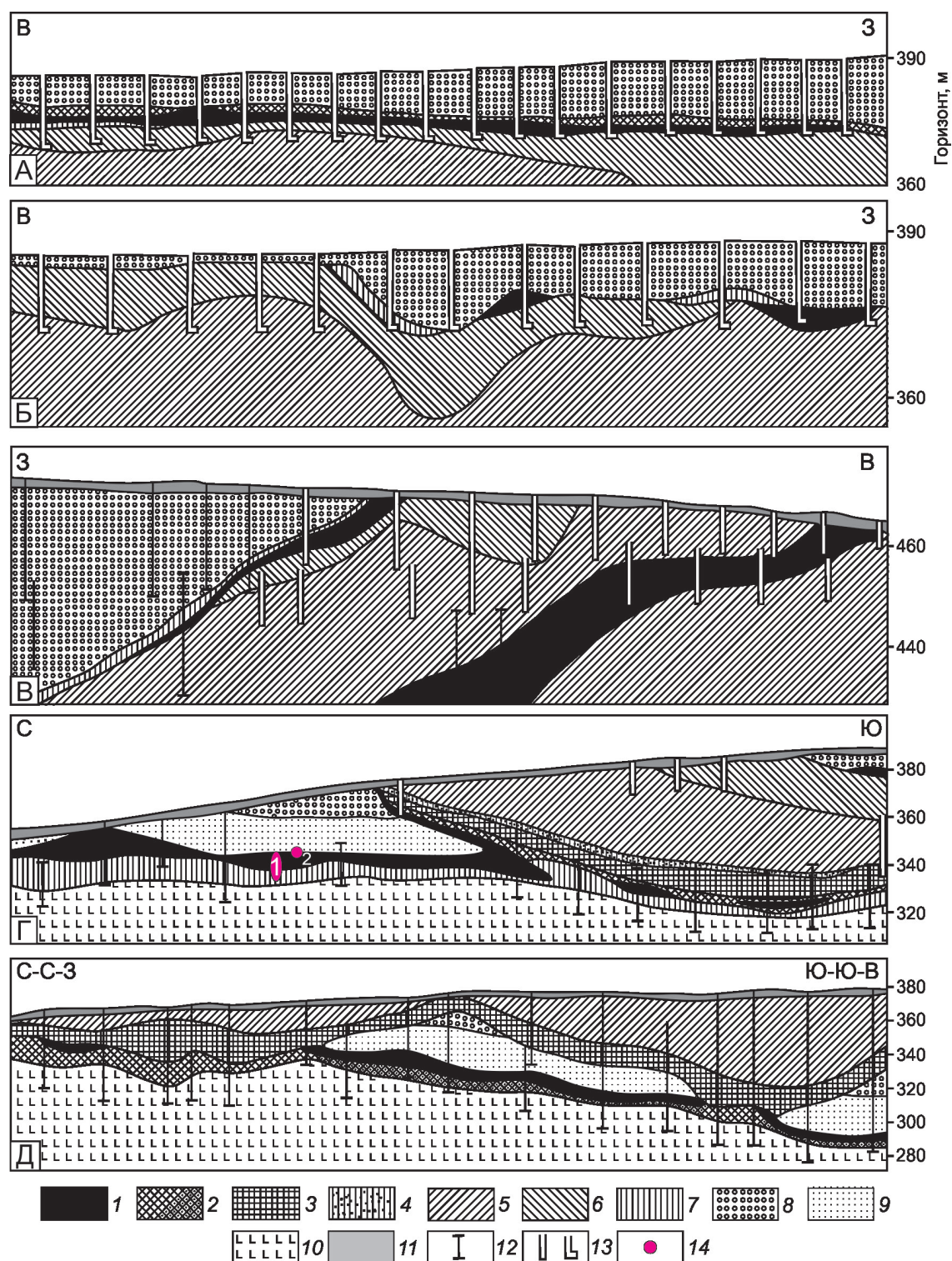


Рис. 6. Разрезы интрузии Норильск I:

1 – лейкократовое габбро; 2 – такситовые и таксито-пойкилоофитовые (с точечным крапом) габбро-долериты; 3 – пикритовый габбро-долерит; 4 – оливин-биотитовый габбро-долерит; 5 – безоливиновый и оливинсодержащий габбро-долериты; 6 – безоливиновый призматически зернистый габбро-долерит и габбро-диорит; 7 – контактовый габбро-долерит; 8 – толеитовый базальт; 9 – лабрадорный базальт; 10 – андезитовый базальт; 11 – четвертичные отложения; 12 – буровые скважины; 13 – разведочные колодцы; 14 – места фотосъемок (см. рис. 4, А, В, Г, Д); места расположения разрезов помечены на рис. 5: А, Б, В, Г, Д; горизонтальный масштаб равен вертикальному

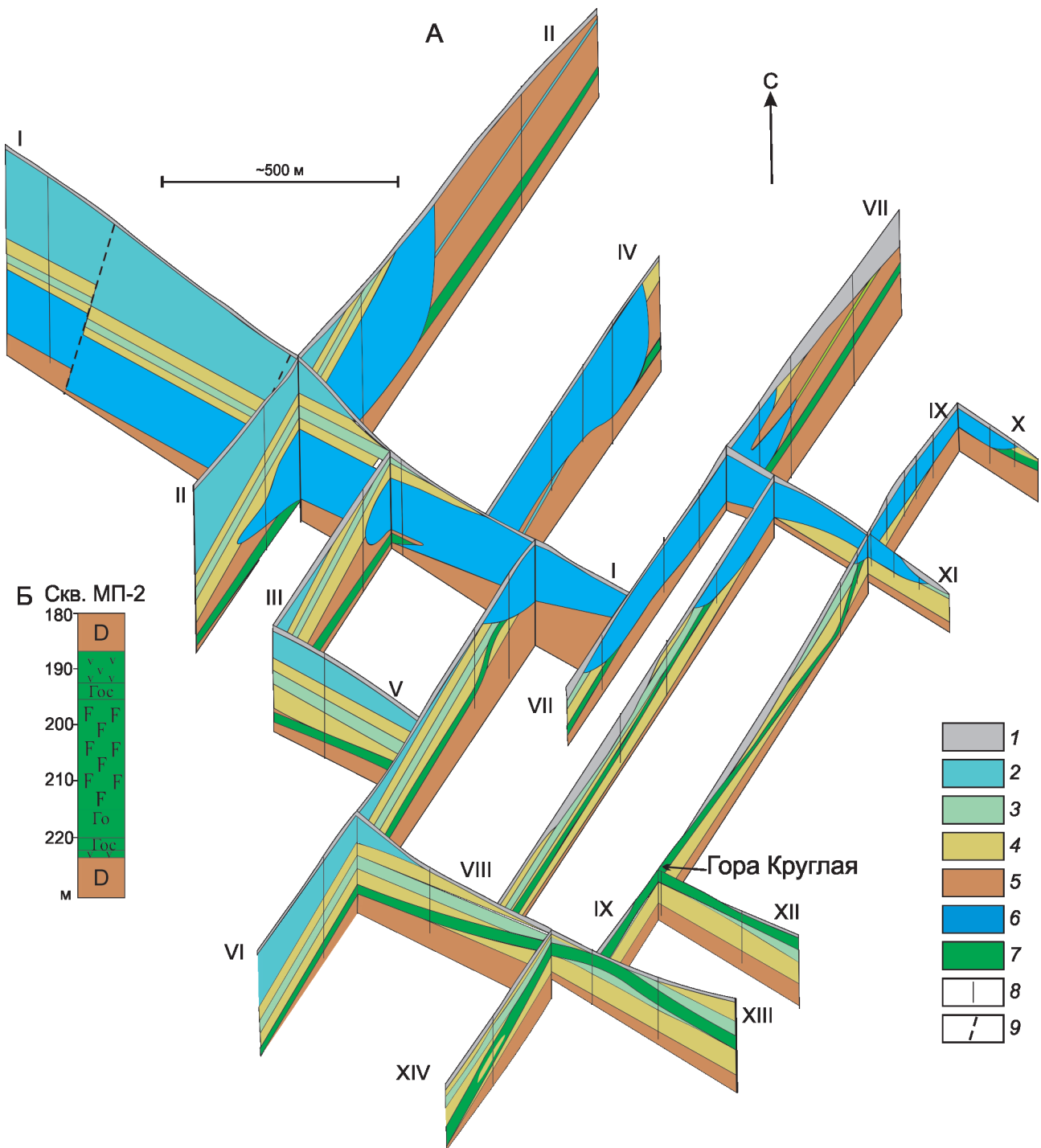


Рис. 7. Разрезы Черногорской интрузии:

А – каркасная диаграмма: 1 – четвертичные отложения; 2 – базальты ивакинской свиты; 3 – титан-авгитовый долерит; 4 – породы Тунгусской серии (песчаники, алевролиты, аргиллиты, угли); 5 – отложения верхнего девона (известняки, мергели, доломиты); 6 – рудонесущий интрузив; 7 – силл лейкократового габбро; 8 – скважины; 9 – разрывные нарушения; римские числа – номера разрезов; Б – разрез габбрового силла [17]: Гос – оливинсодержащий габбро-долерит; F – лейкократовое габбро; v – микродолериты; D – отложения девона

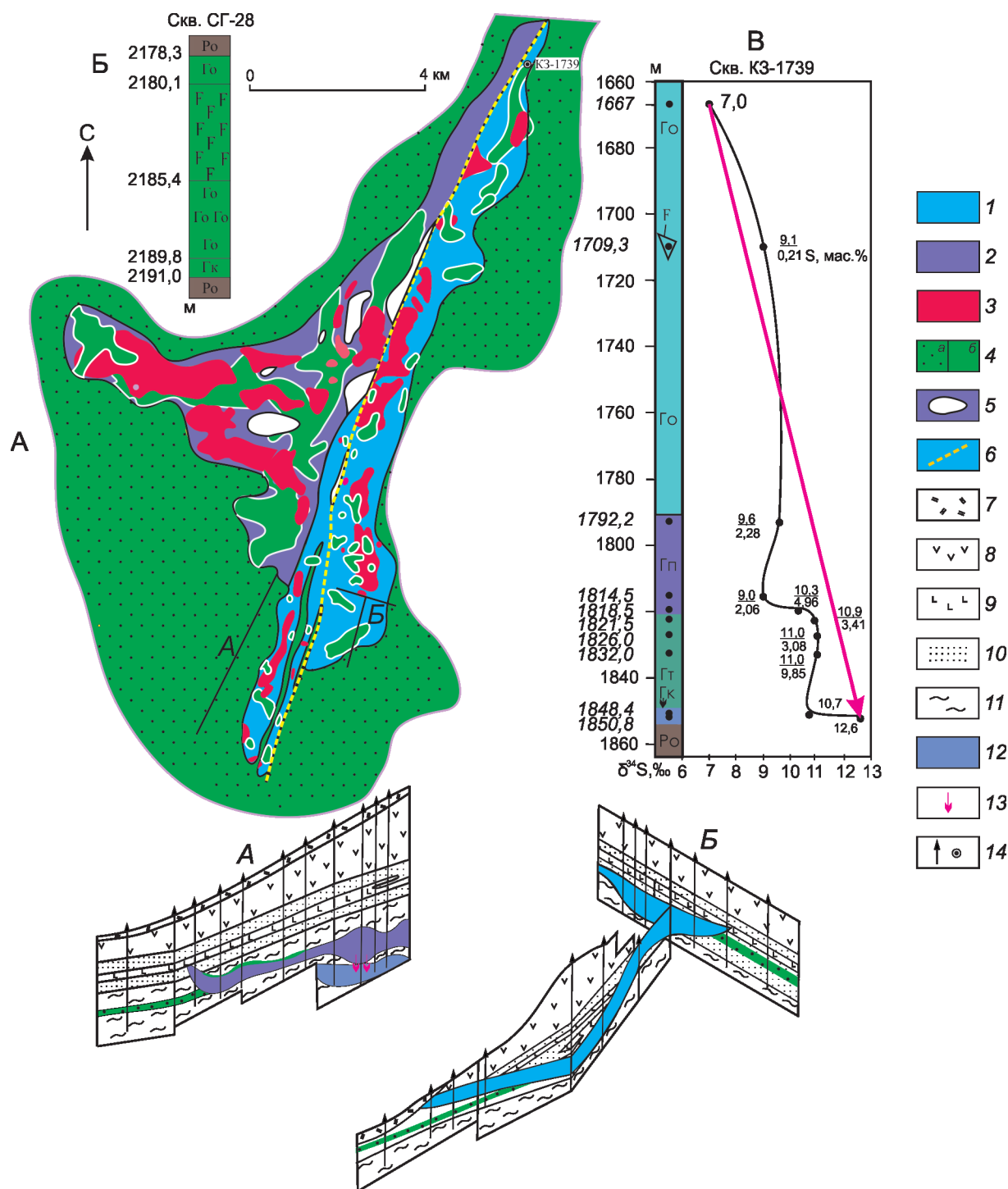


Рис. 8. Талнахское рудное поле:

А – план и разрезы: 1 – Талнахская и 2 – Хараелахская интрузии; 3 – массивные залежи сульфидных руд; 4 – силл лейкократового габбро (а) и «внутреннее» габбро (б); 5 – участки, где нет интрузивных тел; 6 – Норильско-Хараелахский разлом; 7 – четвертичные отложения; 8 – базальты (пикритовый, порфировый, толеитовый, плагиоклазовый, лабрадорный порфирит, титан-авгитовый, туфы); 9 – долериты; 10 – породы тунгусской серии; 11 – отложения девона; 12 – Нижнеталнахская интрузия; 13 – направление перемещения сульфидного расплава; 14 – буровые скважины; Б – разрез силла лейкократового габбро [17]: Го – оливиновый габбро-долерит; Ф – лейкократовое габбро; Гк – контактовый габбро-долерит; Ро – роговики; В – изменение изотопного состава серы сульфидов в разрезе Талнахской интрузии [19]: цифры над чертой – $\delta^{34}\text{S}, \text{‰}$, под чертой – S, мас. %

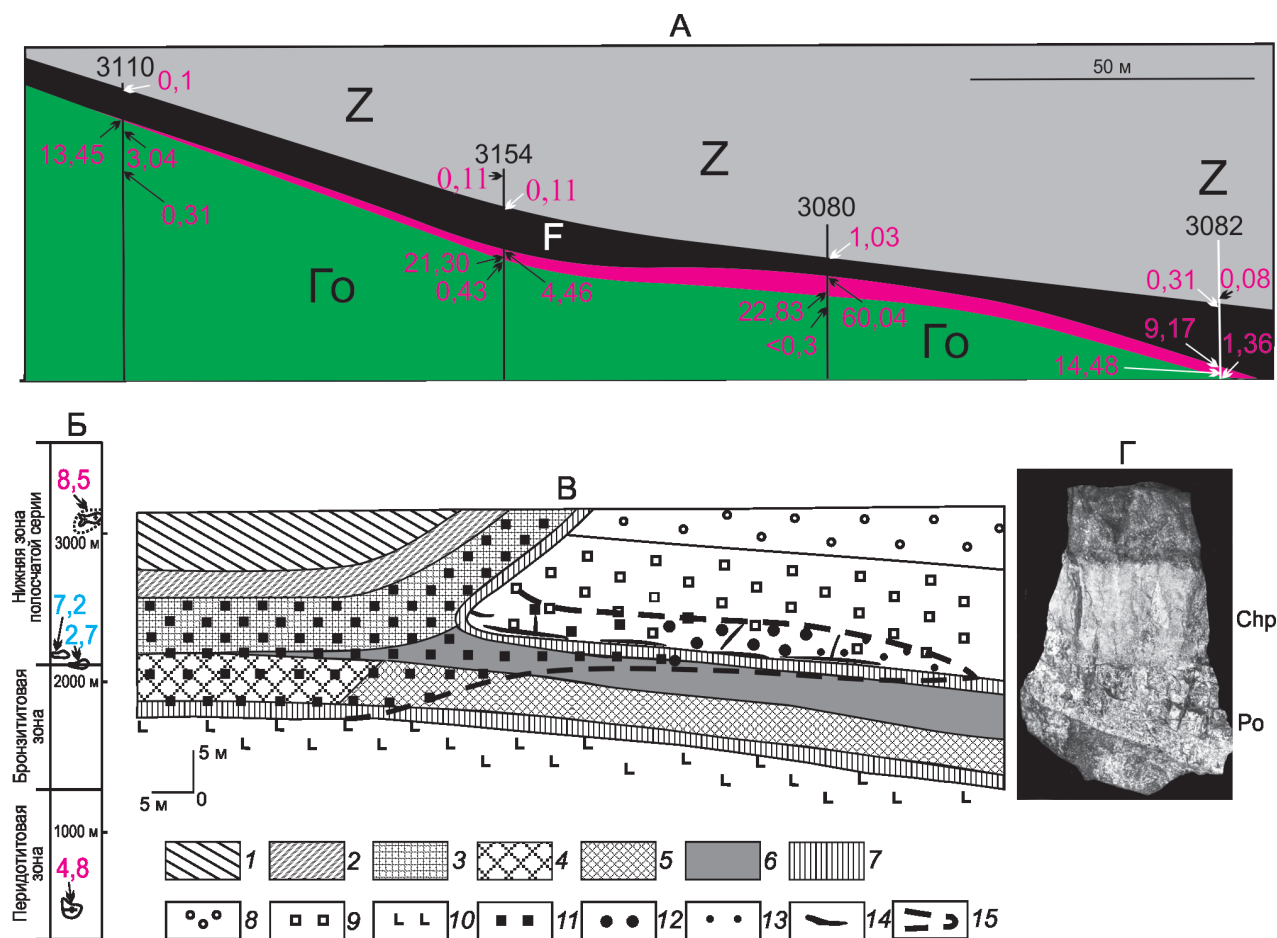


Рис. 9. Наложенная Pt-Cu-Ni минерализация в интрузии Норильск I и в комплексе Стиллутер, США:

А – минерализованное тело лейкократового габбро верхнего эндоконтакта интрузии Норильск I [16]; Z – базальты, Go – оливиновый габбро-долерит, F – лейкократовое габбро с минерализованным слоем внизу (красное); цифры: чёрные – номера скважин, красные – содержание МПГ, г/т; Б – положение обогащённых МПГ ксенолитовых тел (граниты, песчаники, хромиты) в магматическом комплексе Стиллутер [24]; цифры: красные – содержание суммы Pt+Pd+Rh, голубые – только Pd, г/т; В – наложенная минерализация на силл лейкократового габбро, зарисовка восточного борта Северо-Восточного карьера рудника Угольный ручей [8]: 1 – офитовый оливиновый габбро-долерит; 2 – пойкилоофитовый оливиновый габбро-долерит; 3 – пикритовый габбро-долерит; 4 – такситовый габбро-долерит; 5 – таксито-пойкилоофитовый габбро-долерит; 6 – лейкократовое габбро; 7 – контактовый габбро-долерит; 8 – толеитовый базальт; 9 – двуплагиоклазовый базальт; 10 – андезит-базальт; оруденение: 11 – пентландит-халькопирит-пирротинное, 12 – пентландит-халькопиритовое, 13 – существенно халькопиритовое; 14 – массивные руды; 15 – контур распространения наложенных руд; Г – фрагмент ответвления от сульфидной залежи, дифференцированный на пирротинную часть внизу (Po) и халькопиритовую (Chp) вверх (натуральная величина)

(см. рис. 9, А), а также с наличием в кровле перекрывающих силл осадочных пород с графитизированным углём пласта «Заметный» (см. рис. 4, И–Л). В него как в наиболее ослабленную зону внедрялся кашеобразный материал силла. Имеются участки явного наложения сульфидной минерализации рудоносных тел на породы силла точно так же, как и на породы подстилающих и перекрывающих интрузии осадочных и вулканогенных толщ (см. рис. 9, В).

Существуют также места, где меланократовая часть габбрового силла (таксито-пойкилоофитовый и контак-

товый габбро долериты), сохраняя мощность и состав, без каких-либо нарушений продолжается такситовым и контактовым горизонтами рудоносной части интрузии (см. рис. 6, Г, Д). А там, где рудоносное тело залегает (поднимается) выше габбрового силла, у него отсутствуют эти породы (Гт и Гк). Здесь находится только пикритовый (Гп) слой с небольшим контактовым подслоем (см. рис. 6, Д). Эти факты указывают на несколько более раннее образование такситового и контактового слоёв по отношению к вышележащим составляющим рудоносной части и на возможную принадлежность их

габбровому силлу, верхняя, преимущественно габброидная часть которого позднее была оттеснена поступающей сульфидоносной магмой к кровле интрузива (см. рис. 6, А–Г).

Несмотря на наличие явных признаков наложения рудоносной части интрузий на передовую габбровую, их принадлежность к одной магматической системе не вызывает сомнения. На это указывают отсутствие термических воздействий поздних на более ранние образования и реакционных взаимоотношений между ними (имеются только механические нарушения). Родство и единство габбровых тел с рудоносной частью интрузий подтверждается также полным сходством их во всех основных геохимических показателях, полученных и приведённых в работе С.Ф.Служеникина и его соавторов [17]. Можно полагать, что не было существенно перерыва во времени образования данных составляющих рудоносных интрузий, а было продолжение в поступлении магмы. К тому же надо иметь в виду, что породы типа лейкократового габбро в принципе не могут кристаллизоваться из самостоятельного магматического расплава и формировать самостоятельные интрузии по той причине, что в природе не существует источника (исходного вещества), который обеспечивал бы зарождение магм со столь высоким содержанием Al_2O_3 до 20 мас.% и более (см. таблицу) [6].

Руды месторождений представлены вкрапленными сульфидами в нижних дифференциатах интрузива, массивными залежами и жилами, расположенными в основном в придонных эндо- и экзоконтактах, и экзоконтактовой преимущественно вкрапленной минерализацией, иногда размещённой в перекрывающих породах.

Рудное вещество характеризуется сложными химическим и минеральным составами и наиболее высокими содержаниями многих ценных компонентов по сравнению с другими подобными месторождениями мира [10, 14]. Кроме главных рудных компонентов (меди, никеля, железа и серы), в них в изоморфных и собственных минеральных формах содержатся кобальт, платина, палладий, родий, рутений, иридий, золото, серебро, кадмий, индий, олово, сурьма, теллур, свинец, таллий, висмут, мышьяк, цинк и др.

Главными рудообразующими минералами являются пирротин (троилит, гексагональный и моноклинный пирротины), халькопирит, пентландит (зернистый пентландит I и пентландит II – продукт распада моносльфидного (mss) и промежуточного (iss) твёрдых растворов), кубанит, талнахит, моихукит, магнетит, ассоциирующие с большим количеством других преимущественно сульфидных минеральных фаз цветных и благородных металлов – борнитом, халькозином, ковеллитом, хизлевудитом, миллеритом, годлевскитом, сульфидными, а также металлическими соединениями и твёрдыми растворами минералов платиновой группы (МПП), железа, никеля, меди, золота, серебра и др.

Во вкрапленных рудах интрузивов среднее содержание никеля составляет 0,4–0,6%, меди 0,6–0,8%, ЭПГ 2–5 г/т. В массивных рудах никель содержится в количестве 2–4%, медь 3–25%, ЭПГ 2–200 г/т.

На долю массивных руд приходится от ≤ 10 до $\geq 40\%$ от общей массы сульфидного вещества, составляющего от 3,5% (в Норильской и Талнахской интрузиях) до 8,3% (в Хараелахской интрузии) массы интрузива [10].

Как видно из рис. 2, А, рудное вещество норильских месторождений связано с сульфидоносной мезомафической (MgO 10–12 мас.%) магмой [10]. Можно допустить, что при её зарождении в мантии из сульфидной составляющей исходного материала в расплав переходило (вследствие фракционного плавления при соответствующих благоприятных P - T параметрах) повышенное количество меди и металлов платиновой группы, обогащённых наиболее легкоплавким палладием [10, 14]. Совместно с ними, как показано выше, в расплав могло переходить и повышенное количество тяжёлого изотопа ^{34}S . Ориентируясь на уже приведённые экспериментальные данные по нагреву сульфидов, величина обогащения здесь могла достигать $\sim 5\%$.

В дальнейшем в поднимающейся магматической колонне поведение веществ могло соответствовать рассмотренным выше закономерностям, главным результатом которых является последующее самообогащение магм рудным веществом и тяжёлым изотопом серы.

О возможности и степени самообогащения рудным веществом магматической колонны приблизительно можно судить по количеству её фронтальной протокумулятивной части – силла лейкократового габбро и внутриинтрузивного («внутреннего») габбро: с увеличением последних увеличиваются первые. Это проявлено в известных рудоносных интрузиях района. Так, в наиболее богатой рудным веществом Хараелахской интрузии на долю передовой протокумулятивной части (лейкократового габбро) приходится наибольшее количество (около 0,7 от общего магматического объёма), в Талнахской – $\sim 0,5$, Норильской – $\sim 0,2$, а в Черногорской – $\sim 0,6$ (см. рис. 1, Б).

Проявляется также прямая связь между количеством лейкократового габбро и составом рудного вещества – содержанием в нём меди и тяжёлого изотопа серы (см. рис. 1, Б). В рудах Хараелахской интрузии содержится больше меди (по отношению к никелю) и ^{34}S , чем в Талнахской, а в последней больше, чем в менее рудоносной интрузии Норильск I.

Исключением является Черногорская интрузия (см. рисунки 1, Б; 5 и 7), в поле которой лейкократового габбро содержится больше, чем в поле Норильского и Талнахского интрузивов, а рудного вещества значительно меньше. Возможная причина этого состоит в том, что в Черногорской интрузии из-за большого скопления рудного вещества (сульфидного расплава) на пути подъёма магматических масс оно не могло быть поднято магмой в верхние горизонты и в конечную камеру внедрения интрузива.

Наблюдаемая прямая связь между количеством лейкократового габбро и рудного вещества, как и содержанием меди и тяжёлого изотопа серы в нём, объясняется тем, что увеличение объёма лейкогаббро в головной части магматической колонны препятствовало (затормаживало вплоть до полного закупоривания и остановки) её подъёму в земную кору и продвижению в ней. Это, в свою очередь, способствовало более длительной и детальной дифференциации магматического материала, приводящей к накоплению рудного вещества и обогащению его медью (по отношению к никелю) и ^{34}S в более глубокой части колонны (см. рисунки 1, Б и 3, Б).

От количества лейкократового габбро зависели также высота подъёма и уровень внедрения магматической колонны, а значит и глубина нахождения интрузий, от которой, в свою очередь, зависит степень их рудоносности. Более глубокие интрузии содержат больше рудного вещества, чем менее глубокие. Это видно на примере реальных рудоносных интрузий Норильского района, выстраивающихся в следующем порядке (с увеличением глубины и количества рудного вещества): Норильск II, Норильск I, Талнахская, Черногорская (?) и Хараелахская (см. рис. 1, Б).

В целом же можно считать, что практически одновременное накопление наиболее тяжёлых рудных веществ (сульфидного расплава, меди и ^{34}S) и наиболее лёгкого силикатного (плагиоклаза) материала вполне закономерно. Каждый из них скапливался под действием силы тяжести: тяжёлое опускалось, а лёгкое поднималось.

Как видно на рисунках 5 и 7, Черногорская интрузия резко обрывается грабеном Норильско-Хараелахского разлома, образованию которого могло способствовать большое скопление здесь рудного вещества. К нему же примыкает погружающаяся часть рудоносной интрузии Норильск II. Не исключено, что «недостающий» рудный материал Черногорской интрузии находится на глубине оконтуренной красным площади (см. рис. 5). Его количество может соответствовать количеству руд Талнахского интрузива, судя по соотношению F/G (см. рис. 1, Б).

Сложность обнаружения и использования возможных здесь залежей руд состоит в вероятности их глубокого залегания, недоступного для добычи обычными (применяемыми в настоящее время) методами. Однако не исключено использование в этом случае нетрадиционных способов. Например, технологий переработки руд норильских и других месторождений с применением гидротермальных транспортных процессов [7, 9, 13]. Они позволяют осуществлять поэлементное разделение и вынос веществ с возможностью самопроизвольного подъёма и переноса получаемых продуктов с практически неограниченных глубин и на большие расстояния. Транспорт веществ осуществляется с большой скоростью за счёт конвекции гидротермального раствора, вызываемой наличием температурного пере-

пада. Эти технологии могут быть использованы и для добычи рудных веществ в пределах глубоких горизонтов Талнахского рудного поля.

В представлениях о фракционировании изотопов серы при подъёме магм можно ориентироваться по величинам и разнице значений $\delta^{34}\text{S}$ сульфидов силла лейкократового габбро (головной части магматических колонн) и среднего состава сульфидной массы рудоносных частей интрузий. Для силлов лейкократового габбро наиболее низкая величина $\delta^{34}\text{S}$ равняется $-0,1\%$ [1], а среднее значение для рудоносных тел $\sim 8-9\%$. То есть разница составляет $\sim 9\%$.

При этом надо отметить, что большинство имеющихся в литературе данных по изотопному составу серы сульфидов лейкократового габбро показывает более высокие значения $\delta^{34}\text{S}$, близкие к значениям рудоносных тел [17 и др.]. Возможно, что в этих случаях места опробования габбро находились в области геохимического воздействия рудоносных массивов на окружающую среду, границы которого удаляются от источника до нескольких километров [15]. Приведённая же выше величина $\delta^{34}\text{S}$, равная $-0,1\%$, была получена при анализе образца лейкократового габбро горы Круглой, наиболее удалённого от рудоносной части Черногорской интрузии (см. рис. 7).

Условия накопления рудных веществ в конечных камерах внедрения магм имеют решающее значение в образовании Pt-Cu-Ni месторождений. От них зависят место и степень концентрации руд, их качество и общие запасы [10 и др.]. В данной статье по этой стадии затрагиваются только вопросы изотопного фракционирования серы и лишь для конечного периода кристаллизации и становления магматических тел.

Фракционирование изотопов серы в период становления магматических тел (кристаллизации магмы в малоподвижном состоянии) наглядно проявлено в керне скв. КЗ-1739 (см. рис. 8, В), пробурённой в северной части Талнахского интрузива (см. рис. 8, А). В его разрезе, как и в других подобных интрузиях района, имела место отсадка выделений сульфидной жидкости из общего сравнительно гомогенного магматического материала, остатки большей части которого представлены практически бессульфидными и малосульфидными, самыми объёмными дифференциатами: безоливиновым, оливинсодержащим и оливиновым габбро-долеритами. Они составляют около 80% всего магматического материала.

В ходе отсадки в этом объёме и перемещения вниз сульфидная жидкость обогащалась тяжёлым изотопом серы от $\delta^{34}\text{S}$ 7,0‰ (в Го, 1660 м) до $\delta^{34}\text{S}$ 12,6‰ (в Гк, 1850,8 м). Обогащение происходило в результате оставления в силикатном расплаве (при выделении из него сульфидной жидкости) и отдачи ему сульфидными частицами (при изотопном обмене между ними) преимущественно лёгкого изотопа ^{32}S как энергетически более выгодного и предпочтительного по сравнению с

изотопом ^{34}S [11]. Сульфиды оливинового габбро-долерита со значением $\delta^{34}\text{S}$ 7,0‰ сформированы именно растворённой в силикатном расплаве («силикатной») и выделенной в виде сульфидов при его охлаждении серой.

По мере опускания сульфидной жидкости к подошве интрузива она обогащается медью, что свойственно всем рудоносным интрузиям Норильского района, как и другим известным в мире платино-медно-никелевым и платиновым месторождениям [10, 14]. Одновременно вместе с увеличением содержания меди в опускающейся сульфидной жидкости увеличивается количество тяжёлого изотопа ^{34}S (см. рис. 8, В).

Причина обогащения сульфидной жидкости медью состоит в том, что она (сульфидная жидкость) кристаллизуется в широком температурном интервале, составляющем около 200°C и более. Вначале выделяется пирротин (~1190°C), затем пентландит (~1000°C), а в конце халькопирит ($\leq 850^\circ\text{C}$) и другие минералы меди – борнит, халькозин, ковеллин. Этот температурный, химический и минеральный ряд выдерживается в разрезе рудоносной части интрузивов, в основном вкрапленных руд, кристаллизующихся по мере опускания сульфидной жидкости (см. рис. 5, Б) и в массивных образованиях (см. рис. 9, Г), где медистые (позднее кристаллизующиеся) разности занимают верхние и краевые части залежей.

Как во вкрапленных, так и в массивных сульфидных скоплениях позднекристаллизующаяся медистая фракция под тектоническими воздействиями часто мигрирует от ранее выделившейся и закристаллизованной пентландит-пирротиновой составляющей. В результате образуются пространственно обособленные медистые залежи вкрапленных и сплошных руд, широко проявленные в месторождениях Норильского района [10]. Причём важно отметить, что разделение первично гомогенного сульфидного расплава на богатую железом и богатую медью части (фракции) может происходить ещё в его жидком (предкристаллизационном) состоянии, как это наблюдалось автором в экспериментах [10].

Обогащение медистых составляющих сульфидных руд тяжёлым изотопом ^{34}S связано с теми же причинами – с фракционной дифференциацией и последовательной кристаллизацией сульфидного расплава, при которых ранние фазы обогащаются энергетически более выгодными лёгкими изотопами, а поздние пользуются остатками, обогащёнными тяжёлыми изотопами [11].

С этим фракционированием связано ранее сделанное заключение по норильским месторождениям – чем ниже в рудах отношение Ni/Cu, тем выше в них значение $\delta^{34}\text{S}$ [4]. Другой факт, свойственный рудам Талнахского и Хараелахского месторождений, состоит в том, что более глубоко залегающие руды последнего больше обогащены тяжёлым изотопом серы, чем первого (см. рис. 1, Б). Это может быть обусловлено бо-

лее длительным процессом дифференциации магмы на пути её подъёма, приведшим к увеличению не только значения $\delta^{34}\text{S}$, но и объёма и массы сульфидов, как и протоплагноклаза – лейкократового габбро, присущих Хараелахскому месторождению.

Есть основания предполагать, что сульфиды норильских месторождений изначально (в мантийном источнике) обогащались изотопом ^{34}S при их переходе в расплав, так как они более богаты медью по сравнению с другими месторождениями (см. рис. 2, А).

Таким образом, можно допустить, что накопление рудных веществ и фракционирование изотопов серы норильских месторождений происходило в процессах зарождения магм в мантии, их подъёма в земную кору, перемещения в ней и становления (кристаллизации и дифференциации) в конечных камерах внедрения.

За минимальную величину фракционирования изотопов серы при зарождении магмы – переходе в расплав существенно медистой части исходных сульфидов (см. рис. 2, А) – можно принять данные по нагреву и плавлению природных сульфидов норильских месторождений [10, 11]. Она составляет порядка 3–5‰, то есть на эту величину могли быть обогащены тяжёлым изотопом серы сульфиды норильских рудоносных магм при их зарождении в мантии (по отношению к исходному веществу с условным значением $\delta^{34}\text{S}$ 0,0‰).

На пути подъёма магм в земную кору рассмотренные выше их дифференциация с образованием протокристаллического фронта (лейкократового габбро) и фракционирование изотопов серы могли увеличить $\delta^{34}\text{S}$ сульфидной фракции до 7–10‰.

Последующие процессы субгоризонтального внедрения магм и становления (кристаллизации) интрузий в конечных камерах могли приводить к увеличению $\delta^{34}\text{S}$ до 12–14‰, то есть до тех значений, которые в реальности имеют норильские Pt-Cu-Ni месторождения.

Из изложенных материалов можно сделать следующие основные выводы.

1. Внутриматрические преобразования норильских рудоносных интрузий могли обеспечить свойственные им скопления руд и обогащённость тяжёлым изотопом серы без ассимиляции вмещающих пород. Для этого требовалась глубинная протокристаллизация магмы на пути её подъёма в пределы земной коры.

2. Специфика норильских рудоносных интрузий и связанных с ними Pt-Cu-Ni месторождений состоит в сочетании большого количества рудного вещества, обогащённого медью и МПГ, повышенного содержания тяжёлого изотопа ^{34}S и наличия больших протокристаллических масс интрателлурического происхождения (лейкократового габбро). Причина специфики связана с особыми условиями зарождения магм, их длительным подъёмом в земную кору и медленным проникновением в конечные камеры внедрения. Они обеспечивались большим скоплением интрателлурического плагиоклаза в головной части магматической колонны,

препятствующего её движению и способствующего накоплению рудных веществ.

3. Состав магм и рудного вещества определялся температурой и степенью плавления мантийного материала при их зарождении и дальнейшей дифференциацией в ходе подъёма в пределы земной коры, поступления в конечные камеры внедрения и становления в них.

4. Интрателлурическое (глубинное) рудонакопление вызывалось многократной сменой «свежих» порций магм во фронтальной зоне их кристаллизации, что способствовало скоплению в ней сульфидного расплава, рудных компонентов и ^{34}S , «собираемых» с большого магматического объёма, многократно превышающего объём проявленных рудоносных интрузий.

5. Объём глубинных образований (лейкократового габбро) может находиться в прямой связи с количеством рудного вещества в интрузивах. Поэтому его следует учитывать при оценке перспективности магматических комплексов. В частности, целесообразно провести анализ на перспективность известных в районе интрузий, содержащих значительное количество лейкократового габбро, но считающихся малоперспективными. Например, к ним относятся интрузивы круглогорского типа [17], Чебичети и др.

6. Выделенная в качестве перспективной площадь, находящаяся на продолжении Черногорской интрузии, заслуживает проведения всесторонних геофизических исследований для выяснения возможности нахождения и добычи глубинных руд.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Августинчик И.А.* О составе сульфидной минерализации Нижнеталнахского интрузива // Тр. ЦНИГРИ. 1981. Вып. 162. С. 34–41.
2. *Вебман Н.А.* Пути дифференциации в траппах Декана // Геология и петрография трапповых формаций». – М.: Изд-во иностранной литературы, 1950. С. 244–295.
3. *Гриненко Л.Н.* Изотопный состав серы сульфидов некоторых медно-никелевых месторождений и рудопоявлений Сибирской платформы // Петрология траппов Сибирской платформы. – Л.: Недра, 1967. С. 221–229.
4. *Гриненко Л.Н.* Источники серы никеленосных и безрудных интрузий габбро-долеритов на северо-западе Сибирской платформы // Геология рудных месторождений. 1985. № 1. С. 3–15.
5. *Кеннеди Дж. Р., Рыженко Б.Н.* Влияние давления на эвтектики в системах Fe–FeS // Геохимия. 1973. № 9. С. 1392–1396.
6. *Лихачев А.П.* Роль лейкократового габбро в формировании норильских дифференцированных интрузий // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1965. № 10. С. 75–89.
7. *Лихачев А.П.* Возможности применения химических транспортных процессов в производстве цветных и благородных металлов // Цветные металлы. 1988. № 12. С. 29–31.
8. *Лихачев А.П.* О горизонтальной зональности экзоконтактовых руд Норильского месторождения // Геология рудных месторождений. 1969. № 3. С. 110–115.
9. *Лихачев А.П.* Теоретические и экспериментальные основы разделения веществ методом гидротермальных транспортных реакций // Теория процессов производства тяжёлых цветных металлов: сб. трудов ГИНЦВЕТМЕТа. 1994. № 1. С. 116–120.
10. *Лихачев А.П.* Платино-медно-никелевые и платиновые месторождения. – М.: Эслан, 2006.
11. *Лихачев А.П.* К вопросам образования, поведения и фракционирования химических элементов, их изотопов и минералов изотопов в природных процессах // Отечественная геология. 2017. № 6. С. 80–93.
12. *Лихачев А.П.* Непроизвольная сущность геологических и других природных процессов и определяющая роль воды в их проявлении // Отечественная геология. 2018. № 6. С. 67–76.
13. *Лихачев А.П., Толмачева Н.С., Кресан Ю.И.* Способ выделения железа и серы из медно-никелевых руд // Госкомизобретений СССР. 1990. Авт. свидетельство № 1637343.
14. *Налдретт А.Дж.* Магматические сульфидные месторождения медно-никелевых и платинометаллических руд. – СПб.: Изд-во СПбГУ, 2003.
15. *Рябов В.В.* Структура геохимического поля медно-никелевых месторождений Норильского типа. – М., 2010.
16. *Служеникин С.Ф.* Малосульфидное платиновое оруденение в дифференцированных базит-гипербазитовых интрузивах Норильского района // Автореф. дис. ... канд. геол.-минер. наук. – М.: ИГЕМ РАН, 2000.
17. *Служеникин С. Ф., Малич К. Н., Григорьева А. В.* Базит-гипербазитовые дифференцированные интрузии круглогорского типа: петрология и рудоносность (Норильский район) // Петрология. 2018. Т. 26. № 3. С. 282–316.
18. *Соболев В.С.* Петрология траппов Сибирской платформы // Тр. АН СССР. Т. 43. 1936.
19. *Li C., Ripley E. M., Naldrett A.J.* Compositional variations of olivine and sulfur isotopes in the Noril'sk and Talnakh intrusions, Siberia: implications for ore-forming processes in dynamic magma conduits // Economic Geology. 2003. Vol. 98. P. 69–86.
20. *Li C., Ripley E. M.* Sulfur contents at sulfide-liquid or anhydrite saturation in silicate melts: empirical equations and example applications // Economic Geology. 2009. Vol. 104. P. 405–412.
21. *Likhachev A.P.* Ore-bearing intrusions of the Noril'sk region // Proceedings of the Sudbury–Noril'sk symposium. – Ontario, 1994. Special Vol. 5. P. 185–201.
22. *Pirsson L.V.* Petrography of Tripyramid Mountain // Amer. Journ. of Sci. Vol. XXXI. No. 185, 1911. P. 405–431.
23. *Sharp W.E.* Melting curves of sphalerite, galena and pyrrhotite and decomposition curve of pyrite between 30–65 kilobars // J. Geophys. Res. 1969. Vol. 74. No. 6. P. 1646–1652.
24. *Stillwater Complex.* Spec. Publication 92. U.S. Geol. Survey. 1985.
25. *Tertiary and Post-Tertiary geology of Mull, Loch Aline and Oban.* Mem. / E.B.Bailey, H.H.Thomas et al. // Geol. Surv. Scotl. 1924.
26. *Wyllie P.J.* Experimental limits for melting in the Earth's crust and upper mantle // Geophysical Monograph Series. 1971. P. 279–301.

Основные черты минералого-геохимических особенностей руд месторождения Филизчай (Азербайджан)

Н.А.НОВРУЗОВ (Институт геологии и геофизики НАН Азербайджана; Азербайджан, AZ1143, г. Баку, пр. Г.Джавида, 119),
Н.А.САТТАРЗАДЕ (Бакинский государственный университет; AZ 1148, AZ-1073/1, ул. Академика Захида Халилова, 23)

Рассмотрены основные черты минералого-геохимических особенностей руд стратиформного колчеданно-полиметаллического месторождения Филизчай на Южном склоне Большого Кавказа. Полигенно-полихронные руды месторождения, формировавшиеся в условиях широкой вариации физико-химических параметров процесса минералообразования, характеризуются богатым минеральным составом и широким геохимическим спектром. Сравнением средних содержаний редких элементов в сульфидах с их минеральными кларками установлен коэффициент их геохимической обогащённости. Рудообразование на месторождении носит полиэтапный и многостадийный характер. На месторождении выявлена минералого-геохимическая зональность, что связано с закономерным пространственным размещением отдельных типов руд залежи. Для количественного выражения зональности вычислен показатель геохимической зональности на основе соотношений концентрации элементов фронтальных (Zn, Pb, Ag) и тыловых (Cu, Co, Mn) частей залежи.

Ключевые слова: Филизчай, колчеданно-полиметаллическое, рудообразование, редкие элементы.

Новрузов Новруз Ахмед оглу
доктор геолого-минералогических наук



nnovruz@rambler.ru

Саттарзаде Нигяр Айдын гызы
доктор геолого-минералогических наук

nigar-23@mail.ru

The main mineralogical-geochemical features of Filizchay deposit ores (Azerbaijan)

N.A.NOVRUZOV (Institute of Geology and Geophysics, National Academy of Sciences, Azerbaijan)
N.A.SATTARZADE (Baku State University)

The article describes the main mineralogical and geochemical features of the ores from the stratiform pyrite-polymetallic Filizchay deposit on the southern slope of the Greater Caucasus. Polygenic-polychronic ores of the deposit formed through a wide variation of the physical-chemical parameters of the mineral formation process are characterized by a rich mineral composition and a wide geochemical spectrum. By comparing the average content of rare elements in sulfides with their mineral clark, the coefficient of their geochemical enrichment is established. Ore formation at the deposit has a polyphase and multi-stage character. Mineralogical and geochemical zonality has been identified at the deposit, which is associated with the regular spatial distribution of certain types of ore deposit. For the quantitative expression of zonality, the index of geochemical zonality is calculated on the basis of the ratios concentration of the elements in the frontal (Zn, Pb, Ag) and rear (Cu, Co, Mn,) parts of the deposit.

Key words: Filizchay, pyrite-polymetallic, ore formation, rare elements.

Стратиформное месторождение Филизчай на Южном склоне Большого Кавказа, являясь самым крупным колчеданно-полиметаллическим месторождением в регионе, характеризуется многообразием текстурно-минералогических типов руд, их богатым

минеральным составом и широким геохимическим спектром. Промышленная ценность колчеданных месторождений региона связана с последующим наложением на них продуктивных пирит-полиметаллической и медно-пирротиново-полиметаллической

ассоциаций второго рудного этапа, в результате которого были созданы комбинированные полигенно-полихронные рудные залежи [4–6, 12].

Площадь Филизчайского месторождения сложена нижнеюрскими терригенными образованиями верхнего плинсбаха (филизчайская серия) и тоара (губахская и муровдагская серии). Отложения филизчайской серии (J_1p_2), представленные толщей тёмно-серых, почти чёрных глинистых сланцев, чередующихся в виде пачек с пакетами песчаного флишоида, являясь самой древней толщей месторождения и выступая в ядре Карабчайской антиклинали в виде относительно узкой полосы, вмещают Филизчайскую залежь.

Колчеданно-полиметаллическая залежь месторождения, сложенная преимущественно (90–95%) агрегатами сульфидных руд, морфологически выражена единым компактным пластообразным телом с простиранием 1000–1200 м, падением 1500–1600 м и средней мощностью 12,5 м, закономерно возрастающей с западного фланга на восточный. Кровля залежи на всём протяжении характеризуется более устойчивым, а подошва – более сложным строением. Медно-пирротиновые руды, составляющие около 2% объёма рудной залежи, образуют жилообразное тело в лежащем боку стратиформной части последней.

Основные текстурные рисунки колчеданно-полиметаллических руд – слоисто-полосчатый, массивный, пятнисто-брекчиевидный, прожилково-вкрапленный. Медно-пирротиновые руды характеризуются массивной, порфировидной, брекчиевидной и прожилково-вкрапленной текстурами. Отмечается большое разнообразие структур руд, среди которых преобладают зернистые разновидности (гипидиоморфнозернистая, аллотриоморфнозернистая, интерстициальная). В рудах присутствуют почковидные, колломорфно-зональные и глобулярные агрегаты пирита, а также других сульфидных минералов. Структуры замещения представлены коррозионной, пластинчатой, петельчатой, прожилковой и другими разновидностями. Структуры распада твёрдых растворов обычно представлены эмульсионными включениями халькопирита в сфалерите.

В составе полигенно-полихронных руд Филизчайского колчеданно-полиметаллического месторождения пирит является господствующим сульфидным минералом. К главным минералам руд относятся также сфалерит, галенит, халькопирит и пирротин. Рудосоставляющие сульфидные минералы представлены несколькими генерациями. Второстепенные минералы – магнетит, мушкетовит, иногда арсенопирит – обычно развиваются в рудах пиритового и магнетит-пиритового составов. Тетраэдрит, теннантит, бурнонит, подавляющее большинство редко встречающихся минералов (буланжерит, джемсонит, геокронит, нагиагит, эмплектит, бегерит и др.) обычно устанавливаются в карбонатных полосках колчеданно-полиметаллических руд. Главные

жилые минералы – карбонаты, кварц, хлорит – также отмечаются в нескольких генерациях. Несмотря на незначительный масштаб зоны окисления месторождения (всего 0,5% объёма рудной залежи), она характеризуется очень богатым минеральным составом: самородные элементы, сульфиды, окислы, гидроокислы, карбонаты, сульфаты, арсенаты, силикаты и др.

Рудообразование на Филизчайском месторождении носит полиэтапный и многостадийный характер. По мнению Н.К.Курбанова и др. (1983), в истории формирования рудной залежи выделяются три основных этапа минералообразования: на первом произошло отложение гидротермально-осадочных, на втором – гидротермально-метасоматических колчеданно-полиметаллических, а на третьем – гидротермально-метаморфогенных халькопирит-пирротиновых руд. Результаты изотопных исследований серы сульфидов согласуются с мнением о гидротермально-метасоматическом способе формирования руд колчеданно-полиметаллического состава. Установленные Н.А.Новрузовым [10] на основе использования кадмиевого [2] и кобальтовых геотермометров [1, 11] данные относительно температурных условий формирования полиметаллических руд (270°C) и медно-пирротинового рудогенеза (302°–353°C) Филизчайского колчеданно-полиметаллического месторождения очень близки к результатам других исследователей, изучавших эти руды различными физико-химическими методами.

Основными промышленно-ценными компонентами руд месторождения являются цинк, свинец, медь и серебро. Из примесных компонентов золото, висмут, кадмий, индий, кобальт, селен и теллур заслуживают попутного извлечения.

Концентрации промышленно-ценных компонентов в рудах варьируют в широких пределах. По сравнению со слоисто-полосчатыми и массивными колчеданно-полиметаллическими рудами пятнисто-брекчиевидные и прожилково-вкрапленные руды характеризуются значительно низкими средними содержаниями цинка, свинца и серебра, хотя в единичных пробах этих руд они были обнаружены в довольно высоких показателях. Среди цветных металлов количественно преобладает цинк, для которого установлен следующий возрастающий ряд (в %): окисленные (0,19)–первичные (3,66)–смешанные (4,26) руды. Средневзвешенное содержание цинка в колчеданно-полиметаллических рудах слоисто-полосчатой и массивной текстуры более чем в три раза превосходит концентрацию элемента в пятнисто-брекчиевидных и прожилково-вкрапленных рудах.

В промышленно-технологических типах и сортах руд Филизчайского месторождения в распределении свинца выявляется такой возрастающий ряд (в %): первичные (1,41)–смешанные (2,32)–окисленные (3,45) руды. Аналогичный ряд установлен также для серебра с показателями (в г/т): 52, 97,5 и 280. В

окисленных рудах для обоих элементов отмечаются широкие пределы вариаций концентраций. Среди природных типов руд наибольшие содержания свинца и серебра присутствуют в слоисто-полосчатых колчеданно-полиметаллических рудах.

В балансовых рудах месторождения средневзвешенное содержание меди составляет (в %): первичные руды – 0,58, смешанные – 1,56, окисленные – 0,12. В массивных медно-пирротиновых рудах и некоторых текстурных разновидностях колчеданно-полиметаллических руд концентрация элемента колеблется от сотых долей процентов до нескольких процентов.

Основная масса сопутствующих компонентов сконцентрирована в виде изоморфной примеси в главных сульфидах, хотя золото, висмут, теллур, кобальт, мышьяк и сурьма представлены также в собственных соединениях. Многокомпонентные руды месторождения характеризуются некоторыми геохимическими особенностями распределения в них халькофильных редких элементов (Cd, In, Tl, Ga, Ge, Bi, Se, Te), благородных металлов (Au, Ag), других примесных компонентов.

Как известно, с кристаллохимических позиций наиболее благоприятны для изоморфного улавливания кадмия, индия, германия и отчасти галлия тетраэдрические сульфиды (сфалерит, халькопирит), а для таллия – октаэдрические (пирит, галенит). Кадмий относится к наиболее важным примесям месторождения Филизчай (см. таблицу). Наиболее высокие содержания элемента устанавливаются в поздних маложелезистых сфалеритах. Содержание индия в рудах почти на два порядка меньше содержания кадмия, и индием обогащены ранние железистые сфалериты. Сульфид цинка является концентратором и носителем кадмия и индия в исследуемых рудах.

В распределении таллия в колчеданно-полиметаллических месторождениях Южного склона Большого Кавказа установлена чёткая геохимическая закономерность: в месторождениях, где концентрация таллия в пиритах повышенная, в галенитах его мало, а где содержание элемента в галенитах высокое, дисульфиды железа бедны таллием. Галенит из Филизчая и пирит из Катеха наиболее обогащены таллием. Выявлено небольшое содержание таллия в пирите из Филизчайского и галените из Катехского месторождений [8].

Галлий и германий – нехарактерные примеси изученных руд. В рудовмещающих песчано-глинистых отложениях галлия больше, чем в сфалеритах. Пониженный фон германиеносности руд, по-видимому, связан с первичной обеднённостью рудообразующих растворов этим элементом.

Висмут широко распространён в рудах месторождения. Среди сульфидных минералов наибольшее содержание элемента установлено в галените (максимально до 0,3%). Повышенная висмутоносность руд, выраженная в широком развитии индивидуальных минералов

висмута (висмутин, теллуrowисмутит, тетрадимит, козалит и др.), является одной из минералого-геохимических особенностей колчеданно-полиметаллического оруденения на Филизчайском месторождении.

Селен и теллур относятся к характерным примесным компонентам исследуемых руд. Повышенные содержания селена приурочены к пиритам из массивных медно-пирротиновых и прожилковых пиритовых руд. Устанавливается приуроченность высоких концентраций элемента к кристаллической разности пирита, то есть существует зависимость между содержанием селена и кристаллической зрелостью минерала. Среди сульфидных минералов наибольшее содержание теллура отмечено в халькопирите. Этот минерал из медно-пирротиновой минеральной ассоциации является единственным ведущим сульфидом, в котором содержание теллура превалирует над селеном. В колчеданно-полиметаллических и серно-колчеданных рудах устанавливается значимая корреляционная связь селена с медью и кобальтом. Такая же связь между селеном и теллуrom наблюдается в медно-пирротиновых и прожилково-вкрапленных рудах.

Следует отметить, что с целью выяснения степени обогащённости редкими элементами рудосоставляющих минералов при оценке их средних содержаний в сульфидах целесообразно сравнивать эти показатели с минеральными кларками В.В.Иванова [3, 13]. Автор ввёл понятие коэффициент геохимической обогащённости (K), представляющий собой отношение среднего содержания элемента в сульфидном минерале из конкретного месторождения к его минеральному кларку. Следовательно, несмотря на довольно высокие концентрации кадмия в сфалерите из Филизчайского месторождения, достигающие в единичных пробах до 5000 г/т, среднее содержание элемента значительно уступает минеральному кларку. В этом смысле сфалерит и галенит обогащены индием ($K_{in}=1,5$ и $K_{in}=1,9$, соответственно). Таллием наиболее обогащён галенит из исследуемого месторождения ($K_{tl}=12,9$). Пирротин обогащён селеном ($K_{se}=1,2$). Также необходимо отметить, что среднее содержание висмута в галените из колчеданно-полиметаллического месторождения Филизчай составляет 675 г/т (см. таблицу), что больше его рудноминерального кларка в этом минерале (384 г/т) из среднетемпературных колчеданно-полиметаллических месторождений в силикатных породах [13].

В исследуемых рудах золото и серебро присутствуют в количествах, представляющих практический интерес. Как уже было отмечено, в рудах Филизчая серебро совместно с цинком, свинцом и медью относится к основным компонентам руд, а золото – к попутным. Сравнительно повышенные содержания золота и серебра устанавливаются в слоисто-полосчатых и массивных колчеданно-полиметаллических рудах. По ряду первичные–смешанные–окисленные руды концентрации обоих элементов и их относительные содержания

Средние содержания редких и благородных металлов в главных сульфидных минералах месторождения Филизчай (в г/т)

Элементы	Пирит	Сфалерит	Галенит	Халькопирит	Пирротин
Cd	38,8	1610	20	14,7	15
In	2,3	72,2	7,5	19,8	2,5
Tl	4,5	9,8	59,5	2,3	1,3
Ga	6,2	23,3	4,5	4	3,5
Ge	1,7	3,5	1,5	1,1	1,5
Se	32	7,2	50	8,5	55
Te	3,2	2,8	4	12,7	6
Bi	59,7	36,9	675	95,4	40
Au	0,78	0,40	0,02	0,82	0,15
Ag	38,4	49,7	1030	69,3	21

(Au/ Σ Cu, Zn, Pb и Ag/ Σ Cu, Zn, Pb) увеличиваются, а величины серебро-золотого отношения падают. Установлено, что в изученных рудах минералами-концентраторами золота являются халькопирит и пирит, серебра – галенит; минералы-носители: для золота – пирит, серебра – галенит и пирит. В главных сульфидных минералах сосредоточено около 85% общей массы золота и несколько больше – серебра. Остальное количество благородных металлов связано с их собственными минералами.

Высокие содержания кобальта отмечаются в серно-колчеданных и медно-пирротиновых рудах. В рассматриваемом месторождении кобальтоносность относится к важным минералогическим особенностям руд. Устанавливается зависимость содержаний кобальта и никеля от разновидностей рудосоставляющих сульфидных минералов. В прожилково-вкрапленных рудах содержания обоих элементов почти равны, либо никеля несколько больше, что связано с его геохимическим поведением. Концентрация никеля в пиритах и главным образом величина Co/Ni – геохимический критерий особенностей их образования.

Типичный халькофильный элемент – ртуть. Являясь характерной примесью в рудах Филизчая, она распределена крайне неравномерно. Сравнительно повышенные содержания ртути (Hg 12–20 г/т) в слоисто-полосчатых и массивных колчеданно-полиметаллических рудах связаны с присутствием в них блёклых руд и широким развитием сфалерита. Установлено, что в рудах месторождения количество элемента увеличивается по ряду первичные–смешанные–окисленные руды [9]. Сурьма и мышьяк – характерные элементы природных типов руд месторождения. Мышьяка содержится почти на порядок больше. Оба элемента образуют самостоятельные минералы. В рудосоставляющих сульфидных минералах сурьма накапливается в основном в галените, а мышьяк – в пирите. Значимая корреляционная связь чаще всего отмечается в парах элементов: Sb-Pb, Sb-As, Sb-Bi, Sb-Ag, As-Bi и As-Cu.

Марганец и олово относятся к характерным примесным компонентам руд. В единичных пробах колчеданно-полиметаллических руд содержание марганца доходит до одного процента. В изученных рудах концентрация обоих элементов связывается с колчеданно-полиметаллическим оруденением.

Исследованием пространственного распределения компонентов в рудной залежи Филизчайского месторождения выявлена минералогическая зональность по простиранию, падению и мощности [8]. Вертикальная зональность выражается в закономерном пространственном размещении отдельных типов руд (висячем боку залежи – колчеданно-полиметаллические, в лежачем – серноколчеданные и медно-пирротиновые руды). В целом от лежачего к висячему боку залежи наблюдается постепенное увеличение содержаний Zn, Pb, Cd, Ag, Tl, Sb, Hg и понижение Cu, Co, Mn, Se. Для количественного выражения зональности вычислен показатель геохимической зональности на основе отношений концентрации элементов фронтальных (Zn, Pb, Ag) и тыловых (Cu, Co, Mn) частей рудной залежи.

Установленные параметры распределения химических элементов, особенно редких и благородных, в текстурно-минералогических типах руд и главных сульфидных минералах, являясь дополнительными показателями для выяснения физико-химических условий минералообразования, относятся к типоморфным признакам исследуемого стратиформного месторождения гидротермально-метасоматического типа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Безмен Н.И., Тихомирова В.И., Косогова В.П. Пирит-пирротинный геотермометр: распределение никеля и кобальта // Геохимия. 1975. № 5. С. 700–712.
2. Гететий В.Ф., Чернышев Л.В., Пастушкова Т.М. Распределение кадмия и марганца между галенитом и сфалеритом // Геология рудных месторождений. 1979. № 6. С. 66–75.

3. *Иванов В.В., Юшко-Захарова О.Е.* Селен и теллур в месторождениях цветных металлов и золота / Комплексные месторождения халькофильных редких элементов. – М.: Недра, 1982. С. 144–212.
4. *Колчеданное* месторождение Кизил-Дере (Дагестанская АССР) и некоторые вопросы его генезиса / В.И.Буадзе, Т.В.Иваницкий, М.И.Джанджгава, Ж.Н.Абашидзе // Известия АН СССР. Серия геол. 1972. № 9. С. 80–96.
5. *Курбанов Н.К.* Основные этапы формирования комбинированных медно-полиметаллических месторождений и их соотношение со стадиями эволюции альпийской терригенной геосинклинали Большого Кавказа // Тр. ЦНИГРИ. 1982. Вып. 168. С. 3–18.
6. *Курбанов Н.К., Алиев Г.И., Велиев Г.А.* Закономерности размещения и структурные условия локализации колчеданно-медно-пирротиновых месторождений Балакен-Загатальского рудного района // Тр. ЦНИГРИ. 1971. Вып. 99. С. 170–179.
7. *Металлогеническая* провинция Большого Кавказа. Зона юрских сланцев Большого Кавказа / Н.К.Курбанов, В.И.Буадзе, А.Г.Твалчрелидзе и др. // Колчеданные месторождения СССР. – М.: Наука, 1983. С. 38–58.
8. *Новрузов Н.А.* Геохимия стратиформных колчеданных месторождений Восточного сегмента Большого Кавказа. – Баку: Nafta-Press, 2016.
9. *Новрузов Н.А.* Особенности распределения ртути в месторождениях колчеданной формации Южного склона Большого Кавказа // Отечественная геология. 2014. № 3. С. 52–58.
10. *Новрузов Н.А.* Редкие элементы как геохимический критерий физико-химических условий формирования руд колчеданных месторождений Восточного Кавказа // Тр. Института геологии. 2007. № 35. С. 141–149.
11. *Пирит-халькопиритовый* термометр: распределение кобальта / Н.И.Безмен, Н.И.Еремин, И.Г.Наразаули и др. // Геохимия. 1978. № 3. С. 384–389.
12. *Смирнов В.И.* Соотношения осадочного и гидротермального процессов при формировании колчеданных руд в юрских флишоидах Большого Кавказа // Доклады АН СССР. 1967. Т. 177. № 1. С. 179–181.
13. *Средние* содержания элементов-примесей в минералах / В.В.Иванов, В.В.Белевитин, Л.Ф.Борисенко и др. – М.: Недра, 1973.

К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ

Плата с авторов за публикацию (в том числе с аспирантов) не взимается. Гонорар не выплачивается. Автор, подписывая статью и направляя её в редакцию, тем самым предоставляет редакции право на её опубликование в журнале и размещение в сети «Интернет».

Направление в редакцию работ, опубликованных ранее или намеченных к публикациям в других изданиях, не допускается.

По всем вопросам, связанными со статьями, следует обращаться в редакцию по тел. +7 (495)315-28-47, E-mail: ogeo@tsnigri.ru

Адрес редакции: 117545, г. Москва, Варшавское шоссе, д. 129, корп. 1

Золотоносные вихревые структуры в сдвиговых дуплексах Дальнего Востока: Центральная Колыма, Нижнее Приамурье

Ю.П.ЮШМАНОВ (Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт комплексного анализа региональных проблем» Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИКАРП ДВО РАН); 679016, ЕАО, г. Биробиджан, ул. Шолом-Алейхема, 4)

В старинных рудно-россыпных районах Дальнего Востока (Центральная Колыма и Нижнее Приамурье) впервые выделены золотоносные вихревые (ротационные) структуры, парагенетически связанные со сдвиговыми дуплексами, контролирующими богатейшие золоторудные площади в мезозойских терригенных черносланцевых толщах. Формирование вихревых структур совершалось в обстановке регионального латерального сжатия (режим транспрессии), при котором внедрение магм разного состава и рудных флюидов происходило в обстановке локального растяжения (режим транстенсии). Актуальность исследований отвечает задачам нелинейной металлогении по изучению особенностей локализации рудных месторождений и их прогнозу.

Ключевые слова: сдвиговый дуплекс, вихревая структура, ротация, структурные парагенезы, транстенсия, транспрессия, золото, Дальний Восток.

Юшманов Юрий Петрович
кандидат геолого-минералогических наук



yushman@mail.ru

Gold vortex structures in shear duplexes of the far east: The Central Kolyma, Lower Priamurye

Yu.P.YUSHMANOV (Institute of Complex Analysis of Regional problems)

For the first time in the ancient ore-placer regions of the Far East (Central Kolyma and the Lower Amur region), specific gold-bearing vortex (rotational) structures are paragenetically associated with shear duplexes that control the richest gold ore areas in the Mesozoic terrigenous black shale strata. The formation of vortex structures occurred in the setting of regional lateral compression (transpression mode), in which the introduction of magmas of different composition and mineralization corresponded to the conditions of local stretching (transension mode). The relevance of the research corresponds to the problems of nonlinear metallogeny in studying the localization features of ore deposits and their prediction.

Key words: extensional strike-slip duplex, vortex structure, rotation, structural parageneses, transience, transpression, gold, the Far East.

Первые исследования вихревых (ротационных, вращательных) геологических структур были проведены в Северо-Западном Китае в 20-х годах прошлого века. Китайский геолог Ли-Сы-Гуан на большом фактическом материале обосновал их образование в результате сдвигов, возникших при вращении отдельных блоков земной коры, и дал монографическое описание [8]. Ретроспективное развитие взглядов и современное состояние проблемы происхождения вихревых структур приводится в работах [2, 6, 22]. Их роль в локализации рудных месторождений ещё слабо изучена и не привлекла внимание большинства геологов, занимающихся металлогенией золота, несмотря на отдельные публикации [14]. Дальний Восток – один из главных золотодобывающих регионов России и полигон геоло-

гических исследований. Проведённая во второй половине прошлого века и в последние годы геологическая съёмка и специализированные геолого-структурные исследования месторождений установили важную роль сдвиговых дислокаций в контроле магматизма, рудообразования и осадконакопления [5, 17, 21, 24, 26, 27]. На геологических картах разного масштаба структуры вращения проявлены в виде сдвиговых дислокаций, имеющих форму флексур, спиралей, колец, дуг и вихрей в дуплексных зонах скалывания [10, 13, 25].

В качестве основного фактического материала были использованы изданные разномасштабные геологические карты [30] и планы горных выработок давно известного Агние-Афанасьевского месторождения и одноимённого рудного узла в «Территориальных фондах

геологической информации по Дальневосточному федеральному округу» в г. Хабаровск. Проведён анализ научных статей и монографий, посвящённых геологии, тектонике, глубинному строению и металлогении Центральной Колымы и Нижнего Приамурья. В ходе работ применялись инновационные технологии структурно-парагенетического анализа [15, 16, 18, 21, 25], что позволило на геологических картах и планах выделить ротационные (вихревые) структуры в сдвиговых дуплексах, контролирующих богатейшие золото-россыпные площади Дальнего Востока и месторождения. Актуальность исследований отвечает задачам нелинейной металлогении по изучению особенностей локализации рудных месторождений и их прогнозу.

Объекты исследований расположены в двух старейших Дальневосточных регионах золотодобычи: Центральной Колыме и Нижнем Приамурье. Рассмотрим геолого-структурную обстановку локализации месторождений золоторудной кварцевой формации в мезозойских терригенных черносланцевых толщах, контролируемых северо-западными правыми сдвигами Яно-Колымской и северо-восточными левыми сдвигами Сихотэ-Алиньской системы [17, 21, 24, 26, 27]. Образование вихревых тектонических структур возникает при горизонтальных перемещениях горных масс в зонах скалывания и частичной ротации блоков земной коры в сдвиговых дуплексах. Сдвиговым дуплексом называют тектонические структуры, ограниченные двумя главными, круто ориентированными сдвиговыми зонами или двумя зонами повышенной трещиноватости пород [15].

Ярким свидетельством проявления ротационных процессов в размещении золотой минерализации является Берелёхская «правозакрученная» вихревая структура, закартированная на четырёх листах: Р-55-Х, XI, XVI, XVII в междуречье Аян-Юрях и Матылага, в верховьях Колымы [30]. Она расположена в тектоническом блоке шириной 130 км и протяжённостью более 200 км, ограниченном с флангов Чай-Юринским и Буркандинским глубинными разломами (рис. 1). В геологическом строении территории принимают участие терригенные породы юры, триаса и верхней перми (верхоянский комплекс), смятые в складки северо-западного простирания и прорванные интрузиями гранитоидов колымского интрузивного комплекса (Оханджа и Чьорго), небольшими штоками и многочисленными роями даек преимущественно кислого и среднего состава [4, 9]. Возраст гранитоидных тел и даек от поздней юры до позднего мела включительно. Золотое оруденение локализовано в виде золото-кварцевых жил, прожилково-вкрапленных зон в терригенных толщах, а также минерализованных даек. На геологических картах ареал распространения поясов даек и мелких интрузивных тел в плане имеет вихревую линейно-подковообразную форму, блокируемую с флангов Чай-Юринско-Буркандинским сдвиговым дуплексом. По геофизическим

данным [23] глубина заложения разломов 28–37 км. Дизъюнктивные зоны 2-го порядка (зоны внедрения магматических образований) уходят корнями на глубину 10–17 км, иногда до 20 км. Сдвиги на глубине ограничены пологими субгоризонтальными срыва́ми пониженной вязкости и разуплотнения материала, приводящими к разделению литосферы на отдельные относительно жёсткие литопластины [19]. При горизонтальных перемещениях литопластин в результате трения, вероятно, происходило выплавление гранитной магмы из кристаллических пород, которая была «смазочным» слоем при скольжении [29]. Сдвиговые смещения по северо-западным глубинным разломам Яно-Колымской системы происходили в интервале от верхней юры до середины конца палеогена [17]. В этот период, по данным [24, 26, 27], региональное поле напряжений меняло свою ориентировку от пяти до семи раз. Вероятно, это было связано с ротацией Земли.

Берелёхский правозакрученный вихрь, по-видимому, сформировался в конце мезозоя при знакопеременном региональном горизонтальном сжатии. В поздней юре–раннем мелу стресс был субмеридиональным, ориентированным в направлении СЗ 340° субпараллельно длинным осям батолитов, внедрившихся в соседние раздвиги. Амплитуда правого сдвига дуплексной зоны около 50 км определяется по суммарной мощности раздвигов, выполненных дайками и гранитоидами колымского интрузивного комплекса. В расположенной южнее Элэгынья-Бохапчинской металлогенической зоне амплитуда правого сдвига составляет 200–250 км. Амплитуда правосторонних смещений рассеяна в многочисленных послойных срывах, образующих широкую зону вязкого сдвига. В режиме транспрессии дуплексный блок вращался по часовой стрелке в условиях правого сдвига (см. рис. 1). На южной границе вихревой структуры осадочные породы развёрнуты на 45°–50° к широтному направлению от генерального простирания СЗ 320° складчатых структур, что подтверждает её ротационную природу.

В раннем мелу произошла реверсия знака ротационно-сдвиговых тектонических движений (северо-западное сжатие) – против часовой стрелки (левый сдвиг) [24, 27]. Один из примеров формирования золото-кварцевых жил при северо-западном сжатии – месторождение Светлое (рис. 2). В середине мела (апт–сеноман?) установлена ещё одна смена направления сдвиговых деформаций (кинематически правосторонняя), которая совпадает с формированием Охотско-Чукотского вулканогенного пояса [26]. В результате знакопеременного кручения дуплексного блока образовались сдвиговые аксоноклинальные складки с вертикальными шарнирами и вихревая линейно-подковообразная система роев даек. Полностью замкнутые вихревые структуры образуются в редких случаях при длительном периоде формирования вихрей [10].

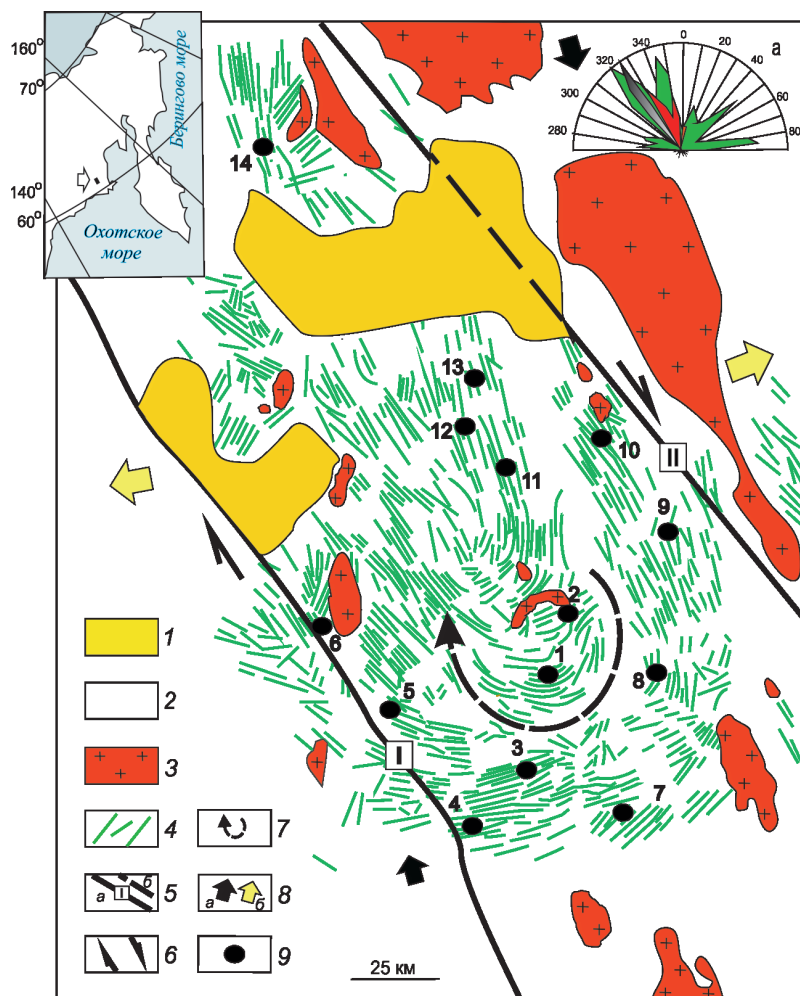


Рис. 1. Правозакрученная вихревая структура в северо-западном сдвиговом дуплексе, контролирующая богатейшую золотоносную площадь Колымы в Берелёхском рудно-россыпном районе. По [4, 9, 30], с дополнениями:

1 – контуры третично-четвертичных впадин (pull-apart); 2 – верхоянский комплекс, представленный терригенными отложениями юры–триаса и верхней перми; 3 – гранитоидные интрузивы (колымский комплекс); 4 – дайки; 5 – глубинные разломы – сдвиги (а) и их номера: I – Чай-Юринский, II – Буркандинский, скрытые разломы (б); 6–7 – направление перемещений: 6 – сдвиговые, 7 – ротационные; 8 – направление латерального сжатия (а), растяжения (б); 9 – месторождения золота и их номера: 1 – Светлое, 2 – Дорожное, 3 – Холодное, 4 – Уюнку, 5 – Чай-Юринское, 6 – Чебанья, 7 – Жданное, 8 – Новое, 9 – Мальдяк, 10 – Богатырь, 11 – Корота, 12 – Евгар, 13 – Стахановское, 14 – Контраньдинское; розы-диаграммы простираний (а): даек (зелёное), длинных осей интрузий гранитоидов колымского комплекса (красное) и разрывов скалывания (серое)

По данным [9], дайки, как правило, небольшой протяжённости, но большой мощности до 50 м (3–4 дайки разного состава в одной трещине). Это связано с неоднократным приоткрыванием разрывов. Контакты даек неровные и непараллельные с раздувами и в форме комковидных и линзовидных разобщённых тел неправильной формы. Подобной морфологией обладают и отдельные золото-кварцевые жилы на Холодном, Челбаньинском и других месторождениях. Магмo-вмещающие разрывы неоднократно приоткрывались в режиме трансенсии, образуя дренажную систему раздвигов в радиусе более 100 км, благоприят-

ную для внедрения жидкой магмы и рудных флюидов. Источники гранитной магмы, а также зоны контакта различных по плотности пород расположены на глубине 10 км [23]. Общеизвестно, что магмы основного состава формируются в самом верхнем слое мантии толщиной несколько десятков километров. Андезитовые магмы, по-видимому, образуются на таком же уровне.

Берелёхский рудно-россыпной район – богатейшая золотоносная площадь Колымы, где сосредоточены многие месторождения россыпного и рудного золота. Из россыпей добыто 941 т золота [4]. Большая часть

коренных месторождений (проявлений) золота относится к золотоносной кварцевой формации к жильному и дайковому структурно-морфологическим типам. По запасам месторождения мелкие. По данным А.В.Волкова с соавторами [9], оруденение ранее относимое к золото-кварцевому типу, наложенному на дайки, по изотопным и термобарохимическим данным указывает на его близость к месторождениям золота, приуроченным к интрузивам – «золото-редкометалльному» типу. Глубинный магматический очаг мог служить источником серы сульфидов в березитах и кварцевых жилах в колымских дайках.

Пространственное размещение золоторудной минерализации в контурах Берелёхской правозакрученной вихревой структуры типично для структур центрального типа. Месторождения и рудопроявления золота расположены дискретно на периферии (Холодное, Уюнку, Чай-Юринское, Чебанья, Жданное, Новое, Мальдак, Богатырь, Корота, Стахановское, Евгар) и в центре вихря (Светлое, Дорожное). Между ними – безрудная зона. Вертикальный размах золото-кварцевого оруденения составляет 600 м. Рудно-магматическая зональность установлена в пределах эндо- и экзоконтакта небольшого Моджорского массива, где проявлено золото-редкометалльное оруденение, а на удалении от интрузива золото-кварцевое, что является обычным закономерным явлением в различных регионах России (в том числе в Приамурье, Приморье и на Колыме) [1, 9].

Проведённый анализ разрывных структур показал, что большинство разрывов и трещин являются сколами. Наиболее протяжённые глубинные разломы-сдвиги скалывания простираются в северо-западном направлении по азимуту 30°, срезая под острым углом 15° складчатые структуры (см. рис. 1, а-диаграммы). Они прямолинейные и формировались в режиме транспрессии. Широко распространённые магмовмещающие разломы простираются преимущественно в северо-западном направлении, образуя два максимума – 325° и 345°. Первый максимум образуют соскладчатые сколы, второй – разрывы растяжения (раздвиги), параллельные наибольшему главному напряжению и перпендикулярные наименьшему напряжению. Раздвиги в режиме транстенсии глубоко проникали в земную кору и мантию, являясь каналами для магмы. Разломы северо-восточного и близширотного направления формировались как сколы поперёк складчатых структур, по которым происходили левые и правые сдвиги, соответственно. При смене полей напряжений и вращении дуплексного блока они многократно приоткрывались в режиме транстенсии и служили каналами для магмы и рудных растворов.

Месторождение Светлое расположено в центральной части Берелёхского «вихря» в хорошо выраженной левозакрученной ротационной флекуре (см. рис. 2). Геологическая позиция месторождения определяется приуроченностью к юго-западному крылу одноимённой антиклинали вблизи её периклинального замыкания

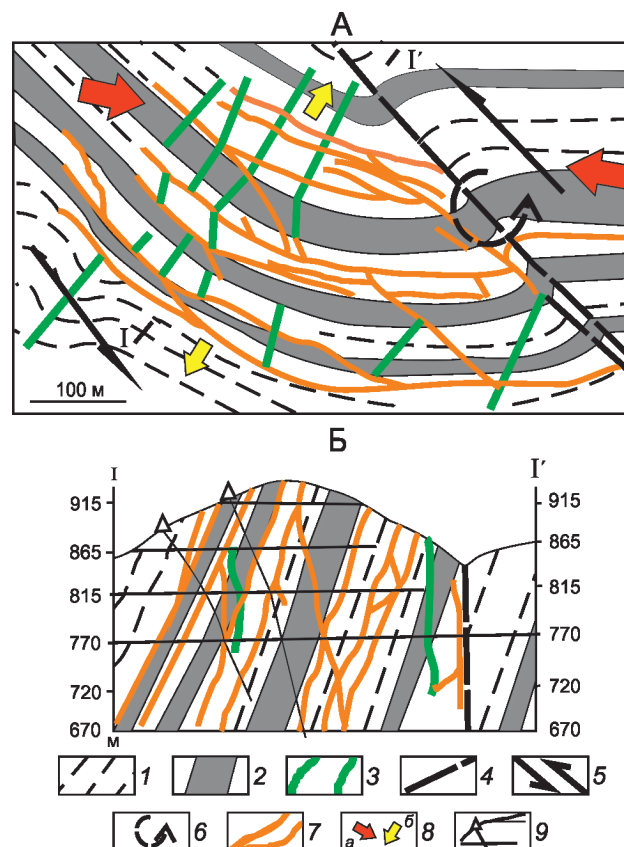


Рис. 2. Левозакрученная рудовмещающая флексура в зоне скалывания на месторождении Светлое: геологический план горизонта 815 м (А) и разрез (Б). По А.И.Калинину, Б.Н.Шавкунову, 1992 [11, 12], с дополнениями:

1 – алевролиты и глинистые сланцы среднеюрской толщи; 2 – песчаники; 3 – дайки диоритовых порфиров; 4 – разломы; 5–6 – направление перемещений: 5 – сдвиговые, 6 – ротационные; 7 – рудные жилы; 8 – направление сжатия (а) и растяжения (б); 9 – буровые скважины и разведочные горизонты; I–I' – линия геологического разреза

[11, 12]. Рудовмещающими являются пласты песчаников сланцево-алевролитовой жуковской свиты (900 м) и лещевской толщи (около 1100 м) средней юры. Осадочные породы интрузируют дайки, внедрявшиеся в гомодромной последовательности от средних к кислым [20]. Золото-кварцевые жилы секут все магматические тела на площади 1 км². Флексура с вертикальной осью вращения против часовой стрелки образовалась в результате левого сдвига амплитудой 50 м по сколу северо-западного простирания. Вероятно, эти смещения происходили при боковом сжатии, ориентированном в направлении СЗ 290°–300°. Золото добывалось из восьми кварцевых жил, моноклинально погружающихся на юг, юго-запад под крутыми углами (60°–80°). Жилы прослежены на глубину 150–300 м. По простиранию

протяженность жил до 1 км. Как правило, рудные тела развиты на границе пород разной компетентности. Установлены также секущие короткие жилы. Система жил наложена на серию северо-восточных дорудных даек. Месторождение Светлое принадлежит к типу структур блокирования. В них поперечные к жилам дайки и сколы являлись экранами при рудоотложении, что обусловило столбообразный и бананцевый характер рудных тел. Преобладают крутопадающие рудные столбы шириной 2,5–3,0 м, длиной 20–200 м. В них добыто 60% запасов золота. Месторождение по запасам мелкое, но с богатыми рудами.

Агние-Афанасьевская левозакрученная вихревая структура расположена на левобережье нижнего течения р. Амур в бассейнах его притоков Пильда, Джатка, Битки в Хабаровском крае. Согласно [3], золото-кварцевая минерализация приурочена к нижнемеловым турбидитам Журавлевско-Амурского террейна, слагающего восточное крыло Лимурчанского сдвига. Это территория Пильдо-Лимурийского золоторудного района, включающего Агние-Афанасьевский рудно-россыпной узел.

Золотоносная площадь сложена нижнемеловыми терригенными породами (алевролиты, песчаники, аргиллиты и гравелиты), смятыми в линейные складки северо-восточного простирания, и интродуцированными магмой разнообразного состава. Интрузивные образования отнесены к двум возрастным комплексам – поздне-меловому и раннепалеогеновому. К поздне-меловому относятся интрузии гранодиоритов, кварцевых диоритов, диоритов, гранитов и дайки соответствующего состава нижеамурской серии. В состав раннепалеогенового входят дайки, штоки базальтов, андезитов, долеритов, дацитов, риолитов. С поздне-меловыми натровыми гранитоидами нижеамурской серии предполагается связь вольфрамового, молибденового, золотого, мышьякового и сурьмяного оруденения [7].

Главным структурным элементом является транс-тенсивный сдвиговый дуплекс, ограничивающий с флангов интрузивно-купольную структуру в надинтрузивной зоне скрытого рудогенерирующего плутона (рис. 3). На аэрофотоснимках и топографических картах в радиусе 12 км она дешифрируется как морфоструктура центрального типа, проявленная радиально-концентрической системой мелких водотоков, расходящихся от центра и дугообразными изгибами долин рек. Спиралевидный вихревой рисунок образуют ареалы развития многочисленных мелких интрузивных тел и даек, поля роговиков, дуговые, радиальные и линейные разломы. Крупные разломы прослежены геофизическими методами. Анализ разрывных структур (см. рис. 3, а-диаграммы) показал, что протяжённые разрывы скалывания субвертикальны и ориентированы преимущественно в северо-восточном направлении по азимуту СВ 30°–35°, образуя широкую зону вязкого послынного сдвига, ограничивающую с флангов интрузивно-купольную структуру. Подавляющее большинство тре-

щинных интрузий, даек основного и среднего состава контролируют разрывы северо-восточного и близмеридионального направления, реже северо-западного и очень редко широтного, образуя в плане спиральную и радиальную сеть мелких интрузий. Магмовмещающие разрывы хорошо выделяются в геофизических полях по резкому изменению параметров магнитного и радиохимических полей, по цепочкам геофизических аномалий [28]. Дайки кислого состава и крупная Балахойская гранитная интрузия залегают преимущественно в северо-западных разрывах растяжения, дугообразно огибая центр вихревой структуры с северо-востока. Большинство дуговых разломов, вскрытых горными выработками, имеет крутое (60°) падение к центру вихря.

Установлена латеральная концентрическая рудно-магматическая зональность. Магматические породы образуют два пояса. Внутренний (рудноносный) пояс, насыщенный разновозрастными магматическими породами основного, среднего, редко кислого состава, окаймляет центральную (ядерную) часть ротационной структуры. Внешний (периферический) пояс представлен крупной Балахойской интрузией гранитов и её сателлитами. Ядро вихря (диаметром 5 км) безрудно. В обрамляющем рудоносном поясе шириной 3–4 км совмещены месторождение и рудопоявления Au, Mo, W, Pb, Ag, As, Sb. Различные *PT*-условия осаждения минералов, по-видимому, обусловили концентрическую металлогеническую зональность рудно-магматической системы. Чёткой постоянно наблюдающейся пространственной приуроченности оруденения к определённым магматическим породам не устанавливается. Высокотемпературные проявления Mo, W, Pb, Ag, Au расположены ближе к центру, как и в других рудно-магматических структурах центрального типа в Верхнем и Среднем Приамурье. Основные рудопоявления и Агние-Афанасьевское месторождение Au расположены на удалении от интрузивных тел. На флангах рудоносной зоны развиты низкотемпературные проявления Sb, редко As с Au. Во внешней периферической части концентрической рудно-магматической системы оруденение отсутствует, несмотря на широкое развитие пояса гранитных интрузий.

Анализ структурных парагенезов (трещин скалывания, отрыва, тектонической штриховки на зеркалах скольжения, складчатых структур, эшелонированных разрывных нарушений и др.) на геологических картах, планах и полевой документации горных выработок свидетельствует об образовании Агние-Афанасьевской левозакрученной вихревой концентрической структуры в условиях локального растяжения (режим трансенсии) при региональном сжатии СЗ 330°–340° (режим транспрессии). Поворот дуплексного блока (вокруг вертикальной оси) против часовой стрелки на 60°–70° происходил при левом сдвиге амплитудой около 6 км по северо-восточным сколовым разломам. Амплитуда сдвига с трансенсивной составляющей определяется

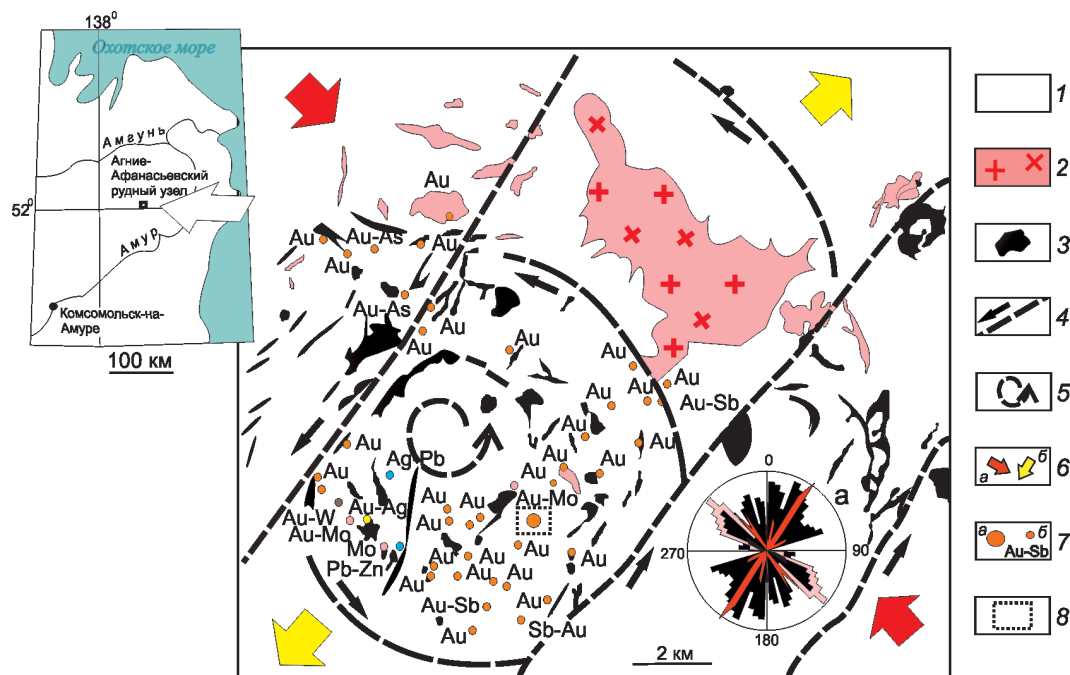


Рис. 3. Левозакрученная вихревая структура в северо-восточном сдвиговом дуплексе с элементами рудно-магматической зональности, Агние-Афанасьевский рудно-россыпной узел. По А.Н.Минаевой, 1987, М.К.Дьячкову, 1989, А.М.Перфильеву, 2013, с дополнениями:

1 – нижнемеловые флишвидные отложения (алевролиты, песчаники, гравелиты, линзы конгломераты); 2 – поздне меловые интрузии и дайки кислого состава (кварцевые диориты, гранодиориты, граниты, гранит-порфиры); 3 – поздне меловые интрузии, штоки и дайки основного и среднего состава (габбро, диабазы, диориты); 4 – сдвиги; 5 – направление вращения дуплексного блока; 6 – вектор латерального сжатия (а) и растяжения (б); 7 – месторождения (а) и рудопроявления (б) с преимущественной металлогенической специализацией; 8 – местоположение Агние-Афанасьевского месторождения; розы-диаграммы простирания (а): разрывов растяжения, выполненных магмой среднего и основного (чёрное), кислого (розовое) состава, и разломов скалывания (красное)

по суммарной мощности внедрившихся магматических тел, без учёта образования складчатых структур. При этом по сопряжённым дуговым северо-западным и широтным сколовым разломам происходили вращательные правые сдвиги-сбросовые смещения.

Свидетельством ротационных сдвиговых процессов на геологической карте являются спиралевидные ареалы распространения мелких интрузий и даек, флексурные изгибы слоёв вблизи дуговых и линейных разломов, горизонтальная и вертикальная тектонические штриховки на зеркалах скольжения, приразломные складки с вертикальными шарнирами и структурами закручивания. В режиме трансенсии в широкой зоне вязкого сдвига приоткрывались многочисленные присдвиговые раздвиги (pull apart) северо-западного, близмеридионального, северо-восточного, редко широтного простирания (см. рис. 3, а-диаграммы). Раздвиги различных форм и размеров служили каналами для магмы и рудного вещества. Глубина проникновения раздвигов определяется химическим составом внедрившейся магмы и руд.

В Агние-Афанасьевском рудном узле давно известно одноимённое золото-кварцевое жильное месторождение, отработанное в середине XX в. (1936–1956 гг.). Было выявлено 50 кварцево-прожилковых зон, из них промышленная золотоносность установлена в 15, а основная масса золота добыта из 6 зон. Распределение золота в рудных телах крайне неравномерное – от первых граммов до 5 кг/т [12, 28]. Кварцевые жилы расположены кулисно как по простиранию, так и падению слоёв осадочных пород в левозакрученной роллинг флекуре, развитой в северо-западном крыле Пильденской антиклинали (рис. 4). Ядро складки сложено нижнемеловыми флишвидными отложениями преимущественно песчаников горинской свиты, крылья – алевролитами пионерской свиты. Осадочные породы прорывают дайки и штоки кварцевых диоритов, спессартитов и одонитов, распространены в центральной части рудного поля. Они относятся к поздне меловой золотоносной нижнеамурской умеренно натровой интрузивной серии [7]. Дайки простираются в северо-западном, реже северо-восточном направлении. Преобладают дайки с

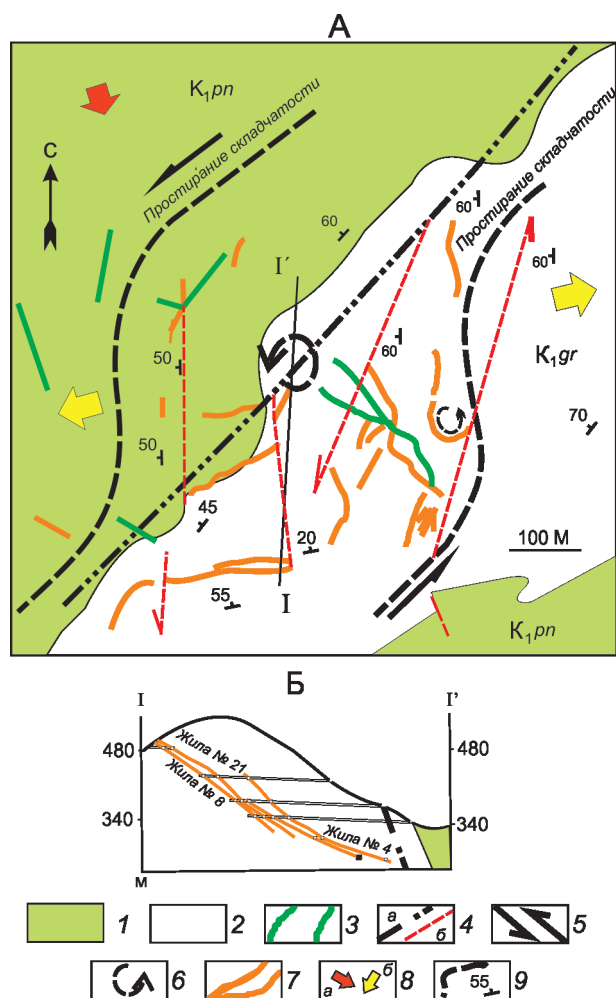


Рис. 4. Схема размещения золото-кварцевых жил в роллинг флексуре, контролируемой северо-восточным взбросо-сдвигом Агние-Афанасьевского месторождения (А), и геологический разрез (Б). По А.М.Анашкиной, 1953, Н.Н.Степанову, 1989, А.М.Перфильеву, 2013, с дополнениями [28]:

1–2 – терригенные породы: 1 – преимущественно алевролиты пионерской свиты, K_{1pn} , 2 – преимущественно песчаники горинской свиты, K_{1gr} ; 3 – дайки диоритовых порфиритов; 4 – разлом (а) и зоны скалывания с кулисным рядом рудных тел (б); 5–6 – направление перемещений: 5 – сдвиговые, 6 – ротационные; 7 – рудные тела; 8 – вектор сжатия (а) и растяжения (б); 9 – контуры рудовмещающей флексуры и элементы залегания пород; I–I' – линия разреза

крутым падением, пологие встречаются реже. Протяжённость даек от десятков до сотен метров, мощность от сантиметров до 1,5 м. На контактах вмещающие породы ороговикованы и метасоматически изменены. С глубиной степень термального воздействия возрастает. Глубина до кромки интрузии составляет 350–400 м [28]. Рудовмещающая ротационная флексурно-разрывная зона имеет взбросо-сдвиговую кинематику. По-види-

мому, она образовалась при региональном субмеридиональном латеральном сжатии, ориентированном в северо-западном направлении по азимуту 330° – 340° параллельно простиранию даек. Горизонтальная амплитуда левого сдвига, составляющая 500 м, определена по смещению пластов осадочных пород. Вертикальная взбросо-надвиговая амплитуда не установлена.

Пласты горных пород, слагающие левозакрученный флексурный изгиб, контролирует северо-восточная зона скалывания, которая простирается вдоль контакта горинской и пионерской свит. Флексуры погружаются на запад, северо-запад под крутыми углами (55° – 70°). В том же направлении под углом 40° склоняется большинство золото-кварцевых жил север-северо-восточного направления. Близширотные жилы залегают полого (20 – 30°) с северным и южным падением. Как правило, жилы простираются согласно изгибу флексуры. Протяжённость жил 200–300 м, жильных серий – 600–700 м различной мощности. Поверхности рудовмещающих разломов, как правило, волнистые по падению и простиранию. Сложная ротационная взбросо-сдвиговая кинематика разломов обусловила приоткрытие пологих граней при взбросе и крутых при сдвиге, что создало сложную морфологию рудных тел. Кроме того, рудные тела повсеместно через 3–5–15 м блокируют поперечные крутопадающие сколы преимущественно близмеридионального простирания, иногда выполненные дайковыми телами. Сколы являются малоамплитудными сдвигами, взбросами и сбросами. Вероятно, они образовались одновременно с надвигами (взбросами). Их максимальные горизонтальные амплитуды составляют 10–12 м, вертикальные – от 2–3 до 6 м. Рудоконтролирующая роль блокирующих дорудных сколов заключается в экранировании золото-кварцевой минерализации при пересечении с рудными жилами. В надвиговых зонах скалывания отработаны Z-образные жилы кручения, в сдвигах – линейно-подковообразные, серповидные, крючковые, дугообразные крутильные рудные тела. В листринговой (пропеллер) структуре кручения отработана самая богатая жила № 8-8 бис. Из жил сложной морфологии добыта основная масса золота. Погружаясь на север, северо-запад, жилы расположены кулисно в надвиговой зоне скалывания (см. рис. 4, разрез). На дневную поверхность выходит 50% жил, остальные являются слепыми. Они были обнаружены и отработаны на разных горизонтах до глубины 345 м. Вертикальный размах золото-кварцевого оруденения составляет 780 м. Рудный потенциал Агние-Афанасьевского месторождения окончательно не установлен. Вмещающие породы при разведке и отработке кварцевых жил, где содержание золота достигало 2–12 г/т, систематически не опробовались. Таким образом, сами вмещающие породы являются рудными телами.

В заключение следует отметить, что сравнительный анализ Берелёхского района (Центральная Колыма) и Агние-Афанасьевского рудного узла (Нижнее Приамурье)

показывает не только заметное сходство, но и ряд различий в геодинамическом развитии золотоносных площадей. Общими закономерностями являются:

1) отчётливая парагенетическая связь образования золотоносных вихревых (ротационных) структур разных иерархических уровней со сдвиговыми дуплексами, широко проявленными в мезозойских терригенных черносланцевых толщах Яно-Колымской и Сихотэ-Алиньской складчатых систем;

2) формирование вихревых структур в сдвиговых дуплексах происходило в обстановке знакопеременного регионального латерального сжатия (режим транс-прессии), при котором внедрение магм разного состава и рудоотложения происходило в условиях локального растяжения (режим транстенсии);

3) моноклинально-чешуйчатое строение роллинг флексур в зонах скалывания месторождений Светлое (Центральная Колыма) и Агние-Афанасьевское (Нижнее Приамурье) позволяет уверенно прогнозировать «слепые» жильные, жильно-штокверковые и бананцевые рудные тела на глубоких горизонтах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Буряк В.А. Основы минерагении золота. – Владивосток: Дальнаука, 2003.
- Вихри в геологических процессах. – Петропавловск-Камчатский: КГПУ, 2004.
- Геодинамика, магматизм и металлогения Востока России. В 2-х кн. / Под ред. А.И.Ханчука. – Владивосток: Дальнаука, 2006. Кн. 1.
- Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Верхояно-Колымская. Лист Р-55 – Сусуман. Объяснительная записка / В.И.Шпикерман, И.В.Полуботоко, А.Ф.Васькин А.Ф. и др. – СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2016.
- Иванов Б.А. Центральный Сихотэ-Алиньский разлом. – Владивосток, 1972.
- Изосов Л.А., Ли Н.С. Проблемы вихревой геодинамики // Региональные проблемы. 2017. Т. 20. № 1. С. 27–33.
- Интрузивные серии Северного Сихотэ-Алиня и Нижнего Приамурья, их рудоносность и происхождение / Э.П.Изох, В.В.Русс, И.В.Кунаев и др. – М.: Наука, 1967.
- Ли-Сы-Гуан Вихревые структуры Северо-Западного Китая. – М.–Л.: Госгеолиздат, 1958.
- Месторождения золота в дайках Яно-Колымского пояса / А.В.Волков, В.Н.Егоров, В.Ю.Прокофьев и др. // Геология рудных месторождений. 2008. Т. 50. № 4. С. 311–337.
- Мирлин Е.Г. Вихревая тектоника // Доклады Академии наук. 2009. Т. 426. № 5. С. 649–652.
- Многофакторные прогнозно-поисковые модели месторождений золота и серебра Северо-Востока России / Под ред. М.М.Константинова, И.С.Розенбаума, М.З.Зиннатулина. – СПб.: ВСЕГЕИ, 1992.
- Моисеенко В.Г., Эйриш Л.В. Золоторудные месторождения Востока России. – Владивосток: Дальнаука, 1996.
- Онухов Ф.С., Меркулова Г.В. Неотектонический роллинг блоков и условия сдвиговых дислокаций / Тектоника, глубинное строение и минерагения Востока Азии // Под ред. А.Н.Диденко, Ю.Ф.Манилова. – Хабаровск: ИТИГ ДВО РАН, 2016. С. 276–278.
- Поletaев А.И. Ротационная тектоника земной коры / Тектоника земной коры и мантии. Тектонические закономерности размещения полезных ископаемых: мат-лы XXXVIII тектонического совещания. – М.: ГЕОС, 2005. Т. 2. С. 97–100.
- Прокопьев А.В., Фридовский В.Ю., Гайдук В.В. Разломы: (Морфология, геометрия и кинематика). – Якутск: ЯФ Изд-ва СО РАН, 2004.
- Разломы и горизонтальные движения земной коры / В.С.Буртман, А.В.Лукьянов, А.В.Пейве, С.В.Руженцев // Труды ГИН АН СССР. – М.: Наука, 1963. Вып. 80. С. 5–32.
- Разломы и горизонтальные движения горных сооружений СССР. – М.: Наука, 1977.
- Тверитинова Т.Ю., Викулин А.В. Геологические и геофизические признаки вихревых структур в геологической среде // Вестник Краунц серия наук о Земле. 2005. № 5. С. 59–76.
- Тектоническая расслоенность литосферы новейших подвижных поясов. – М.: Наука, 1982.
- Условия зарождения и эволюции гранитоидных золото-магматических систем в мезозоидах Северо-Востока Азии / Г.Н.Гамянин, Н.А.Горячев, А.Ш.Бахарев и др. – Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 2003.
- Уткин В.П. Сдвиговые дислокации, магматизм и рудообразование. – М.: Наука, 1989.
- Хаин В.Е., Поletaев А.И. Ротационная тектоника: пред-дыстория, современное состояние, перспективы развития. Ротационные процессы в геологии и геофизике. – М.: КомКнига, 2007. С. 17–38.
- Цыганкова И.П. Моделирование глубинной структуры центральной части Яно-Колымского орогенного пояса / Тектоника, глубинное строение и минерализация Восточной Азии: IX Косыгинские чтения: мат-лы конференции / Отв. ред. А.И.Диденко, Ю.Ф.Манилов. – Хабаровск: ИТиГ им. Ю.А.Косыгина ДВО РАН, 2016. С. 93–95.
- Читалин А.Ф. Сдвиговая тектоника и золотоносность Колымского региона // Золото и технологии. 2016. № 4 (34). С. 122–126.
- Чурилин М.А. Спиралевидные системы геологических структур и некоторые приемы их выявления // Тектоника Сибири. – Новосибирск: Наука СО, 1980. Т. VIII. С. 73–80.
- Шахтыров В.Г. Верхне-Колымский золотоносный район в свете сдвиговой тектоники // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле РАЕН. 2009. Вып. 35. С. 89–98.
- Шахтыров В.Г. Сдвиговые структурные ансамбли и золотое оруденение Яно-Колымской складчатой системы // Автореф. дис. ... д-ра геол.-минер. наук. – Иркутск: Иркутский университет ГТУ, 2000.
- Юшманов Ю.П. Геолого-структурные особенности Агние-Афанасьевского месторождения в Нижнем Приамурье // Региональные проблемы. 2018. Т. 21. № 3. С. 15–21.
- WAN Tian Feng, HAO Qingle The genesis of tectono-magmatism in esten China / Ears Sciences. 2012. Vol. 55. № 3. P. 347–354.
- www.vsegei.ru / Гис-Атлас «Недра России».

Методика исследования оливина и хромдиопсида с помощью ИК-Фурье микроскопа и возможности её использования при шлихо-минералогических поисках месторождений алмаза

Г.К.ХАЧАТРЯН, Т.И.КОЛЕСНИКОВА (Федеральное государственное бюджетное учреждение «Центральный научно-исследовательский геологоразведочный институт цветных и благородных металлов» (ФГБУ «ЦНИГРИ»); 117545, г. Москва, Варшавское шоссе, д. 129, корп. 1)

Разработана новая методика анализа зёрен оливина и хромдиопсида с помощью ИК-Фурье микроскопа. По ИК-спектрам установлены типоморфные свойства этих минералов, позволяющие судить об их кимберлитовом источнике. Предлагаемая методика позволяет быстро идентифицировать оливины и диопсиды в пробах без разрушения зёрен, выявлять среди них минералы-спутники алмаза и может быть использована при шлихо-минералогических поисках алмазных месторождений.

Ключевые слова: шлихо-минералогический метод, минералы-спутники алмаза, оливин, клинопироксен, хромдиопсид, типоморфные свойства минералов, ИК-Фурье спектроскопия, ИК-спектры, волновые числа.

Хачатрян Галина Карленовна
доктор геолого-минералогических наук



khachatryan_g_k@mail.ru

Колесникова Татьяна Ивановна

kolesnikova2456@mail.ru

Methodology of the study of olivine and chrome-diopside by using the FTIR microscope and the possibility of its use in concentrate-mineralogical prospecting of diamond bearing

G.K.KHACHATRYAN, T.I.KOLESNIKOVA (Central Research Institute of Geological Prospecting for Base and Precious Metals)

A new technique to analyze olivine and chromodiopside grains using an IR Fourier microscope was developed. IR spectra allowed to determine typomorphic properties of these minerals suggesting their kimberlite source. This technique enables prompt olivine and diopside identification in samples (no grains are destructed) as well as diamond associated minerals and could be used in panning-mineralogical prospecting for diamond deposits.

Key words: panning-mineralogical method, diamond associated minerals, olivine, clinopyroxene, chromodiopside, typomorphic mineral properties, IR Fourier spectroscopy, IR spectra, wave numbers.

В основе шлихо-минералогического метода поисков алмазных месторождений лежит типоморфизм алмаза и его минералов-спутников: гранатов, ильменита, хромшпинелидов, клинопироксенов, оливинов и других, наиболее важной характеристикой которых является химический состав, отражающий условия кристаллизации. Поисковое значение различных минералов-спутников алмаза зависит от объекта и геологической специфики района поисков. Нередко содержание этих минералов в шлиховых пробах крайне низкое, а сами они имеют нетипичную окраску и очень малые размеры, что затрудняет их идентификацию. В такой ситуации рационально использовать экспрессный ме-

тод исследования мелких зёрен минералов с применением ИК-Фурье микроскопа [9]. Данный метод позволяет быстро идентифицировать минералы и оценивать особенности их химического состава без разрушения анализируемых зёрен. Это является преимуществом по сравнению с общепринятым в ИК-спектроскопии способом изучения «порошковых», то есть предварительно растёртых в ступке образцов.

Ранее авторы в работе [9] показали, что среди гранатов шлиховых проб могут быть надёжно диагностированы хромистые пиропы. Цель настоящей работы – расширение спектра минералов-спутников алмаза, которые могут быть детально проанализированы с

помощью ИК-Фурье микроскопа. При этом в качестве главных объектов исследования были выбраны оливин и хромдиопсид.

Оливин – главнейший породообразующий минерал кимберлитов, который используется при шлихо-минералогических поисках алмазных месторождений совместно с другими минералами-спутниками алмаза [7]. В кимберлитах наиболее распространены существенно магнезиальные оливины с содержанием форстерита более 82% [2]. Визуальная диагностика оливина в шлиховых пробах затруднена из-за его внешнего сходства с другими минералами (пироксен, эпидот). К тому же очень часто в кимберлитах и лампроитах оливин интенсивно серпентинизирован.

Среди клинопироксенов кимберлитов, как правило, преобладают кальций-магниевого. При этом клинопироксены эцлогитового парагенезиса характеризуются повышенным содержанием натрия, а ультраосновного – соответственно, хрома [4]. Диопсид с содержанием Cr_2O_3 не менее 0,5 мас.% принято называть хромдиопсидом [3].

Хромдиопсид, обладающий яркой изумрудно-зелёной окраской, является важным поисковым минералом кимберлитов. Считается, что из-за своей хрупкости он не выдерживает длительной транспортировки, в связи с чем его наличие в шлиховых ореолах служит признаком близости его коренного источника [7].

Внешне хромдиопсид из кимберлитов зачастую практически не отличается от хромдиопсида из других пород ультраосновного и основного составов. По этой причине при анализе шлиховых проб необходимы дополнительные инструментальные исследования это-

го минерала. Так, И.П.Илупин на основании анализа статистически представительного материала предлагал определять хромдиопсид из кимберлитов по соотношению в нём содержания (мас.%) оксидов натрия и алюминия [3].

Спектры зёрен оливинов и клинопироксенов регистрировались на приборе марки Nicolet 380 с микроскопом Centaurus компании THERMO Scientific в диапазоне $650\text{--}4000\text{ см}^{-1}$. Методика исследований подробно охарактеризована авторами в предыдущих работах [8, 9].

Оливин. Обзор публикаций, посвящённых анализу «порошковых» спектров природных и синтезированных оливинов разного состава, проведён в работе [5]. Спектры минералов оливиновой группы имеют ряд общих особенностей и характеризуются системой из трёх интенсивных линий в области $800\text{--}1010\text{ см}^{-1}$ (рис. 1, А-1), обусловленных колебаниями тетраэдров SiO_4 в структуре оливина. Симметрия кремнекислородных тетраэдров зависит от размеров катионов, слагающих кристаллическую решётку оливина, причём при переходе от фаялита к форстериту по мере увеличения магнезиальности отмечается повышение частоты Si-O колебаний. Наиболее чувствительна к железо-магнелийскому замещению в структуре оливинов частотная характеристика линии в области $963\text{--}1001\text{ см}^{-1}$. На рис. 1, А-1 указанной линии соответствует волновое число 982 см^{-1} . Также в ИК-спектрах оливинов из ксенолитов мантийных пород в кимберлитах прослеживаются многочисленные полосы поглощения в области $3200\text{--}3730\text{ см}^{-1}$ (рис. 2, Б), обусловленные колебаниями OH^- -групп. Природа этих полос дискутируется. С

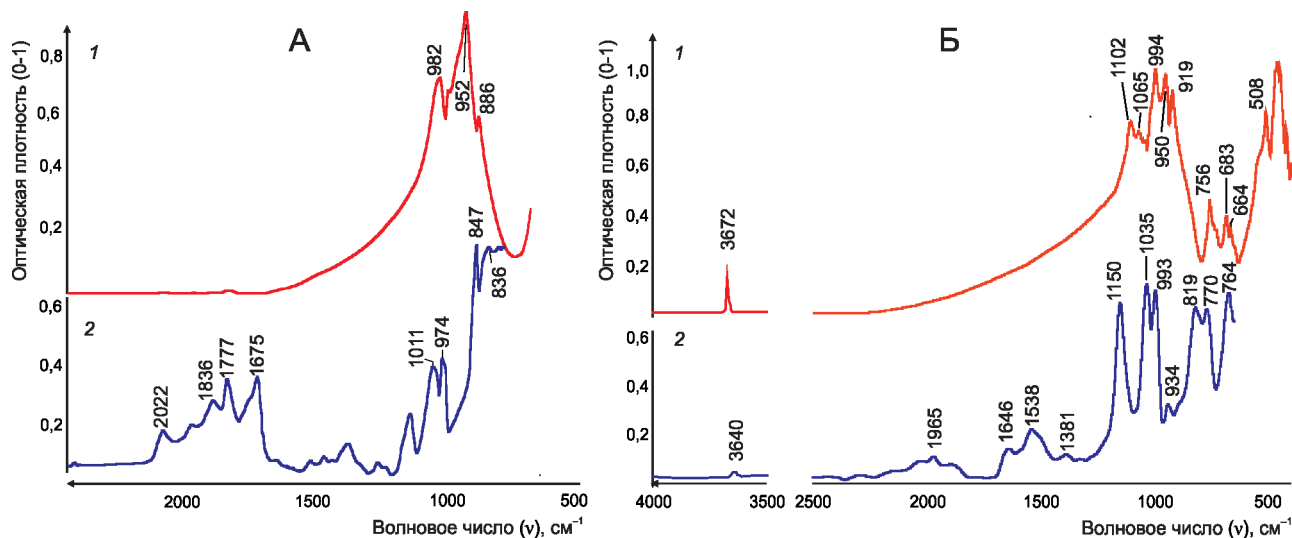


Рис. 1. ИК-спектры оливина (А) и диопсида (Б), полученные для порошкообразных образцов (1) и индивидуальных зёрен (2)

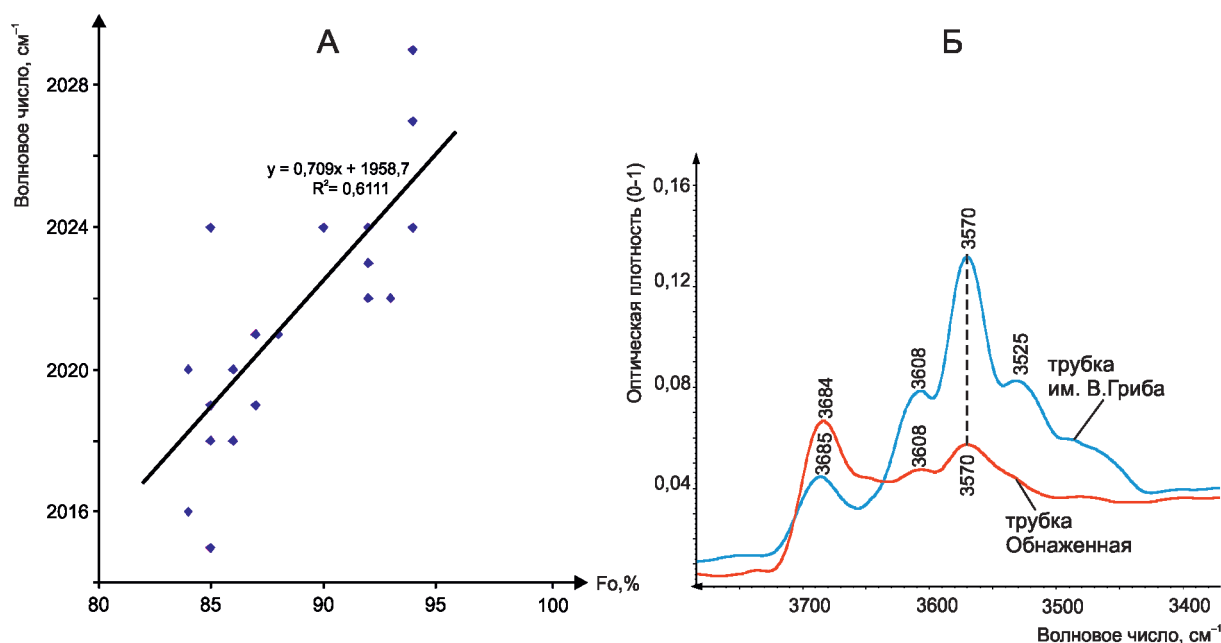


Рис. 2. Характерные черты ИК-спектров зёрен оливина из кимберлитов:

А – зависимость волнового числа в области 2015–2030 cm^{-1} (ν_1) от содержания форстерита (Fo, %) в оливине; Б – полосы поглощения около 3570 и 3525 cm^{-1}

одной стороны, большинство из них относят к структурным водородным дефектам в составе номинально безводных мантийных минералов [6, 11]. С другой стороны, рассматриваемые ОН-группы могут входить не только в структуру самого оливина, но и в состав замещающих его вторичных гидроксилсодержащих минералов (серпентина, талька и др.), а также в состав субмикроскопических дефектов в оливиновой матрице, состоящих из гидросиликатных фаз высокого давления [10]. На примере анализа ИК-спектров оливинов из трубки Удачная можно предположить, что линии ИК-спектра 3730–3670 cm^{-1} связаны с примесями гидроксилсодержащих минеральных фаз, а остальные, возможно, обусловлены собственными структурными дефектами кристаллической решётки оливина [12].

Объекты исследования. С применением ИК-Фурье микроскопа изучена коллекция из 21 зерна оливина из трубки им. В.Гриба (Архангельская область) и неалмазонасной трубки Обнаженная (Якутия), а также из аллювия на поисковых площадях Кепинская (Архангельская область.) и Пялицкая (Кольский п-ов). Окраска зёрен варьирует от желтоватой почти бесцветной до оливковой, размер зёрен от 0,02 до 0,1 мм. Все образцы были предварительно проанализированы с помощью микронзонда. Из табл. 1 видно, что оливины из кимберлитов характеризуются максимально высокими содержаниями (мас.%) оксида магния 49–53 и 48–51,

соответственно, для трубок им. В.Гриба и Обнаженная. В целом для оливинов из проб поисковых площадей характерна более низкая магнезиальность (см. табл. 1).

Для сравнения авторы данной статьи изучили несколько зёрен оливина различного состава из пород дифференцированных базитовых магматических комплексов Норильского района (коллекция В.К.Степанова) и оливин из вкрапленника в вулканических породах о. Тенерифе (предоставлен И.Г.Третьяковой).

ИК-спектроскопия оливинов. «Монокристалльные» спектры оливина (см. рис. 1, А-2) из кимберлитов (трубка им. В.Гриба) по форме и положению спектральных максимумов отличаются от «порошковых», заимствованных из библиотеки ИК-спектров HR-Minerals (см. рис. 1, А-1). При этом наиболее характерным участком спектров зёрен оливина из кимберлитов является система линий в области 1600–2030 cm^{-1} (см. рис. 1, А-2), которые, согласно работе [13], представляют собой обертоны полос поглощения в интервале 800–1010 cm^{-1} , проявляющихся в «порошковых» ИК-спектрах оливина (см. рис. 1, А-1). В табл. 2 приведены наиболее типичные спектральные линии изученных зёрен из кимберлитов и аллювия. Анализ этих данных позволяет выделить две системы линий, характеризующих спектр оливина. Первая представлена шестью максимумами поглощения в области 1600–2030 cm^{-1} (см. табл. 2), три из них основные: 2015–2030(ν_1),

1. Химический состав оливинов изученной коллекции. По данным микронзондового анализа

№ пп	Образцы	Место отбора проб	Концентрация элементов (мас.%)												
			SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	NiO	ZnO	Сумма
1	441-94/ 235-10	Трубка им.В.Гриба, Архангельская область	41,11	0,00	0,05	0,04	6,29	0,14	51,86	0,03	0,03	0,00	0,42	0,00	99,97
2	441-94/ 235-12		40,70	0,05	0,00	0,05	7,65	0,09	50,67	0,04	0,04	0,01	0,36	0,03	99,69
3	441-94/ 235-14		40,20	0,05	0,07	0,00	8,00	0,17	50,28	0,03	0,00	0,00	0,37	0,00	99,17
4	441-94/ 235-15		40,30	0,02	0,02	0,06	6,30	0,08	52,67	0,00	0,02	0,00	0,38	0,00	99,85
5	O-1	Трубка Обнаженная, Якутия	40,69	0,00	0,00	0,12	7,14	0,28	51,37	0,00	0,13	0,00	0,51	0,00	100,24
6	O-2		39,54	0,05	0,00	0,00	9,98	0,18	48,07	0,00	0,00	0,00	0,47	0,11	98,39
7	МК-30	Аллювий, Пялицкая площадь, Кольский полуостров	39,85	0,02	0,04	0,02	14,78	0,22	44,52	0,13	0,04	0,02	0,41	0,00	100,05
8	МК-35		40,41	0,00	0,03	0,02	10,19	0,23	47,37	0,20	0,18	0,00	0,28	0,00	98,91
9	МК-39		40,03	0,00	0,08	0,00	13,77	0,21	44,45	0,22	0,00	0,01	0,25	0,04	99,06
10	230-1	Аллювий, Кепинская площадь, Архангельская область	39,67	0,04	0,16	0,35	11,06	0,22	47,24	0,01	0,00	0,02	0,36	0,03	99,16
11	230-2		39,85	0,03	0,01	0,00	13,10	0,37	45,69	0,38	0,00	0,00	0,21	0,00	99,64
12	307-1		39,43	0,01	0,04	0,03	13,34	0,21	45,47	0,00	0,00	0,00	0,25	0,04	98,82
13	307-2		41,29	0,00	0,03	0,00	4,67	0,10	51,30	0,00	0,00	0,00	1,09	0,00	98,48
14	388-7		39,64	0,02	0,00	0,00	13,56	0,29	45,24	0,03	0,00	0,02	0,24	0,00	99,04
15	396-13		39,93	0,01	0,04	0,03	13,74	0,21	44,91	0,00	0,00	0,00	0,28	0,00	99,15
16	396-14		39,48	0,04	0,03	0,03	12,22	0,25	46,13	0,67	0,00	0,00	0,17	0,00	99,02
17	396-16		39,48	0,03	0,04	0,05	12,79	0,24	45,76	0,70	0,02	0,00	0,11	0,01	99,23
18	396-18		39,31	0,03	0,03	0,04	14,13	0,23	44,47	0,02	0,00	0,00	0,30	0,00	98,56
19	396-20		38,81	0,02	0,03	0,03	14,50	0,30	44,10	0,49	0,02	0,00	0,23	0,00	98,53
20	400-4		39,11	0,00	0,04	0,01	15,02	0,18	44,55	0,02	0,00	0,00	0,31	0,02	99,26
21	400-5		40,15	0,05	0,03	0,12	7,75	0,06	49,68	0,18	0,02	0,00	0,52	0,01	98,57

1774–1785(ν_2) и 1663–1681(ν_3) взаимосвязаны с магнезиальностью оливина. Вторая система линий (ν_4 , ν_5 , ν_6 , ν_7) в области 3500–3700 см⁻¹ обусловлена составом и концентрацией гидроксильных групп, входящих в структуру оливина или его фазовых примесей.

Наиболее значимая корреляция установлена между составом оливина (содержание форстерита, Fo,%) и положением спектральной линии 2015–2030 см⁻¹ (ν_1). Эта зависимость показана на рис. 2, демонстрирующей прямую корреляцию между ν_1 и относительным содержанием форстерита в оливине. Таким образом, спектральный максимум 2015–2030 см⁻¹ (ν_1) служит количественным индикатором магнезиальности оливина, что может быть использовано при экспресс-анализе состава оливина с целью установления типа его источника – кимберлитовый или иной.

Типоморфизм оливина из кимберлитов. Как уже отмечалось, одним из важных идентификационных признаков оливина из кимберлитов служит существенно форстеритовый состав минерала (Fo >82%). Однако данный признак является необходимым, но

не достаточным для отнесения оливина к индикаторным минералам кимберлитов. Это видно на примере изученных образцов. Так, оливины из кимберлитов (Fo₉₀₋₉₄) характеризуются параметром ν_1 не менее 2015 см⁻¹ (см. рис. 2, А), что сопоставимо с величиной ν_1 (2022 см⁻¹), измеренной в спектре оливинового вкрапленника (Fo₉₆) из вулканических пород Тенерифе. В то же время для оливинов из магматических пород Норильского района (Fo₈₀₋₉₀) параметр ν_1 ниже, чем для оливинов из кимберлитов, и не превышает 2010 см⁻¹. Иначе говоря, разделить оливины из разных источников только по волновым числам ν_1 удаётся не во всех случаях. Для решения этой задачи необходимы дополнительные отличительные признаки оливина из кимберлитов. К числу таких признаков можно отнести спектральные линии ОН-групп, которые типичны для мантийных минералов [11]. Из рис. 2, Б видно присутствие чётких пиков гидроксильных групп ~3570 и ~3525 см⁻¹ (ν_6 и ν_7), а также менее интенсивных ~3605 и 3670–3690 см⁻¹ (ν_5 и ν_4) в спектрах оливина из трубки им. В.Гриба. Линии ν_4 , ν_5 , ν_6 и ν_7 , но с иным соотношением ин-

2. ИК-спектроскопические характеристики изученных оливинов

№ п/п	№ образца	Fo, %	Волновые числа, см ⁻¹						
			Обертоны колебаний SiO ₄ ⁻ тетраэдра			Валентные колебания OH-групп			
			ν ₁	ν ₂	ν ₃	ν ₄	ν ₅	ν ₆	ν ₇
Кимберлиты трубки им. В.Гриба, Архангельская область									
1	441-94/235-10	94	2024	1781	1674	3677	3607	3571	3523
2	441-94/235-12	92	2023	1777	1676	3674	3608	3570	3522
3	441-94/235-14	92	2023	1783	1674	3682	3604	3570	3523
4	441-94/235-15	94	2029	1785	1676	3687	3605	3572	3523
Кимберлиты трубки Обнаженная, Якутия									
5	Ob-1	93	2022	1780	–	3684	–	3571	3525
6	Ob-2	90	2024	1783	1672	3684	3609	3570	–
Аллювий Палицкой площади, Кольский полуостров									
7	МК-30	84	2016	1776	1663	–	–	–	–
8	МК-35	84	2020	1781	1669	3684	–	3563	3520
9	МК-39	85	2019	1778	1670	–	–	–	–
Аллювий Кепинской площади, Архангельская область									
10	230-1	88	2021	1779	1672	–	–	3567	3525
11	230-2	86	2020	1774	1673	–	–	3563	3521
12	307-1	86	2018	1777	1671	–	–	3562	3520
13	307-2	94	2027	1781	1675	3680	–	–	–
14	388-7	86	2020	1780	1672	–	–	3562	3522
15	396-13	85	2018	1779	1670	–	–	3563	3520
16	396-14	87	2019	1777	1670	–	–	3563	-
17	396-16	87	2021	1782	1671	–	–	3561	3515
18	396-18	85	2024	1778	1671	–	–	3561	3515
19	396-20	85	2015	1783	1674	–	–	3562	-
20	400-4	84	2020	1778	1671	–	–	3565	3522
21	400-5	92	2024	1782	1672	3686	–	3567	3517
Породы Норильска									
22	№1	90	2010	1778	1665	3679	–	–	–
23	№2	80	1994	1769	1662	3672	–	–	–
Вулканические породы о. Тенерифе									
24	Ol-Volc	96	2022	1778	1670	–	–	–	–

Примечание. «—» — полосы поглощения не зафиксированы; Fo,% — содержание форстерита в оливине.

тенсивностей присутствуют в спектрах оливина из трубки Обнаженная (см. рис. 2, Б и табл. 2). По мнению авторов работы [12], линии ~3605 и 3670–3690 см⁻¹ (v₅ и v₄) могут быть связаны с примесями серпентина и талька – вторичных минералов, развивающихся по оливину. Вместе с тем линии ~3570 и ~3525 см⁻¹ (v₆ и v₇) в спектрах оливина эти же авторы относят к колебаниям структурных гидроксильных групп. Весьма характерно, что линии v₆ и v₇ отсутствуют в спектрах

норильских оливинов, а также оливинов вулкана о. Тенерифе.

Храмдионсид. ИК-спектрам клинопироксенов и их интерпретации посвящён ряд публикаций А.Н.Лазарева, основные результаты которых сведены в работе [5]. Согласно этим данным, в «порошковых» спектрах клинопироксенов полосы в области 400–600 см⁻¹ обусловлены деформационными колебаниями Si-O, а также валентными колебаниями М-О (металл-кислород),

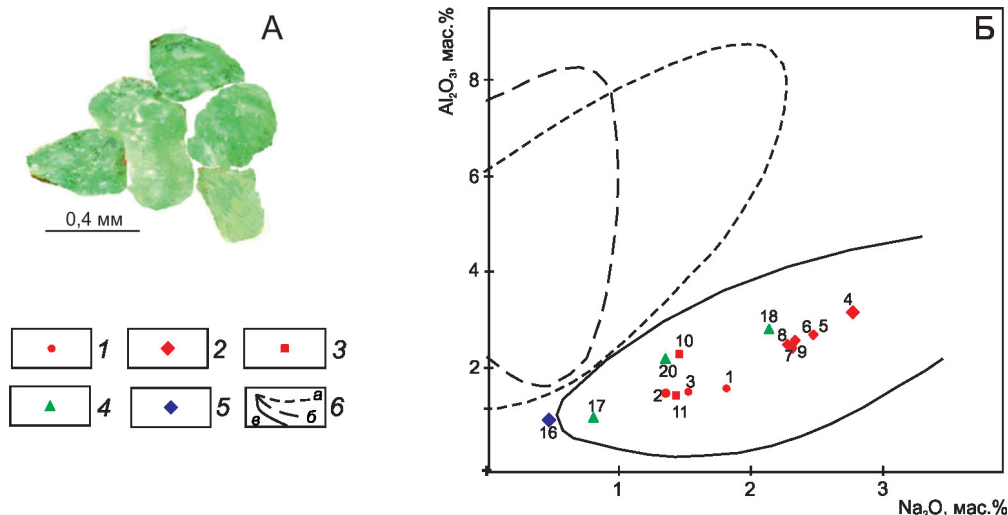


Рис. 3. Внешний вид (А) и особенности химического состава зёрен хромсодержащего и хромового диопсида на диаграмме И.П.Илупина [3] (Б). На фото зёрна хромдиопсида из шлик-протолочной пробы из трубки им. В.Гриба:

трубки: 1 – ЦНИГРИ-Архангельская, 2 – им. В.Гриба, Архангельская область, 3 – № 7, Финляндия; 4 – рыхлые ледниковые отложения, Карелия; 5 – терригенные отложения карбона, Архангельская область; 6 – области составов: а – хромдиопсиды из ультрамафитов, б – хромдиопсиды из глубинных включений (ксенолитов) из щелочных базальтов, в – наиболее распространённые хромдиопсиды из кимберлитов; цифрами обозначены разные пробы (см. табл. 3)

а полосы в области 670–880 и 900–1120 см^{-1} – соответственно, валентными и деформационными колебаниями в цепочках Si_2O_6 .

Объекты исследования представляли собой хромистые и хромсодержащие диопсиды из трубок им. В.Гриба (Архангельская область), №7 (Финляндия), Галл (Ангола), Загадочная (Якутия), верлитов (Полярный Урал), терригенных отложений (Архангельская область, Карелия). Размер зёрен варьировал от 0,02 до 0,15 мм, окраска от изумрудно-зелёной до ярко-зелёной. Часть изученных зёрен диопсида была проанализирована с помощью рентгеновского микроанализатора, а их состав отражён в табл. 3 и на рис. 3. Большинство из этих образцов, в соответствии с данными И.П.Илупина (1988), могут быть отнесены к хромдиопсидам из кимберлитов (см. рис. 3). Для сопоставления спектральных характеристик клинопироксенов разного состава также были изучены образцы диопсида (Прибайкалье), геденбергита (Тырныауз) и авгитов (о. Тенерифе и Норильский район). Эти клинопироксены были идентифицированы авторами данной статьи по порошковым спектрам с помощью электронной библиотеки спектров HR-Minerals.

ИК-спектроскопия клинопироксенов. ИК-спектр зерна диопсида из Прибайкалья показан на рис 1, Б-2. Спектр характеризуется интенсивными линиями в диапазоне 600–1150 см^{-1} , обусловленными колебаниями Si_2O_6 цепочек. По сравнению с «порошковым»

спектром диопсида (см. рис. 1, Б-1) положение и соотношение интенсивностей спектральных линий в «монокристалльном» спектре иное. Однако некоторые линии, например, 674–683 и 993–994 см^{-1} прослеживаются в спектрах обоих типов. Общей чертой сопоставляемых спектров также является пик в области колебания ОН-групп: 3600–3700 см^{-1} . Кроме того, в спектре зерна диопсида (см. рис. 1, Б-2) присутствуют три максимума поглощения в области 1300–1700 см^{-1} , которые, по-видимому, являются обертонами деформационных колебаний Si_2O_6 цепочек, проявляющихся в диапазоне 670–880 см^{-1} , а также система полос с главным максимумом около 1965 см^{-1} . Последние, предположительно, соответствуют обертонам валентных колебаний Si_2O_6 цепочек (993, 1036, 1150 см^{-1}).

Спектральные характеристики изученных зёрен клинопироксена приведены в табл. 3 и на рисунках 4 и 5.

Как видно из рис. 4, спектры диопсидов разного состава и геденбергита отличаются друг от друга по количеству и положению спектральных линий в диапазоне 900–1700 см^{-1} . Как показывает сравнительный анализ полученных спектров, наибольшие вариации в зависимости от состава обнаруживаются для линий в областях 1500–1600 см^{-1} (ν_1) и 1000–1060 см^{-1} (ν_2). Волновые числа ν_1 и ν_2 нарастают при переходе от геденбергита к диопсиду и далее к хромдиопсиду (см. рис. 4). Этот переход сопровождается уменьшением

3. Характеристика изученных зёрен клинопироксена и основные линии их ИК-спектров

№ п/п	Характеристика образца	Состав примесей, мас. %			Волновые числа, см ⁻¹								
		Al ₂ O ₃	Na ₂ O	Cr ₂ O ₃	3200–3700	2000–2100	1930–1980	1860–1900	1600–1700	1520–1570	1090–1200	1010–1060	980–1000
1	Трубка ЦНИГРИ-Архангельская, пр. К3а1/163	1,52	1,84	2,67	3646, 3627, 3459	2042	1975	1894	1650	1553±1	–	1058±2	992
2	Трубка ЦНИГРИ-Архангельская, пр.К3а4/171	1,48	1,36	1,03	3645, 3459	2074	1974	1887	1624	1560	1150	1055±1	993
3	Трубка ЦНИГРИ-Архангельская, пр. К3а-1 концентрат	1,48	1,52	1,43	3445	–	1975	–	1663	1553±2	1150	1044±2	–
4	Трубка им. В.Гриба, Архангельская обл., пр. 441-60-83	3,06	2,78	2,04	3684, 3641, 3441	–	1952	–	1654	1548±1	1154	1043±3	993
5	Трубка им. В.Гриба, Архангельская обл., пр. 7	2,62	2,5	1,94	3681, 3624, 3444, 3297	–	1953	–	1653	1549	1173	1047	995
6	Трубка им. В.Гриба, Архангельская обл., пр. 4	2,57	2,33	2,11	3683, 3630, 3447	–	1940	–	1662	1559	1178	1057	989
7	Трубка им. В.Гриба, Архангельская обл., пр. 6	2,32	2,31	1,86	3681, 3448	–	1956	–	–	1552	1188	1057	991
8	Трубка им. В.Гриба, Архангельская обл., пр. 3	2,43	2,27	2,03	3685, 3628, 3448	–	1962	–	1606	1560±3	1183	1051±2	992
9	Трубка им. В.Гриба, Архангельская обл., пр. 9	2,38	2,28	1,88	3688, 3646, 3422	–	1936	–	1665	1564±1	1182	1051±2	990
10	Трубка №7, Финляндия, пр. 6	2,24	1,48	0,16	3630, 3535, 3449, 3303	–	1971	1892	1652	1544	1159	1044	994
11	Трубка №7, Финляндия, пр. 10	1,5	1,41	1,59	3630, 3444	–	1939	–	1649	1555	1184	1055	988
12	Трубка Загадонная, Якутия	Н.д.	Н.д.	Н.д.	3680, 3637, 3441	–	1973	–	1639	1551±3	–	1046±3	996
13	Трубка Галл, Ангола, пр. 6141	Н.д.	Н.д.	Н.д.	3644, 3639, 3450	–	1969	1891	–	1543±3	1156	1041±3	991
14	Трубка Галл, Ангола, пр. 2309	н.д.	Н.д.	Н.д.	3624, 3534, 3453	2034	–	–	1663	1550±3	–	1048±3	991

№ п/п	Характеристика образца	Состав примесей, мас. %			Волновые числа, см ⁻¹								
		Al ₂ O ₃	Na ₂ O	Cr ₂ O ₃	3200–3700	2000–2100	1930–1980	1860–1900	1600–1700	1520–1570	1090–1200	1010–1060	980–1000
15	Верлит, Полярный Урал, пр. А-29	Н.д.	Н.д.	Н.д.	3674, 3640, 3535, 3461	2039	1972	1887	1665	1544+3	1135	1035	992
16	Отложения карбона, Ар- хангельск, скв. А2/68-9	0,87	0,43	1,09	3633, 3514, 3466, 3301	2050	1972	1893	1643	1551+1	1180	1039	985
17	Рыхлые отложения, Карелия, пр. в 16-47/1	0,97	0,8	0,83	3641, 3568, 3450	–	1971	1886	1643	1542+3	1132	1038+3	992
18	Рыхлые отложения, Карелия, пр. 217-3	2,75	2,25	2,14	3630, 3448	–	1955	–	1671	1550	1147	1041	993
19	Рыхлые отложения, Карелия, пр. в 21-61	Н.д.	Н.д.	Н.д.	3636, 3527, 3458	–	1970	1891	1644	1550±2	1161	1038±3	994
20	Рыхлые отложения, Карелия, пр. 401-6	2,13	1,33	1,72	3636, 3563, 3447	2036	1968	1890	1645	1545	1153	1044	996
21	Диопсид, Прибайкалье (разные зерна)	Н.д.	Н.д.	Н.д.	3640 3641, 3514, 3383	– 2150	1968 1970	1892 1890	– 1641	1534 1538	1129 1151	1027 1036	993 995
22	Геденбергит, Тырныауз (разные зёрна)	Н.д.	Н.д.	Н.д.	3532, 3490, 3422,	2034	1954	1873	1628	1528	1128	1021	990
						2041	1951	1876	1617	1536	–	1016	985
						2056	1956	1867	1625	1535	1149, 1099	1020	990
						2060	1955	1873	1627	1534	1150, 1095	1020	999
23	Авгит, Норильский район, пр. 3	Н.д.	Н.д.	Н.д.	3633, 3514	–	1970	1895	1638	1545	1146	1035	985
24	Авгит, Норильский район, пр. 4	Н.д.	Н.д.	Н.д.	3625, 3585, 3471	–	1971	1897	1644	1552	1150	1045	983
25	Авгит, Норильский район, пр. 5	Н.д.	Н.д.	Н.д.	3360, 3538, 3467	–	1969	1893	1646	1553	1160	1041	987
26	Авгит, вулкан о. Тене- риф	Н.д.	Н.д.	Н.д.	3623, 3521, 3456	–	1970	1892	1641	1552	1167	1041	992

Примечание. Н.д. – нет данных, «–» – отчётливые полосы поглощения не зафиксированы.

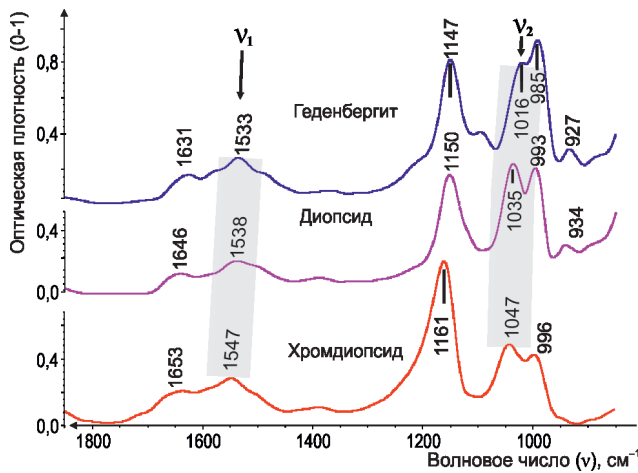


Рис. 4. Спектры зёрен геденбергита, диопсида и хромдиопсида в диапазоне 800–1800 см⁻¹, полученные с помощью ИК-Фурье микроскопа

катионного радиуса от 0,080 нм (Fe²⁺) до 0,074 нм (Mg²⁺) и 0,064 нм (Cr³⁺), соответственно. Очевидно, что вариации размеров и структурного положения катионов в кристаллической решётке клинопироксенов оказывают влияние на симметрию и взаимное расположение кремнекислородных тетраэдров в цепочках Si₂O₆. Это, в свою очередь, служит причиной вариаций частотных характеристик ν_1 и ν_2 в ИК-спектрах клинопироксенов разного состава. Однако чёткой корреляции между катионным составом клинопироксенов и величинами ν_1 и ν_2 не наблюдается, так как соответствующие параметры связаны между собой лишь косвенно. При этом имеется тенденция увеличения параметров ν_1 и ν_2 с увеличением содержания Cr₂O₃ в диопсидах (см. табл. 3).

При анализе разных фрагментов одного и того же зерна клинопироксена были обнаружены вариации ν_1 и ν_2 , обусловленные внутренней неоднородностью образцов и методической погрешностью измерений. Для таких зёрен определялись средние значения ν_1 и ν_2 и соответствующие им отклонения (см. табл. 3).

Несмотря на различный химический состав хромдиопсида и авгита, ИК-спектры сопоставляемых минералов достаточно похожи (см. табл. 3). Так, параметр ν_1 в спектрах хромдиопсида и авгита имеет близкие значения, а параметр ν_2 в спектрах хромдиопсида незначительно выше по сравнению с авгитом. Однако этот факт не является препятствием для идентификации хромдиопсида в шлиховых пробах благодаря существенным внешним отличиям зёрен ярко-зелёных хромдиопсидов от тёмноокрашенных преимущественно бурых авгитов.

В интервале 3200–3700 см⁻¹ ИК-спектры диопсидов характеризуются максимумами поглощения 3300–3390 см⁻¹ (ν_3), 3400–3500 см⁻¹ (ν_4), 3505–3545 см⁻¹ (ν_5), 3620–3645 см⁻¹ (ν_6) и 3675–3685 см⁻¹ (ν_7). Как показал анализ электронной библиотеки спектров и литературных данных [1], комбинация линий ν_6 и ν_7 обусловлена примесью серпентина. Остальные линии в отсутствие ν_7 могут проявляться у хлорита, глинистых минералов и гидрослюд.

Типоморфные свойства хромдиопсида из кимберлитов. Как уже отмечалось, при проведении шлихо-минералогических поисков алмазных месторождений важно не только идентифицировать в пробе хромдиопсид, но и отличить хромдиопсид из кимберлитов от хромдиопсида ультраосновных пород. При этом одним из главных критериев выделения хромдиопсида из кимберлитовых пород служит соотношение концентраций Na и Al в минерале. Несмотря на то, что прямой зависимости между содержанием этих компонентов и спектральными характеристиками хромдиопсида не обнаружено, авторы данной статьи изучили изменчивость параметров ν_1 и ν_2 в ИК-спектрах клинопироксенов разного состава из пород различного типа. Для решения этой задачи проведено сопоставление спектральных характеристик клинопироксенов из кимберлитов четырёх трубок разных регионов и клинопироксенов из иных источников – ультраосновных и основных магматических пород, а также терригенных отложений (см. рис. 5). На рисунке для всех изученных клинопироксенов геденбергит-диопсидового ряда видна отчётливая положительная корреляция значений ν_1 и ν_2 . Минимальными значениями этих параметров характеризуется геденбергит ($\nu_1 < 1540$ см⁻¹, $\nu_2 < 1025$ см⁻¹). Для диопсида и в особенности хромдиопсида наблюдается последовательное увеличение соответствующих значений, максимальные из которых достигают 1563 (ν_1) и 1057 (ν_2) см⁻¹.

Как видно из рис. 5, фигуративные точки хромдиопсидов из кимберлитов занимают верхнюю часть диаграммы и характеризуются величинами ν_2 более 1040 см⁻¹. Это значение можно принять за условную границу, разделяющую на диаграмме хромдиопсиды из кимберлитов и из ультраосновных пород, например, верлитов (см. табл. 3 и рис. 5).

Линии ν_3 – ν_7 в области 3200–3700 см⁻¹ в ИК-спектрах зёрен клинопироксенов, с точки зрения авторов, связаны с их вторичными изменениями. Эти линии не могут быть использованы в качестве типоморфной характеристики хромдиопсида из кимберлитов, так как состав вторичных минералов достаточно изменчив. Например, хромдиопсиды из трубок им. В.Гриба (Архангельская область), Загадочная (Якутия), а также из верлитов Полярного Урала в значительной мере серпентинизированы (линии ν_6 и ν_7). При этом чёткие линии серпентина не наблюдаются в ИК-спектрах изученных клинопироксенов из кимберлитов трубок Финляндии и Анголы, а также из других типов пород.

Методика исследования оливина и хромдиопсида с помощью ИК-Фурье микроскопа при шлихо-минералогических поисках месторождений алмаза. Выявленные авторами типоморфные спектральные характеристики оливина и хромдиопсида служат основой для разработки методики исследования этих минералов при проведении шлихо-минералогических поисков алмазных месторождений.

Типоморфными спектральными характеристиками оливинов из кимберлитов являются повышенные значения параметра $\nu_1 > 2015 \text{ см}^{-1}$ и присутствие линий ~ 3570 и $\sim 3525 \text{ см}^{-1}$ (ν_6 и ν_7). По этим признакам можно провести «разбраковку» оливинов, отобранных на поисковых площадях (см. табл. 3). Так, большинство оливинов, отобранных на Кепинской площади в Архангельской области, а также оливин, обнаруженный в пробе МК-35 на Пялицкой площади Кольского полуострова, по-видимому, имеют кимберлитовый источник.

Типоморфными свойствами хромдиопсида служат волновые числа двух спектральных линий в областях $1000\text{--}1060$ и $1500\text{--}1600 \text{ см}^{-1}$. Хромдиопсид из кимберлитов отличается от диопсида из других пород относительно повышенными значениями этих параметров: >1040 и $>1540 \text{ см}^{-1}$, соответственно. Согласно этому, среди хромдиопсидов из рыхлых отложений Карелии образцы из проб 217-3 и 401-6 наиболее вероятно относятся к кимберлитам.

Анализ оливина и диопсида из шлиховых проб с помощью ИК-Фурье микроскопа состоит в следующем:

- 1) проба, представленная минералами тяжёлой фракции шлиха либо визуально отобранными зёрнами оливина и клинопироксена, помещается на отражающую ИК-излучение подложку;
- 2) записываются ИК-спектры отдельных зёрен под ИК-микроскопом;
- 3) осуществляется идентификация минералов по их спектрам;
- 4) Определяются типоморфные характеристики оливина и клинопироксена;
- 5) типоморфные характеристики исследуемых минералов сопоставляются с соответствующими параметрами оливина и клинопироксена из кимберлитов;
- 6) на основе этого сопоставления и с учётом наличия в шлихах других индикаторных минералов кимберлитов делается вывод о типе источника оливина и клинопироксена из шлиховых проб.

В заключение следует отметить, что типоморфные свойства оливина и хромдиопсида из кимберлитов, установленные с применением ИК-Фурье микроскопа, могут быть непосредственно использованы при исследовании шлиховых проб.

Разработанная методика способствует повышению эффективности шлихо-минералогических поисков месторождений алмаза. Это достигается за счёт более надёжной инструментальной идентификации минералов и быстрого получения количественной информа-

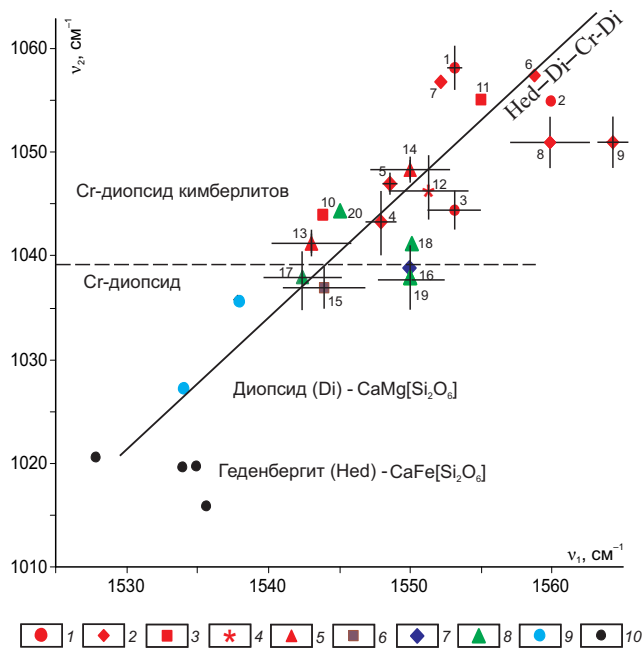


Рис. 5. Соотношение волновых чисел в областях $1525\text{--}1565 \text{ см}^{-1}$ (ν_1) и $1010\text{--}1060 \text{ см}^{-1}$ (ν_2) в ИК-спектрах зёрен диопсида из кимберлитов и иных пород, а также в геденбергите:

1–5 – трубки: 1 – ЦНИГРИ-Архангельская, 2 – им. В.Гриба, Архангельская область, 3 – № 7, Финляндия, 4 – Загадочная, Якутия, 5 – Галл, Ангола; 6 – верлит, Полярный Урал; 7 – терригенные отложения карбона, Архангельская область; 8 – рыхлые ледниковые отложения, Карелия; 9 – диопсид, Прибайкалье; 10 – геденбергит, Тырныауз; номера проб см. рис. 3 и табл. 3; штриховой линией обозначена условная граница хромдиопсидов из кимберлитов

ции об их типоморфных свойствах. Данная методика может быть использована для суждения о типе источников содержащихся в шлиховых пробах минералов (кимберлитовый или иной). При этом предоставляется возможность отобрать зёрна предполагаемых минералов-спутников алмаза для дальнейшего более детального анализа на микрозонде.

Важным направлением дальнейших исследований является создание представительной базы данных, содержащей ИК-спектроскопические характеристики оливинов и клинопироксенов из различных кимберлитовых и лампроитовых тел, а также иных платформенных магматитов.

Авторы благодарят Т.Е.Щербакову и И.Г.Третьякову за предоставление образцов и данных по их химическому составу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Болдырев А.И.* Инфракрасные спектры минералов. – М.: Недра, 1976.
2. *Геология и генезис алмазных месторождений: монография в 2-х книгах* // Под ред. Б.М.Зубарева. – М.: ЦНИГРИ, 1989.
3. *Илутин И.П.* Новые данные о типоморфизме хромдиопсида из кимберлитов / Природные ассоциации, особенности состава и свойства минералов-спутников алмаза // Тр. ЦНИГРИ. Вып. 229. – М., 1988. С. 7–9.
4. *Морфогенез алмаза и минералов-спутников в кимберлитах и родственных породах Архангельской кимберлитовой провинции: атлас* // Г.П.Кудрявцева, Т.В.Посухова, В.В.Вержак и др. – М.: Изд-во «Полярный круг», 2005.
5. *Плюснина И.И.* Инфракрасные спектры силикатов // Под редакцией Л.А.Грибова. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1967.
6. *Содержание воды в минералах мантийных ксенолитов из кимберлитов трубки Удачная (Якутия) / А.Л.Рагозин, А.А.Каримова, К.Д.Литасов и др.* // Геология и геофизика. 2014. Т. 55. № 4. С. 549–567.
7. *Харькив А.Д., Зинчук Н.Н., Крючков А.И.* Геолого-генетические основы шлихо-минералогического метода поисков алмазных месторождений. – М.: Недра, 1995.
8. *Хачатрян Г. К., Кряжев С.Г.* Методика анализа породообразующих и акцессорных минералов рудных месторождений с использованием ИК-Фурье микроскопа // Руды и металлы. 2010. № 5. С. 64–73.
9. *Хачатрян Г. К., Щербакова Т. Е., Колесникова Т.И.* Методика исследования минералов-спутников алмаза с применением ИК-Фурье спектроскопии // Отечественная геология. 2011. № 4. С. 76–85.
10. *Хисина Н.Р., Вирт Р.* Поведение протона при деформации «мокрого» оливина в условиях кимберлитового процесса // Геохимия. 2010. № 4. С. 357–365.
11. *Beran A., Libowitzky E.* Water in Natural Mantle Minerals II: Olivine, Garnet and Accessory Minerals // Reviews in Mineralogy & Geochemistry. 2006. Vol. 62. P. 169–191.
12. *FTIR Spectrum of Phenocryst Olivine as an Indicator of Silica Saturation in Magmas / S.Matveev, M.Portnyagin, C.Ballhaus et al.* // Journal of Petrology. 2005. Vol. 46. № 3. P. 603–614.
13. *Hydroxyl in mantle olivine xenocrysts from the Udachnaya kimberlite pipe / M.Koch-Müller, S.S.Matsyuk, D.Rhede et al.* // Phys Chem Minerals. 2006. Vol. 33. P. 276–287.

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ РИСУНКОВ

Рисунки и другие графические материалы представляются в цветном или чёрно-белом варианте в электронном виде. Размер оригиналов рисунков не должен превышать формат страницы журнала (170×237 мм). Каждый рисунок помещается в отдельный файл в одном из следующих форматов: графический редактор Corel Draw, JPEG и TIFF (только для фото), диаграмма Microsoft Excel. Графика должна быть прямо связана с текстом и способствовать его сокращению. Оформление и содержание иллюстративного материала должны обеспечивать его читаемость после возможного уменьшения. **Ксерокопии и сканированные ксерокопии не принимаются.** Подрисуночные подписи печатаются на отдельной странице. Рисунки, не удовлетворяющие требованиям редакции, возвращаются автору.

Обстановки осадконакопления и особенности состава донных отложений в Ангарских водохранилищах

Г.А.КАРНАУХОВА (Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт земной коры Сибирского отделения Российской академии наук (ИЗК СО РАН); 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128)

В пределах Ангарских водохранилищ основными обстановками осадконакопления являются три области – прибрежная, затопленных террас и русла р. Ангара, «река–водохранилище», – отражающие специфику осадкообразования в этих искусственных водоёмах и особенности состава донных отложений. Рассмотрены фракционный, минералогический и геохимический составы основных типов донных отложений в каждой обстановке осадконакопления. Установлено, что незначительные по площади прибрежная область и область «река–водохранилище» перехватывают основные потоки осадочного материала, что приводит к сосредоточению именно здесь наибольших по водохранилищам скоростей осадконакопления. Общий характер преобладания песчаных частиц в осадках прибрежной отмели и господство алевритового материала над пелитовой фракцией в осадках затопленных террас и русла Ангарских водохранилищ имеют сходство с распределением фракций, характерных для осадков оз. Байкал. Донные отложения специфической области «река–водохранилище» являются основными концентраторами химических элементов. В Ангарских водохранилищах, имеющих по геологическим масштабам незначительный период существования, наряду с фракционной сортировкой присутствуют минералогическая и геохимическая дифференциация осадочного материала.

Ключевые слова: обстановки осадконакопления, донные отложения, Ангарские водохранилища.

Карнаухова Галина Александровна
доктор географических наук



karnauh@crust.irk.ru

Depositional environments and composition features of bottom deposits in the Angara reservoirs

G.A.KARNAUKHOVA (Federal state budgetary institution of science Institute of the Earth's crust Siberian branch of the Russian Academy of Sciences)

Within the Angara reservoirs, three main areas of sedimentation are coastal areas, flooded terraces and the Angara river bed, as well as «river-reservoir», reflecting the specific features of sedimentation in these artificial reservoirs and composition features of bottom sediments. It has been established that the insignificant coastal area and the «river-reservoir» region intercept the main streams of sedimentary material, which leads to the concentration of sedimentation rates in the reservoirs. The general nature of the predominance of sand particles in the sediments of the coastal shoal and the dominance of the silty material over the pelite fraction in the sediments of the flooded terraces and the bed of the Angara reservoirs are similar to the distribution of fractions characteristic of the sediments of Lake Baikal. Bottom sediments of the specific area of the «river-reservoir» are the main concentrators of chemical elements. In the Angara reservoirs, with a short residence time within geological scales, along with fractional sorting, there is mineralogical and geochemical differentiation of the sedimentary material.

Key words: sedimentation conditions, bottom sediments, Angara reservoirs.

Водохранилища – природно-техногенные системы, осадконакопление в которых происходит в особых физико-географических обстановках и под влиянием иных, чем в естественных условиях факторов, сочетающих в себе как унаследованные от речных, так и приобретённые после создания искусственных водоёмов

свойства. В водохранилищах все процессы происходят в режиме реального времени и во много раз быстрее, чем в природных водоёмах. Это позволяет проводить непосредственные наблюдения за формированием донных отложений, а также их эволюцией в зависимости от изменений внешних и внутренних условий, происхо-

дящих как в самих водоёмах, так и в пределах их водосборных бассейнов. Одним из наиболее уникальных и информативных объектов для исследований процессов современного осадконакопления служит природно-техногенная система с современным быстрым и сверхбыстрым осадконакоплением – Ангарские водохранилища, созданные на р. Ангара, вытекающей из оз. Байкал. Каскад включает Иркутское, Братское, Усть-Илимское и Богучанское водохранилища, время эксплуатации которых составляет, соответственно, 60, 50, 40 лет и 1 год (последнее в статье не рассматривается) (рис. 1).

Ангарские водохранилища относятся к одной из крупнейших в мире систем искусственных водоёмов, в которых заключено более 230 км³ пресной воды при площади водного зеркала более 7500 км² и протяжённости с юга на север около 1,4 тыс. км. Водоохранилища расположены на контакте двух геологических структур – Сибирской платформы и Байкальской рифтовой зоны, являющихся областями активного поступления осадочного материала в водохранилища. Из-за нестабильности режима эксплуатации водохранилища продолжают находиться в стадии становления рельефа берегов и дна с активным проявлением абразионных процессов и поступлением большого объёма размытого материала.

Цель данной работы – исследование гранулометрического, минералогического и геохимического составов донных отложений в пределах основных обстановок осадконакопления, отражающих особенности осадкообразования в Ангарских водохранилищах.

Методы исследований. В период с 1972 по 2015 гг. в составе экспедиций Института земной коры СО РАН автором проводились комплексные исследования водохранилищ Ангарского каскада, в результате которых собран большой объём фактического материала по гранулометрическому, минералогическому и геохимическому составам, а также физическим свойствам донных отложений и пород береговой зоны водохранилищ, гидродинамическим условиям, миграции и накоплению химических элементов в этих водоёмах. В основу натурных исследований был положен методический принцип опорных участков и профилей, суть которого состояла в выделении репрезентативных участков на каждом из водохранилищ с учётом разнообразия природных условий, характера гидродинамики, состава и свойств пород береговой зоны. Все профили были привязаны к участкам наблюдений за формированием берегов водохранилищ. Такой метод даёт возможность включить в систему опробования большинство фациальных обстановок осадконакопления и форм надводного и подводного рельефа. Профильный отбор образцов пород, слагающих береговые уступы, донных отложений и проб воды выполнялся по 4 опорным профилям на Иркутском водохранилище, 34 – на Братском, 8 – на Усть-Илимском и 9 опорным и 5 дополнительным профилям в барьерной зоне «река–водохранилище». Для отбора образцов донных отложений на малых глубинах были задействованы

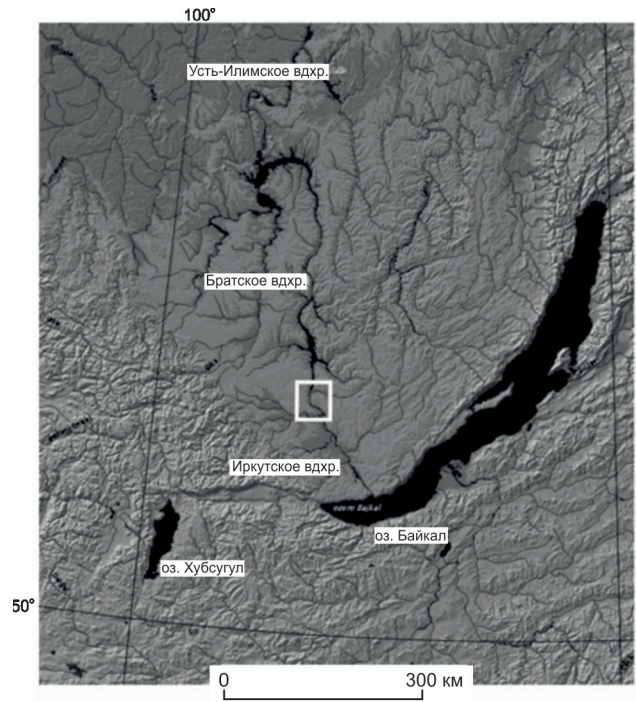


Рис. 1. Модель рельефа юга Восточной Сибири (SRTM):

белый квадрат – положение области «река–водохранилище»

грунтоотборники различных модификаций и дночерпатель. Глубже 2 м отбор образцов проводился с борта экспедиционного корабля грунтоотборной трубкой ПИ–27–П. Темпы осадконакопления определялись как балансовым методом, так и методом непосредственного зондирования слоя накопившихся отложений на опорных профилях при многоразовых детальных грунтовых съёмках, а на остальной акватории – геологическим методом деления мощности осадочного слоя на время, за которое слой образовался. Изучение перемещения осадочного материала и полей его концентрации в водной среде проводилось методом прямого отбора проб воды батометром Молчанова по тем же профилям и в тех же точках, что и отбор образцов донных отложений. Отбор проб осуществлялся на разрезах с поверхностного, срединного и придонного горизонтов. Гидродинамические условия, определяющие характер миграции осадочного материала, включали определения скоростей и направления перемещения воды на различных горизонтах с помощью морской вертушки ВММ, а также расчёты и построение гидродинамических моделей. В результате было опробовано более 5000 точек на дне водохранилищ, отобрано более 2900 образцов донных осадков, взято около 650 образцов пород из береговых уступов и около 700 образцов отложений прибрежных отмелей. Взято более 3500 проб воды.

В ЦКП «Геодинамика и геохронология» ИЗК СО РАН были выполнены определения гранулометрического, минералогического и геохимического составов образцов донных отложений и проб воды, а также физических свойств донных осадков. Анализы проводились по общепринятым методикам с учётом требований и методических приёмов, используемых при литологических, геохимических, гидрохимических и инженерно-геологических анализах [1, 2, 8–10, 11–13]. Контроль результатов анализа образцов донных отложений и пород береговых уступов, а также проб воды осуществлялся методом сравнения с отечественными и международными стандартами.

Величина поступления в водохранилища осадкообразующего материала из оз. Байкал и твёрдый сток рек определялись отдельно для взвешенных и влекомых наносов. Для взвешенных наносов были использованы данные измерений их расходов. Сток влекомых наносов определён с помощью расчётных зависимостей, предложенных Г.И.Шамовым [14], которые дают хорошую сходимость с натурными наблюдениями.

Результаты и их обсуждение. Основными осадкообразующими источниками для водохранилищ Ангарского каскада являются их абразионные берега и речной сток, состав осадочного материала которых в областях сноса с Сибирской платформы и Байкальской рифтовой зоны определяют породы 5 основных питающих терригенно-минералогических провинций. В южном и юго-западном обрамлении Сибирской платформы расположена одна питающая провинция нижнепротерозойских и архейских интрузивных образований Байкальской рифтовой зоны. На Сибирской платформе находятся четыре питающие провинции, представленные породами юрской системы осадочного чехла, надвинутого на фундамент Сибирской платформы, и развитыми в их поле четвертичными

отложениями, а также породами кембрийской и ордовикской систем с четвертичными отложениями в их поле, и изверженными породами мезозоя. При общей протяжённости береговой линии водохранилищ около 7800 км на абразионные берега приходится более 2100 км, из которых при размыве пород юрской системы формируется 69 км подверженных абразии берегов, кембрийской – 519 км, ордовикской – 544 км, силурийской и каменноугольной – 393 км, в четвертичных отложениях – 716 км. Ежегодное поступление осадочного материала в водохранилища составляет более 227 млн. т, из них абразия берегов даёт 98,5% суммарного поступления. На долю абразионного материала в Иркутском водохранилище приходится 77,9, Братском – 98,8 и Усть-Илимском – 87,1% (табл. 1). Речной сток по величине приносимого материала значительно уступает поступлениям от размыва берегов. С водами рек в водохранилища ежегодно приносится около 2,7 млн. т. Главным образом материал поступает в форме взвесей и растворов. Влекомые наносы остаются в руслах и долинах рек. Малые притоки практически не влияют на осадочный процесс в водохранилищах. Ежегодно оз. Байкал поставляет 0,87 млн. т материала.

Основные процессы формирования комплекса донных отложений Ангарских водохранилищ происходят в трёх основных обстановках осадконакопления, таких как: прибрежная область, область затопленных террас и русла р. Ангара и область «река–водохранилище».

Прибрежная область включает прибрежные отдели и их подводный склон, образование которых происходит на участках водохранилищ, где генетическим типом формирующихся берегов является абразионный тип. Протяжённость области составляет более 2100 км, площадь – 75 км², то есть немногим более 1% общей площади водохранилищ [7].

1. Седиментационный баланс водохранилищ Ангарского каскада

Составляющие	Водохранилище						Сумма, млн. т в год
	Иркутское		Братское		Усть-Илимское		
	млн. т в год	%	млн. т в год	%	млн. т в год	%	
Приход							
Абразия пород береговых уступов	0,25	77,9	219,50	98,7	4,30	87,1	224,05
Вышерасположенный водоём	0,07	22,1	0,37	0,2	0,43	8,7	0,87
Боковая приточность	0	0	2,48	1,1	0,21	4,2	2,69
Сумма прихода	0,32	100	222,35	100	4,94	100	227,61
Расход							
Сброс в нижний бьеф	0,11	35,9	0,43	0,2	0,11	2,2	0,65
Взвеси в воде водохранилища	0,01	1,2	0,80	0,4	0,06	1,3	0,87
Донные отложения	0,20	62,9	221,12	99,4	4,77	96,5	226,09
Сумма расхода	0,32	100	222,35	100	4,94	100	227,61

Первый, самый активный этап дифференциации материала абразии берегов, осуществляемый волнами и ветро-волновыми течениями, начинается в пределах *прибрежных отмелей*. Наибольшей кинетической энергией обладают волны в верхних слоях воды, переносящие самые крупные фракции осадочного материала. Прибрежные отмели, занимая незначительную часть от общей площади водохранилищ, удерживают большие массы обломочного материала и являются областями сверхбыстрой седиментации. Так, при абразии суглинков до 50% размытого материала остаются вблизи питающего источника, формируя отмели шириной от 20 до 100 м. Слой отложений, ежегодно накапливающихся на отмели, может достигать 80 см и представлен в основном крупными алевритами. Абразия аргиллитов приводит к аккумуляции в основном щебнисто-песчаного материала с пелитовым заполнителем со скоростью 30 см/год. Ширина отмели составляет 10–30 м. При абразии песчаников более 50% размытого материала отлагаются в прибрежной зоне, формируются отмели песчаного состава шириной более 40 м. Темп аккумуляции песка составляет 20–90 см/год.

Гидродинамические условия на различных участках прибрежных отмелей вместе с составом и свойствами абразионного материала определяют набор минералов, химических элементов и соединений, а также их количественное соотношение. Наиболее типичными в осадках являются фракции 0,25–0,05 и 0,05–0,01 мм, составляющие в сумме более 65%, то есть преобладающим является песчано-алевритовый материал (рис. 2), формирующий основные типы осадков – пески и крупные алевриты [6]. На отмелях активно накапливаются кварц (55,9%) и полевые шпаты (33,5%), выносятся же обладающие высокой плавучестью слюды (11,9%) и устойчивый минерал циркон (см. рис. 2). Донные отложения обогащены ассоциацией минералов с большой плотностью (в %): рудными минералами – 27,8, гранатами – 12,6, эпидотом – 11,7, сфеном – 1,2. Песчаные отложения сложены преимущественно зёрнами кварца, присутствует немного полевых шпатов и мало слюд. В крупных алевритах доля кварца снижается, становится весьма значимым присутствие обломков агрегатов. Рудные минералы и гранаты являются минералами-индикаторами осадконакопления на прибрежных отмелях водохранилищ.

Периодические поступления на прибрежные отмели во время штормов дополнительных порций осадочного материала абразионного происхождения, перемещаемого и сортируемого волнами и течениями, способствуют накоплению широкого спектра элементов в этой зоне осадконакопления. В осадках отмели остаётся в среднем за год (в %): органического вещества – >8, железа – около 12 и фосфора – 17, микроэлементов – 24 (табл. 2). Быстрее из взвешенного потока выпадают Mn, Ni, Cr, Zn, V. Содержание в осадках составляет (в мг/кг): Ni – 44, Cr – 150, Zn – 62, V – 112,

а Mn – 0,81 г/т (см. рис. 2). В отложениях отмели наблюдаются устойчиво повышенные концентрации обладающего малой растворимостью хрома, который явно тяготеет к осадкам с высоким содержанием песчаной фракции и осаждается в составе гранатовых зёрен. Наибольший коэффициент концентрации хрома представлен на урезе и вблизи внешнего края отмели. И далее по профилю у элемента сохраняется связь с песчаной фракцией. В крупных алевритах ведущим является V, резко возрастает содержание Ni и Pb. Крупные алевриты более ожелезнены и более обогащены марганцем по сравнению с песками, в то же время по концентрации органического вещества и фосфора осадки различаются незначительно (см. рис. 2).

На внешнем крае отмели высота слоя отложений периодически уменьшается за счёт гравитационного перемещения материала по *подводному склону* к его подножию, называемому также свалом глубин. Возникновению гравитационного перемещения способствуют высокие скорости накопления осадков на внешнем крае отмели, резкое увеличение уклона, слабоуплотнённое состояние осадков. При воздействии волн нарушается устойчивость материала и его перемещение по подводному склону отмели. Мощность осадков на подводном склоне составляет от 1 до 40 см, а основными типами донных отложений являются крупные алевриты и мелкоалевритовые илы. Содержание алевритовой фракции увеличивается до 43,1%, количество песчаных частиц в осадке является наименьшим по профилю (23,0%) (см. рис. 2). Среднее значение медианного диаметра донных отложений равно 0,041 мм, коэффициент сортированности – 2,83. На подводном склоне в осадках уменьшается количество ведущих на прибрежных отмелях минералов – кварца, роговой обманки. Снижается содержание калишпатов с 22,7 до 15,4% на отмели, ильменит+магнетита – до 20,2%. Здесь выпадает и концентрируется большая часть минералов тяжёлой фракции, особенно заметно повышение количества эпидота (12,4%) и устойчивых минералов – циркона (8,3%), турмалина (1%), рутила (1,5%), являющихся минералами-индикаторами накопления на подводном склоне. Характерным для осадков подводного склона отмели является значимое сокращение содержания элементов, лидирующих в осадках отмели. Особенно заметно уменьшились концентрации (в мг/кг): Sr до 99, Ni – 26, V – 83, а Mn – 0,41 г/т. При этом отмечается определённый рост количества Pb (19 мг/кг), обусловленный его связью с тонкодисперсными осадками. Преобладание в осадках крупноалевритовой фракции способствует активному накоплению органического вещества (9,1%) и некоторому увеличению содержания Fe (2,17%) (см. рис. 2).

Область затопленных террас и русла р. Ангара расположена в пределах действия низкоэнергетических гидродинамических процессов. По литодинамическим условиям затопленные террасы и русло

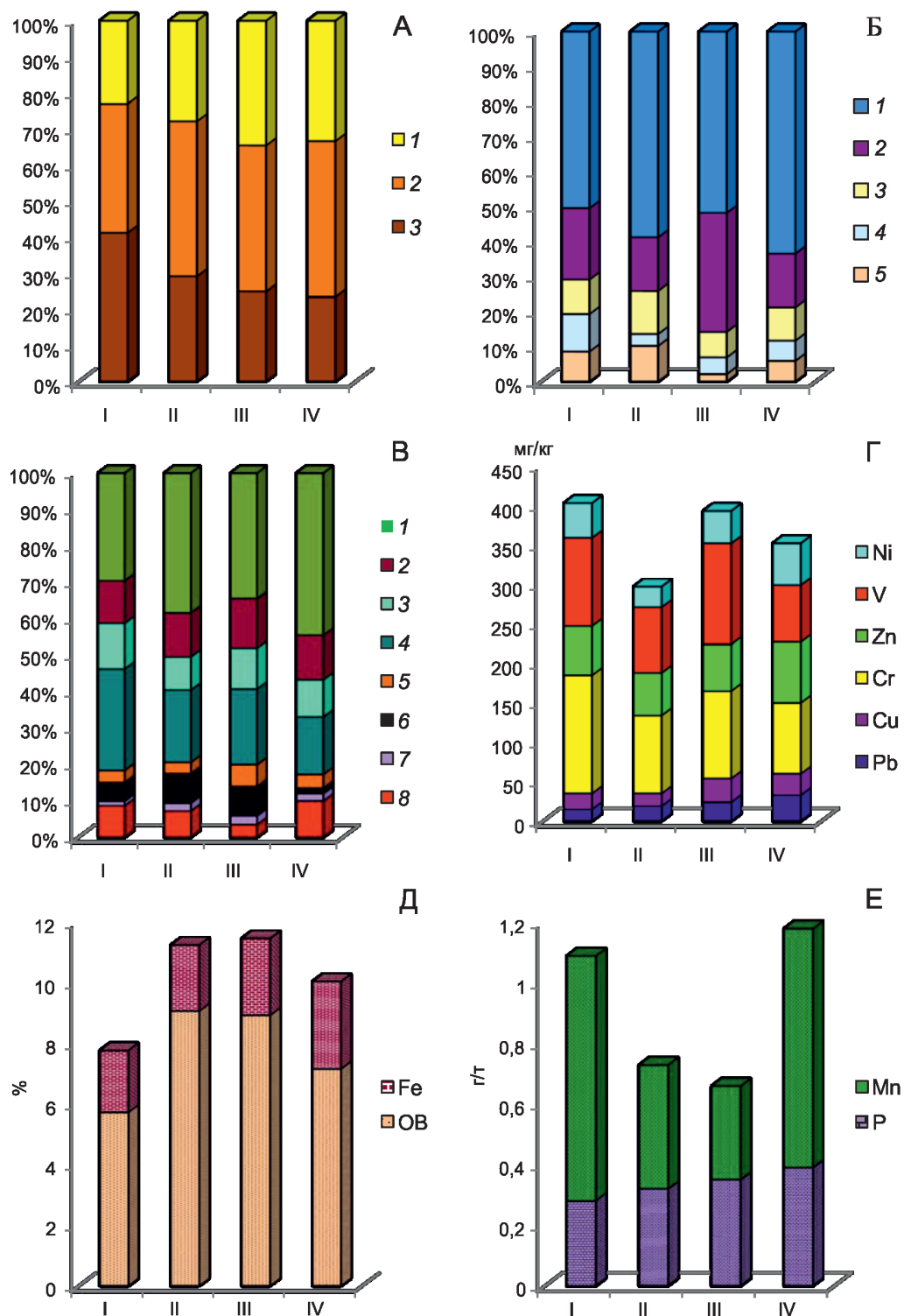


Рис. 2. Состав донных отложений в прибрежной области и области затопленных террас и русла р. Ангара:

прибрежная область: I – прибрежная отмель, II – подводный склон прибрежной отмели; область затопленных террас и русла: III – затопленные террасы, IV – затопленное русло р. Ангара; *фракционный состав*: А – фракции донных осадков (в %): 1 – пелитовая, 2 – алевритовая, 3 – песчаная; *минералогический состав*: Б – минералы лёгкой фракции (в %): 1 – кварц, 2 – калишпаты, 3 – плагиоклазы, 4 – слюды, 5 – обломки пород, агрегаты; В – минералы тяжёлой фракции (в %): 1 – роговая обманка, 2 – эпидот, 3 – гранаты, 4 – рудные (ильменит+магнетит), 5 – пироксены, 6 – циркон, 7 – сфен, 8 – прочие; *геохимический состав*: Г – микроэлементы (в мг/кг), Д – органическое вещество, железо (в %), Е – марганец, фосфор (в г/т)

2. Поступление и удержание осадочного материала и его составляющих в ЛГБЗ

ЛГБЗ «берег–водохранилище»				ЛГБЗ «река–водохранилище»			
Составляющие	Поступление, тыс. т/год	Удержание		Составляющие	Поступление, тыс. т/год	Удержание	
		тыс. т/год	%			тыс. т/год	%
Абразия, в том числе:	224 050	145 632,5	65,0	Речной сток, в том числе:	1 800	1152	64
ОВ	18 163	1 471,2	8,1	ОВ	220	198	90
МЭ	102,0	24,5	24	МЭ	3,5	2,38	68
железо	513,8	11,8	2,3	железо	3,6	2,98	83
фосфор	17,6	3,0	17,0	фосфор	2,0	2,0	100

входят в зону седиментации, недоступную для непосредственного активного воздействия волнового фактора, где скорости течений снижаются иногда до нулевых значений. Миграцию осадочного материала во взвешенном состоянии осуществляют дрейфовые, компенсационные и стоковые течения. Такой скоростной режим благоприятен для агрегирования частиц и осаждения терригенных взвесей и их аккумуляции на почвенном горизонте *затопленных террас*, прикрывающем террасовые фации аллювия. Образующиеся современные донные отложения имеют плохую сортированность (коэффициент сортировки до 4,89). Они представлены в основном крупными алевритами, мелкоалевритовыми и алевритово-глинистыми илами, высота слоя которых может быть в пределах 0,1–14 см. В минеральном составе осадков лидирует лёгкая фракция, содержание кварца в ней составляет 51,8%. В донных осадках затопленных террас, занимающих весьма значительные площади дна водохранилищ, вынесенные за пределы отмелей и их подводных склонов, нестойкие по отношению к истиранию полевые шпаты (41,3%), среди которых преобладают калишпаты (34%), замещают кварц. Ведущий минерал в тяжёлой фракции – роговая обманка (34,4%). Однако её количество уступает содержанию в осадках затопленного русла. Характерным для донных отложений становится комплекс, представленный (в %): эпидотом – 13,7, гранатами – 11,2, сфеном – 2,4 и цирконом – 8,1, при этом происходит сокращение содержания турмалина и рутила (см. рис. 2). С этим комплексом минералов связано повышение в донных осадках Pb и Cu. Для мелкодисперсных осадков свойственно многокомпонентное накопление элементов с ростом их концентрации по сравнению с таковыми осадками прибрежной части водохранилищ. Здесь находится второй максимум содержания микроэлементов, активно накапливающихся в мелкоалевритовых илах, составляя (в мг/кг): Pb – 24, Cu – 30, Cr – 111, Zn – 59, V – 128, Ni – 41. В целом складываются благоприятные условия для осаждения железа, фосфора и органического вещества.

В *затопленном русле* происходит осаждение рассеянного взвешенного материала, перемещаемого слабыми стоковыми течениями, или же при их нулевых значениях – прямое осаждение терригенной взвеси. На русловом аллювии, состоящем из гальки, гравия и песка, формируется комплекс современных донных отложений, представленных крупными алевритами, мелкоалевритовыми и алевритово-глинистыми илами, которые отложились на русловом аллювии или внедрились в него. Медианный диаметр изменяется от 0,008 у алевритово-глинистых илов до 0,369 у песков. Мощность крупных алевритов достигает 1,5–17, мелкоалевритовых илов – 1–25 и алевритово-глинистых илов – 5–10 см. Коэффициент сортированности осадков составляет от 2,28 до 5,00 и выше. В лёгкой фракции донных отложений ведущим минералом является кварц (63,5%). Отмечается значительный рост (на 11,7%) его содержания по сравнению с содержаниями осадков затопленных террас. При этом резко снижается (на 18,7%) количество калишпатов и возрастает насыщенность плагиоклазом (на 2,2%). В осадках затопленного русла понижены содержания эпидота (12,3%), имеющего низкую терригенно-минералогическую миграционную способность, и минералов с высокой плотностью (в %): гранатов – 10,2, циркона – 1,5, рудных минералов – 15,7 [4, 5]. Снижение содержания этих минералов повлекло уменьшение концентрации ванадия с 128 до 72 мг/кг на затопленных террасах. Меньшие, чем у природных водоёмов, размеры водохранилищ позволяют нестойкой роговой обманке перемещаться от питающего источника и концентрироваться в затопленном русле (44,5%) одновременно с осаждением обладающих высокой плавучестью хлорита и биотита, что отразилось в росте концентрации цинка (77 мг/кг). В целом для затопленного русла с его слабой гранулометрической сортированностью осадков характерны низкоконтрастные концентрации микроэлементов (см. рис. 2). В затопленном русле отмечается повышенное содержание обладающего высокой миграционной способностью Fe (2,87%), большая часть которого находится в водохранилищах в карбонатной форме. Значения pH среды и

концентрация кислорода позволяют глинистым минералам сорбировать железо, что выражается в появлении максимума его содержания в мелкоалевритовых и алевритово-глинистых илах затопленного русла [4]. На ведущую роль механического осаждения элементов в составе взвесей указывает и тяготение к этим типам осадков: Mn – 0,79 и P – 0,39 г/т, Ni – 53, Zn – 77 и Pb – 33 мг/кг.

Формирование области «река–водохранилище» связано с прерыванием каскадности между Иркутским и Братским водохранилищами. Протяжённость области составляет более 90 км, площадь – 135 км². В её структуру входят подобласти переменного подпора по р. Ангара и постоянного подпора, представленного Верхнеангарским районом Братского водохранилища [3]. В области «река–водохранилище» происходят процессы активного преобразования осадочного материала, поступающего в составе твёрдого стока р. Ангара и её притоков – рек Иркут, Китой и Белая. В данной области, занимающей 1,8% площади водохранилищ, задерживается около 64% твёрдого речного стока притоков, впадающих в водохранилища (см. табл. 2). Среднегодовая величина поступления осадкообразующего материала составляет более 1,8 млн. т, из которых около 77% приносятся во взвешенном состоянии и 23% – в растворении. Основной вклад (72%) в питание осадочным материалом вносит р. Ангара, притоки же ежегодно поставляют около 0,5 млн. т. Поступивший материал попадает в условия пониженных скоростей потока, в которых способность этого потока транспортировать материал резко сокращается, и поступающий материал создаёт так называемое «первичное тело заиления» типа эстуария. В области «река–водохранилище» удерживается ежегодно (в %): поступающего органического вещества – 90, фосфора – 100, соединений железа – 83 и микроэлементов – 68 (см. табл. 2).

Основные структурные типы донных отложений в области – галька, песок, крупные алевриты, мелкоалевритовые и алевритово-глинистые илы (рис. 3). Распределение донных осадков по длине области происходит в соответствии со скоростным режимом водного потока. Каждый тип осадка занимает определённый участок на дне с наиболее благоприятными для его осаждения гидродинамическими условиями. Одновременно происходит минералогическая и геохимическая дифференциация осадков. При поступлении осадочного материала вначале активно осаждаются минералы с высоким удельным весом в составе песчано-алевритового материала. Здесь находится поле с максимумом содержания тяжёлых минералов в донных осадках водохранилищ Ангарского каскада. По сравнению с водохранилищами донные осадки области наиболее обогащены химическими элементами и их соединениями, максимальным является и содержание эпидота. По степени обособления донных осадков по гранулометрическому, минералогическому и геохимическому составам

область подразделяется на три подзоны.

Верхняя подзона включает участки I, II и III. Скорость течения р. Ангара перед зоной составляет от 1,4 до 2,5 м/с. При поступлении водного потока в верхнюю подзону его скорость снижается от 0,9 до 0,29 м/с, способствуя гравитационному осаждению материала, переносимого водным потоком. При скорости течения 0,9–0,5 м/с происходит аккумуляция гравийно-галечного материала и крупнозернистого песка, при скорости 0,52–0,29 м/с осаждаются тонкозернистые пески. Пески образуют сплошной покров, в котором присутствуют пятна крупных алевритов и мелкоалевритовых илов толщиной до 1–2 см. По минеральному составу тяжёлой фракции донные осадки относятся к амфибол-рудной подпровинции. Для тяжёлой фракции, доля которой составляет 0,7–2,3%, характерны высокие содержания (в %): роговой обманки – 36,4, рудных минералов – 18,2, граната – до 15,6 и эпидота – 12,8 (см. рис. 3). Количество кварца в лёгкой фракции осадков составляет в среднем 60, а полевых шпатов – 17,4%. Кроме того, присутствуют слюды – 12,4 и минеральные агрегаты – 10,2% [7]. Из водного потока в составе осаждающегося материала выводится большая часть приносимых элементов. Наиболее активно в донные осадки переходят свинец, хром, ванадий, железо и органическое вещество. Содержание элементов составляет: Pb – до 80, Cr – 170–180 и V – свыше 130 мг/кг, Fe – 6,8–9,4 и органического вещества – до 10,8%, P – до 2,9 г/кг (см. рис. 3).

Средняя подзона включает участки с IV по VII. Скоростное поле в пределах подзоны, составляя 0,29–0,27 м/с, способствует седиментации крупноалевритового материала, а при скоростях 0,27–0,22 м/с – мелкоалевритовых илов. Наибольшая мощность слоя отложившихся крупных алевритов доходит до 9, местами до 32 см, мелкоалевритовых илов изменяется от 4 до 25 см. По минеральному составу тяжёлой фракции донные осадки относятся к рудно-гранатовой и верхней части амфибол-эпидотовой подпровинций. Донные отложения обогащены минералами лёгкой фракции, составляющей до 90% осадка, основными из которых на участках IV–V являются кварц – около 43 и полевые шпаты – 13,6%. Ниже по подзоне (участки VI–VII) происходит активное выпадение слюд – 24,1 и минеральных агрегатов – 19,3%. Последние состоят в основном из глинистых минералов, представленных гидрослюдой, хлоритом, каолинитом и смектитом. В донных осадках подзоны тяжёлая фракция наиболее разнообразна по набору минералов, к ведущим из которых относятся (в %): рудные (ильменит+магнетит) – 42,7–52,1, гранаты – 18,9–28,9 и эпидот – 13,3–29,5. В пределах подзоны происходит самая активная по барьерной области садка меди, ванадия, никеля. Концентрация элементов в донных осадках составляет (в мг/кг): Cu – 160, V – 130–170, Ni – 120–140, Zn – 120. Количество органического вещества колеблется в

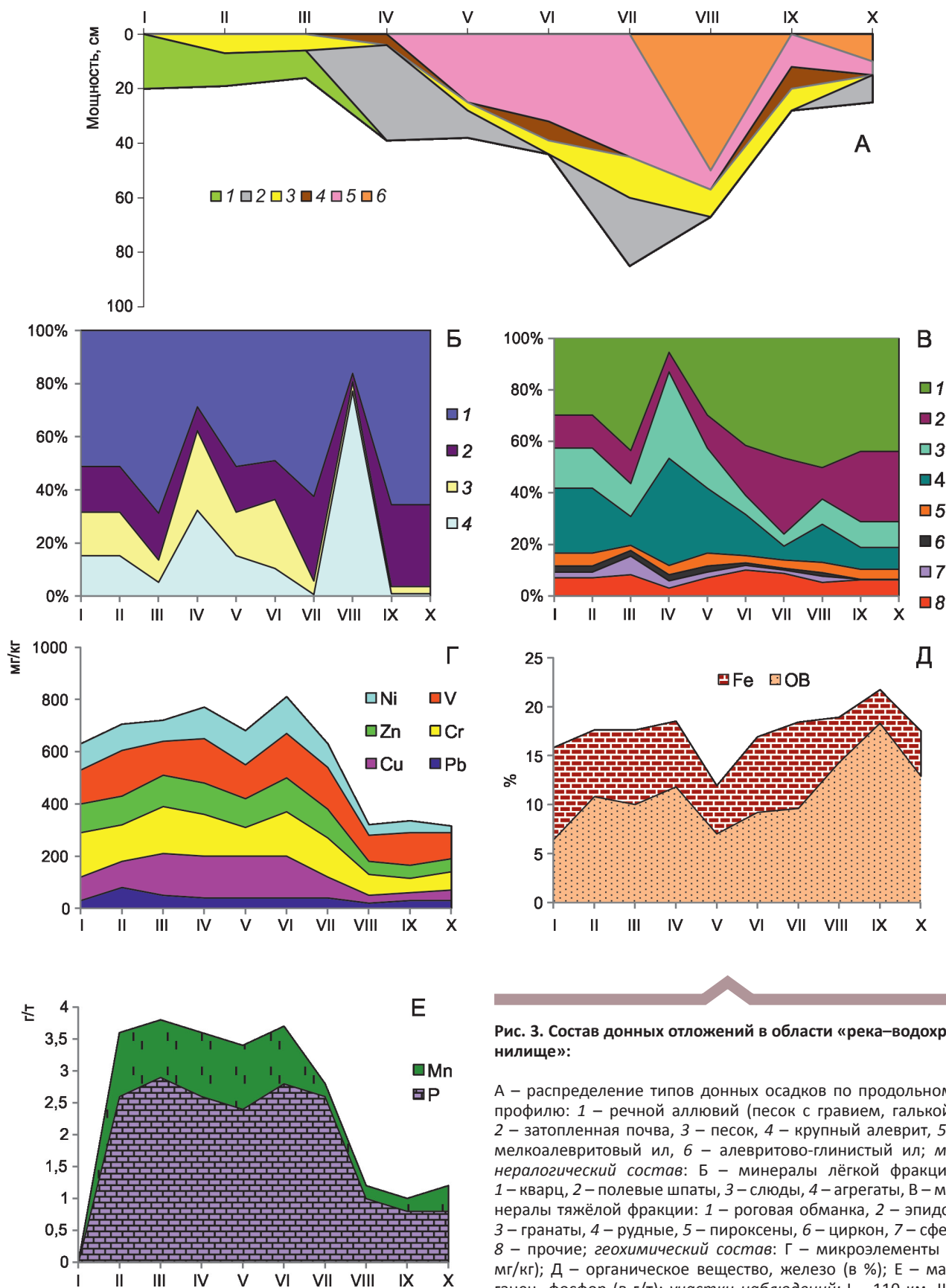


Рис. 3. Состав донных отложений в области «река-водохранилище»:

А – распределение типов донных осадков по продольному профилю: 1 – речной аллювий (песок с гравием, галькой), 2 – затопленная почва, 3 – песок, 4 – крупный алеврит, 5 – мелкоалевритовый ил, 6 – алевритово-глинистый ил; минералогический состав: Б – минералы лёгкой фракции: 1 – кварц, 2 – полевые шпаты, 3 – слюды, 4 – агрегаты, В – минералы тяжёлой фракции: 1 – роговая обманка, 2 – эпидот, 3 – гранаты, 4 – рудные, 5 – пироксены, 6 – циркон, 7 – сфен, 8 – прочие; геохимический состав: Г – микроэлементы (в мг/кг); Д – органическое вещество, железо (в %); Е – марганец, фосфор (в г/т); участки наблюдений: I – 110 км, II – Кулаково, III – Буреть, IV – 125 км, V – 130 км, VI – 135 км, VII – Свирск, VIII – Каменка, IX – Казачье, X – Середино

пределах 7,0–11,8% и примерно соответствует таковому в первой подзоне. Происходит некоторая активизация выпадения фосфора (2,6 г/т) при снижении в осадках количества железа в среднем до 7%.

В нижнюю подзону входят участки с VIII по X. Отмечается дальнейшее снижение транспортирующей скорости водного потока, что является наиболее благоприятным условием для седиментации тонкодисперсных частиц и формирования осадков со значительным содержанием пелитовой фракции. Донные осадки представлены мелкоалевритовыми и алевритово-глинистыми илами. Мощность слоя мелкоалевритовых илов составляет от 4 до 45 см, алевритово-глинистых – 10–50 см. По минеральному составу тяжелой фракции донные осадки относятся к амфибол-эпидотовой подпровинции, для которой характерно самое высокое в зоне содержание минералов тяжелой фракции – 55,1%. Ведущие минералы во фракции – роговая обманка (46,1%), эпидот (24%). В осадках значительно сократилось количество (в %): рудных минералов – 9,3, пироксенов – 3,8, циркона – 0,5, сфена – 1,0. В легкой фракции ведущим является кварц (51,5%), затем полевые шпаты (23,9%). В пределах подзоны особо выделяются донные отложения на участке Каменка, состоящие на 99,9% из минералов легкой фракции с преобладанием в ней глинистых минералов (58,4%) [7]. По сравнению с вышележащими подзонами осадки на участках с VIII по X значительно обеднены элементами. Содержание Pb, Cr, Zn, Ni, P и Fe снизилось в 2 раза, а Cu и Mn в 3–5 раз. В меньшей мере упала концентрация ванадия. При этом произошла активизация осаждения органического вещества (см. рис. 3).

Таким образом, в пределах Ангарских водохранилищ основными обстановками осадконакопления являются три области – прибрежная, затопленных террас и русла р. Ангара, «река–водохранилище», отражающие специфику осадкообразования в этих искусственных водоёмах. Незначительные по площади прибрежная область и область «река–водохранилище» перехватывают основные потоки осадочного материала, что приводит к сосредоточиванию именно здесь наибольших по водохранилищам скоростей осадконакопления. Общий характер преобладания песчаных частиц в осадках прибрежной отмели и господство алевритового материала над пелитовой фракцией в осадках затопленных террас и русла Ангарских водохранилищ имеют сходство с распределением фракций, характерным для осадков оз. Байкал. Донные отложения специфической области «река–водохранилище» являются основными концентраторами химических элементов. В Ангарских

водохранилищах, имеющих по геологическим масштабам незначительный период существования, наряду с фракционной сортировкой отмечены минералогическая и геохимическая дифференциация осадочного материала.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 11-05-00194-а; № 14-05-00079-а; № 18-05-00101-а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аринушкина Е.В. Руководство по химическому анализу почв. – М.: Изд-во МГУ, 1961.
2. Ветров В.А., Кузнецова А.И. Микроэлементы в природных средах региона озера Байкал. – Новосибирск: НИЦ ОИГГМ, 1997.
3. Карнаухова Г.А. Седиментационная система реки Ангара после зарегулирования стока // ДАН. 2007^а. Т. 413. № 4. С. 507–509.
4. Карнаухова Г.А. Литолого-геохимическая дифференциация донных отложений водохранилищ Ангарского каскада // Геохимия. 2007^б. № 4. С. 439–449.
5. Карнаухова Г.А. Поясность осадконакопления в водохранилищах Ангарского каскада // Геохимия. 2011. № 6. С. 634–647.
6. Карнаухова Г.А. Прибрежная зона осадконакопления в ангарских водохранилищах // Изв. ИГУ. Серия «Науки о Земле». 2014. Т. 10. С. 67–77.
7. Карнаухова Г.А., Сквитина Т.М. Обстановки формирования минерального состава донных отложений в барьерной зоне реки Ангара // Литология и полезные ископаемые. 2014. № 2. С. 165–177.
8. Логвиненко Н.В., Сергеева Э.И. Методы определения осадочных пород: Учебное пособие для вузов. – Л.: Недра, 1986.
9. Ломтадзе В.Д. Методы лабораторных исследований физико-химических свойств горных пород. – Л.: Недра, 1972.
10. Метод масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой в применении к элементному составу глубоководной байкальской воды / В.Н.Эпов, Е.Н.Эпова, А.Н.Сутурин, А.Р.Семенов // Аналитика и контроль. 2000. № 4(2). С. 202–208.
11. Методы палеогеографических реконструкций (при поисках залежей нефти и газа) / В.А.Гроссгейм, О.В.Бескровная, И.Л.Герасченко и др. – Л.: Недра, 1984.
12. Новиков Ю.В., Ласточкина К.О., Болдина З.Н. Методы исследования качества воды водоемов. – М.: Медицина, 1990.
13. Унифицированные методы анализа вод / Под ред. Ю.Ю.Лурье. – М.: Наука, 1973.
14. Шапов Г.И. Речные наносы. – М.: Гидрометеиздат, 1959.

О полихронном местонахождении плейстоценовых млекопитающих на северо-западном побережье оз. Байкал

Н.П.КАЛМЫКОВ (Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук» (ЮНЦ РАН); 344006, Ростов-на-Дону, проспект Чехова, д. 41)

В статье приводится обоснование возраста отложений на северо-западном побережье оз. Байкал, где обнаружено единственное полихронное местонахождение ископаемых млекопитающих, в том числе почти полные скелеты *Mammuthus*, *Coelodonta*, *Bison*. Геохронологические данные, полученные в последние годы, подтвердили не только ранее сделанные выводы о времени аккумуляции осадков 60–80-метровой озёрной террасы, но и показали на разновременность захоронений скелетов в устье р. Тья.

Ключевые слова: млекопитающие, *Mammuthus*, *Coelodonta*, *Bison*, плейстоцен, озеро Байкал.

Калмыков Николай Петрович
доктор географических наук



kalm@ssc-ras.ru

The polychronic location of Pleistocene mammals on the northwestern coast of Lake Baikal

N.P.KALMYKOV (Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences)

The article validates the age of sediments on the northwestern shore of Lake Baikal, where the only polychronic location of fossil mammals, including the almost complete skeletons of *Mammuthus*, *Coelodonta*, *Bison*, was found. The geochronological data obtained in recent years confirmed not only the earlier conclusions about the time of precipitation accumulation in the 60–80-meter lake terrace, but also showed the simultaneous burial of skeletons at the mouth of the Tyia river.

Key words: mammals, *Mammuthus*, *Bison*, *Coelodonta*, Pleistocene, Lake Baikal.

Байкальская впадина в современном рельефе юга Восточной Сибири – уникальный озёрный и седиментационный бассейн, зафиксировавший в себе и своём обрамлении неповторимую информацию об эволюции природной среды и климата в Центральной Азии за последние 65 млн. лет. Своеобразие природных условий в её обрамлении обусловлено характером горообразовательных процессов, среди которых немаловажную роль играют разной интенсивности тектонические движения, сейсмичность, рифтогенез. Северо-западное побережье оз. Байкал не стало исключением, где в приустьевой части р. Тья, берущей начало из озера Верховье Тьи на Северо-Байкальском нагорье, были описаны комплексы озёрных и озёрно-речных террас [4]. Тья в переводе с тунгусского означает «могила, собачье место». Этот террасовый комплекс до сих пор вызывает повышенный интерес [6, 12, 23]. Здесь было обнаружено не только одно из интереснейших местонахождений плейстоценовых млекопитающих в Байкальской горной стране,

но и ряд археологических памятников [25], расположенных на северо-восточной окраине дельты. Возраст большинства исследованных стоянок не выходит за рамки позднесартанского времени. В основу данной публикации положены результаты не только геологических, геоморфологических, палеонтологических исследований в устье р. Тья, но и термолюминесцентного анализа. В ней впервые идёт речь об обнаружении на северо-западном побережье озера почти полных единичных скелетов крупных представителей фауны млекопитающих: мамонта (*Mammuthus primigenius* Blum., 1799) в 1978 г., первобытного бизона (*Bison priscus* Boj., 1827) в 1979 г. и шерстистого носорога (*Coelodonta antiquitatis* Blum., 1799) в 1982 г. Эти находки дают полное право предполагать, что отложения 60–80-метровой [4, 14], по другим источникам, 50–60-метровой [7], 50–80-метровой [6] озёрной террасы содержат или могут вмещать скелеты не только этих, но, возможно, и других видов млекопитающих.

Геоморфологическая обстановка на северо-западном побережье оз. Байкал в устье р. Тья. Дельта реки представляет собой сложную форму мезорельефа, состоящую из разновозрастных аккумулятивных образований различного генезиса: речного, озёрно-речного, селевого, пролювиально-делювиального. Русло разделяет её на две части – лево- и правобережную, – формируя по внешнему краю современную дельту высотой 0,5–1,0 м [6]. Северо-восточнее от реки прослеживается морфологически хорошо выраженный прямолинейный крутой уступ высотой 30–35 м, поверхность которого слегка всхолмлена. В его верхней части между мысом Курла и р. Тья вскрыты хорошо окатанные галечно-валунные отложения с разнотекстурным грубым песком, мощность которых достигает 10–12 м. Ниже залегают переслаивающиеся линзы и небольшие прослои косослоистых песков. Отложения по литолого-фациальным признакам подразделяются на аллювиально-пролювиальные осадки р. Тья верхней части разреза, сложенной грубокластическим материалом, и озёрные осадки, лежащие в его основании и сформированные в зоне прибрежного мелководья в условиях слабого течения Тьи, впадавшей в озеро. В направлении склона байкальской впадины уступ переходит в более высокий уровень, в поверхность 60–80- или 50–80-метровой террасы оз. Байкал, прослеживающейся по левобережью Тьи и наклонённой в сторону озера и реки.

В карьере левобережной части дельты, где добывался песок для строительства инфраструктуры будущей столицы Бурятского участка Байкало-Амурской магистрали (БАМ) – г. Северобайкальск, в 1978 г. работниками треста «Нижнеангарсктрансстрой» было обнаружено захоронение крупных млекопитающих, в том числе почти полный скелет мамонта (рис. 1). В настоящее время основная его часть находится в фондах Музея природы Бурятии (г. Улан-Удэ) [15]. Морфологические особенности остеологического материала и видовой состав териофауны позволили в то время предварительно определить возраст вмещающих отложений верхней части 60–80-метровой террасы средним и началом позднего плейстоцена [4], возраст вмещающих отложений ещё не был апробирован методами абсолютной геохронологии. Исключение составляли только археологические памятники сартанского времени на северо-восточной окраине дельты [25] и делювиальные шлейфы (СОАН-1397 и СОАН-1396: 24060 ± 5700 и 15200 ± 1250 лет назад) [10], в которых иногда содержались окаменелости млекопитающих позднеледникового мамонтового фаунистического комплекса. Особенности морфологии костей посткраниального скелета носорога (*C. antiquitatis*) и бизона (*B. priscus*), а также результаты термолюминесцентного и радиоуглеродного анализов последних лет [6, 23, 24] не только подтвердили выводы, сделанные ранее, но и указали на разновременность захоронений скелетов ископаемых

млекопитающих в устье р. Тья. В настоящее время это единственный участок на всём протяжении БАМа, где в одном месте обнаружены разновозрастные ориктоценозы представителей мамонтового фаунистического комплекса, принадлежащих различным видам отрядов Proboscidea, Perissodactyla, Artiodactyla.

Строение 60–80-метровой озёрной террасы оз. Байкал и время накопления её отложений. В карьере на северной окраине г. Северобайкальск в приустьевой части широкого распадка были вскрыты полигенетические отложения [4], представленные крупнообломочным коллювием, аллювиальными и озёрными песками, делювиально-пролювиальными супесями. В нижней части разреза песчаной толщи на глубине 9–9,5 м от дневной поверхности залегал валунно-глыбовый материал со щебнисто-песчаным заполнителем, у основания которого располагались глыбы горных пород, свидетельствующие о близости крутого коренного склона. Результаты термолюминесцентного анализа песков из низов песчаной толщи показали, что её формирование началось более 450 тыс. лет назад (ГИН СО РАН-359) [6], то есть в первой половине среднего плейстоцена до так называемого самаровского оледенения (250–170 тыс. лет назад) стратиграфической схемы четвертичных отложений Западной Сибири или днепровского оледенения Восточно-Европейской равнины.

Выше в песках верхней части толщи были найдены кости *Canis* sp., *Mammuthus primigenius*, *Equus caballus* subsp., L., 1758 (= *E. latipes* cf. *orientalis* Russ., 1968; = *E. aff. beijingensis* Liu, 1963), *C. antiquitatis*, *Cervus elaphus* L., 1758, *Capreolus capreolus* L., 1758, *B. priscus* [14]. Зубы северобайкальского мамонта отличались меньшей частотой эмалевых пластин и более толстой эмалью на зубах, чем у типичных поздних форм. Эти признаки, по мнению Л.Н.Иваньева [7], свидетельствуют о принадлежности их раннему мамонту. Нахождение окаменелостей вышеприведённых животных, населявших северо-западное побережье оз. Байкал, дало возможность определить время аккумуляции вмещающих их отложений как заключительную фазу среднего плейстоцена. Впоследствии время аккумуляции этих песков было подтверждено результатами РТЛ-датирования: $154\,000 \pm 23\,500$ лет назад (ГИН СО РАН-358) [6]. Накопление осадков этой части толщи происходило во второй половине среднего или в конце среднего плейстоцена [4], а абсолютная датировка дала основание Р.Ц.Будаеву [6] соотнести время её формирования с тазовским оледенением Западной Сибири, которое соответствует шестой морской изотопной стадии (MIS 6) [19]. Необходимо отметить, что тазовский ледниковый горизонт (170–125 тыс. лет назад) в своё время был скопирован с московского горизонта центральной России [3]. Самостоятельность последнего из-за отсутствия литологических и палеонтологических доказательств межледникового климата между днепровским и московским ледниковыми горизонтами не

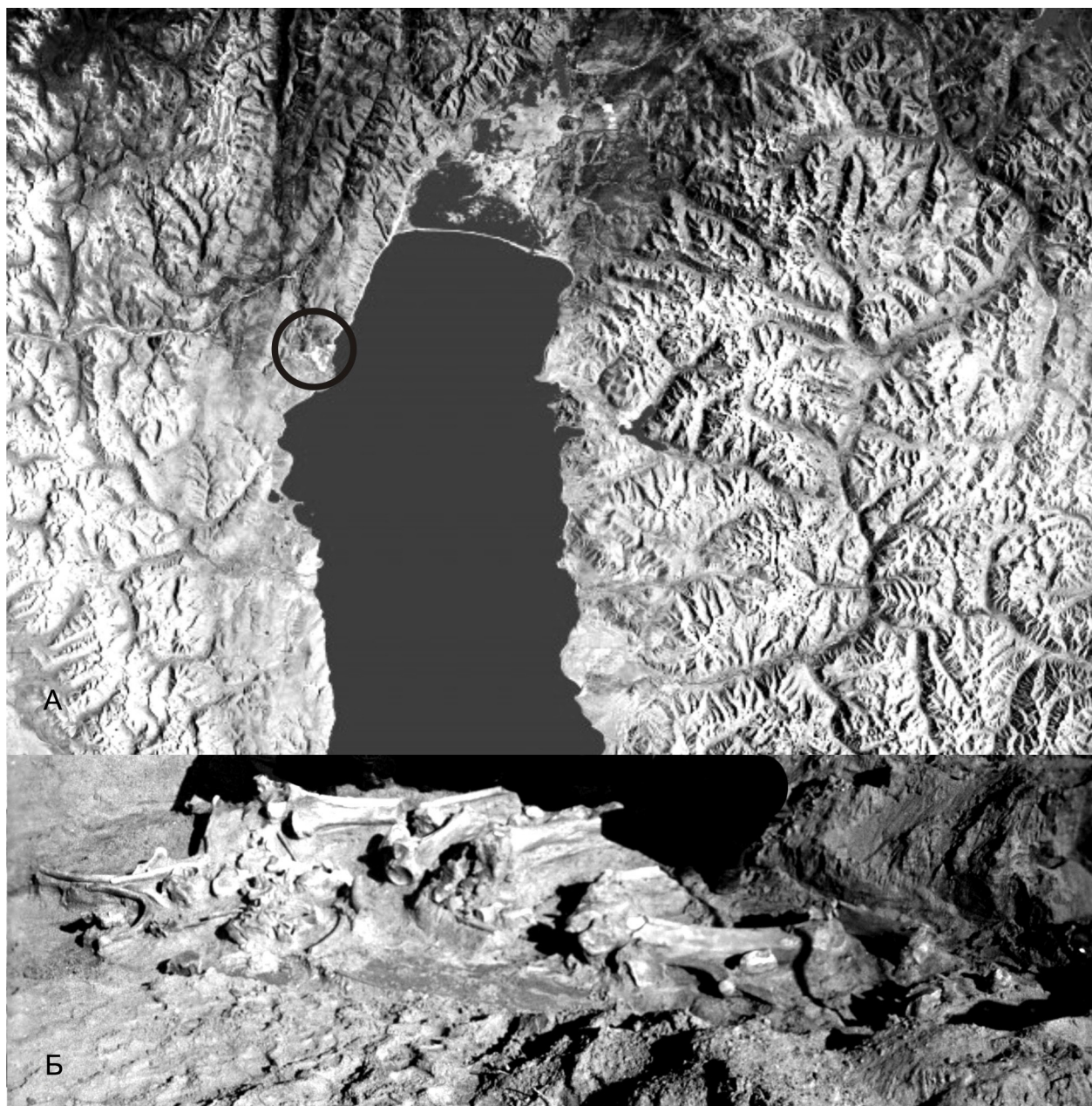


Рис. 1. Раскопки скелета мамонта (*Mammuthus primigenius*) в местонахождении Северобайкальск на северо-западном побережье оз. Байкал, 1978:

А – район исследований; Б – захоронение скелета мамонта

была бесспорна. На явную недостаточность «данных для выделения тазовского оледенения или тазовской стадии по унифицированной стратиграфической схеме 1956 г.» в Западной Сибири ещё в прошлом веке указывала Ж.М.Белорусова: «Нигде на Тазовском п-ове при проведении планомерной геологической съёмки (в масштабе 1:1 000 000) соответствующие отложения не

обнаружены» [5, с. 97]. Несколько позже в обрамлении оз. Байкал, где при геологической съёмке использовались хроностратиграфические таксоны унифицированной стратиграфической схемы Западной Сибири, выделение не только тазовского, но и зырянского, сартанского ледниковых горизонтов стало также считаться совершенно недопустимым [9], что подтверждается и

новейшими исследованиями [12]. В Западной Сибири изыскания последних лет показали, что «каких-либо верхнелепестовых образований, похожих на ледниковые, не обнаружено с поверхности ни в нижнем течении Оби, ни на Тазовском полуострове» [3, с. 20]. По-видимому, проблема не в присвоенных хроностратиграфическим таксонам названиях, призванных «служить общим языком геологов» [2, с. 1208], а в хронологической привязке. Песчаная толща в устье р. Тья выше отложений с фоссилиями названных млекопитающих была сложена переслаивающимися серыми мелкозернистыми, светло-коричневыми тонко- и мелкозернистыми песками с рассеянной дресвой, маломощными линзами и прослоями дресвы и щебня, которые, в свою очередь, постепенно переходили в почвенно-растительный покров.

К западу от места захоронения скелета мамонта (*M. primigenius*) и других млекопитающих в разрезе террасы обнажались переслаивающиеся серые мелкозернистые, серовато-коричневые тонко-, мелкозернистые и серо-коричневые средне-, мелкозернистые слабожелезненные пески мощностью до 6 м. За счёт чередования песков разного гранулометрического состава и окраски слоистость была ясно выражена. На верхней границе вечной мерзлоты автором были обнаружены многочисленные кости посткраниума одной особи шерстистого носорога – *Coelodonta antiquitatis* (рис. 2). Они залегали в зоне вечной мерзлоты (раскопки проводились в летний период), что подтверждает цвет их поверхностей. Поверхности, обращённые к ней, – белого цвета, находящиеся за её пределами, – тёмно- или светло-коричневого. Пробы песков, отобранные для термолюминесцентного анализа, показали, что их аккумуляция происходила 76 000±14 000 лет назад (ГИН СО РАН-357) [6]. Эта дата свидетельствует о том, что шерстистый носорог на северо-западном побережье оз. Байкал обитал в период так называемого казанцевского межледникового первой половины позднего плейстоцена, принятого для унифицированной стратиграфической схемы четвертичного периода Западной Сибири. Казанцевский горизонт, в свою очередь, сопоставляется с MIS 5, несмотря на то, что для такой корреляции не приведено, как в случае с тазовским, ни одного другого доказательства, кроме одной абсолютной датировки в рамках всего объёма MIS 5.

В некотором удалении на северо-восток от места захоронения скелета мамонта и его спутников выше в стенке карьера обнажались серые мелко- и среднезернистые пески с незначительным содержанием рассеянной дресвы, маломощными линзами дресвяно-мелкощебнистых отложений. В песках прослеживались многочисленные слои естественных шлифов, подчёркивающих их горизонтальную частоту. В их верхней части встречались фрагменты погребённой почвы, из которых был выделен спорово-пыльцевой спектр, частично отражающий состав травянистого покрова:

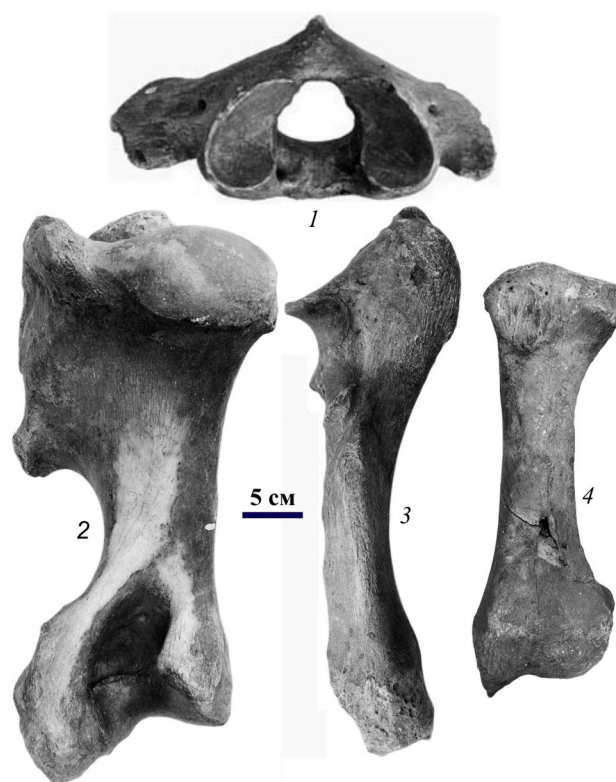


Рис. 2. Отдельные кости скелета шерстистого носорога (*Coelodonta antiquitatis*) из местонахождения Северобайкальск (Северное Прибайкалье):

1 – атлант; кости: 2 – плечевая, 3 – локтевая, 4 – лучевая

Chenopodiaceae, Compositae, Ranunculaceae, Gramineae, Polypodiaceae, Sparganaceae, *Artemisia*, *Sphagnum* [4]. В них были найдены остатки млекопитающих позднелепестового комплекса фауны [13]: лошади (*Equus lenensis* Russ., 1968), шерстистого носорога (*C. antiquitatis*) и большая часть скелета одной особи бизона – *Bison priscus* (рис. 3). Полная облитерация швов на костях, их размеры, целый ряд постоянных зубов нижней челюсти, степень их стирания, короткие рога (череп хранится в Музее природы Бурятии, г. Улан-Удэ) указывают на то, что они принадлежали взрослой самке бизона. Это пока первая находка наиболее полного скелета такого животного в горном обрамлении оз. Байкал. Судя по радиоуглеродной дате по кости из недалеко вскрытых палево-серых песков на уровне погребённых почв, их накопление происходило 38 010±535 лет назад (СО АН-5935) [23]. Если эта дата верна, то можно предполагать, что указанные млекопитающие из завершающей части 60–80-метровой

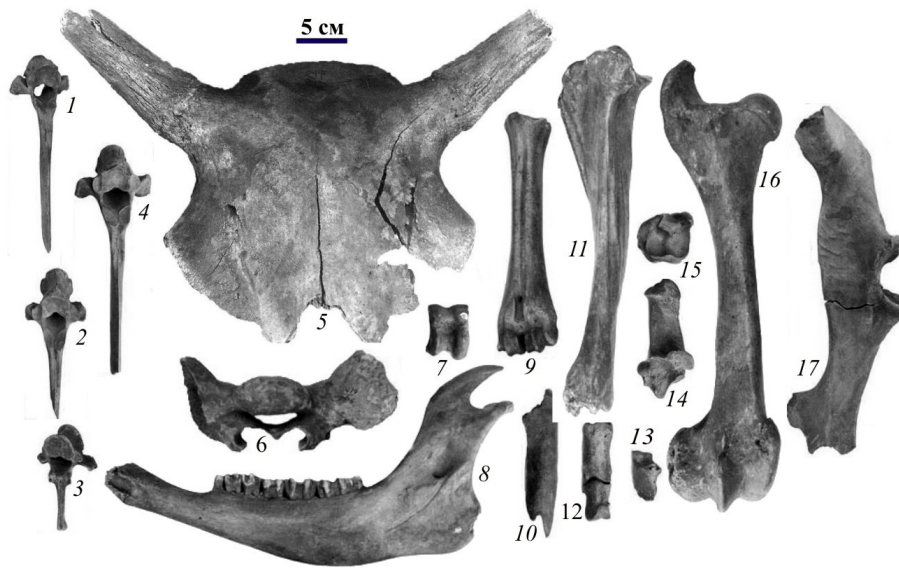


Рис. 3. Часть скелета бизона (*Bison priscus*) из местонахождения Северобайкальск (Северное Прибайкалье):

1–4 – отдельные позвонки; 5 – череп; 6 – позвонок крестца; 7 – таранная кость; 8 – нижняя челюсть; кости: 9 – плюсневая, 10 – носовая, 11 – большая берцовая; 12 – первая, вторая и 13 – третья фаланги; кости: 14 – пяточная, 15 – центральная предплюсневая, 16 – бедренная, 17 – тазовая

песчаной террасы оз. Байкал обитали во второй половине позднего плейстоцена, что соответствует каргинскому термохрону унифицированной стратиграфической схемы четвертичного периода Западной Сибири [6], или MIS 3.

Из вышеизложенного следует, что в устье р. Тья отложения верхней части высокого аккумулятивного уровня, представляющего в современном рельефе террасу высотой 60–80 м, накапливались во второй половине среднего и позднем плейстоцене. Если абсолютные даты действительны, то в течение этого времени (тазовский криохрон, казанцевский и каргинский термохроны, сартанский криохрон) северо-западное побережье оз. Байкал, как всё его обрамление, населяли типичные плейстоценовые млекопитающие – мамонт (*M. primigenius*) и его спутники: *Canis*, *Equus*, *Coelodonta*, *Cervus*, *Bison* и другие [24]. В обрамлении оз. Байкал они обитали в позднем плейстоцене во время так называемых тазовского оледенения, казанского и каргинского межледниковий, сартанского оледенения, имевшего, как и другие гляциалы, локальный, высокогорный или ближе к верхней границе среднегорья характер. Млекопитающие позднеледникового фаунистического комплекса были распространены в течение длительного времени, на них не оказывали какого-либо влияния гляциалы и межледниковия, выделенные для Западной Сибири. Фауна от этапа к этапу, не имевших определённых границ, представляла собой картину много-

векового взаимодействия различных таксонов, которые вполне можно датировать различными этапами плейстоцена. Все климатические колебания в позднем плейстоцене (и не только в нём) находились в пределах общего похолодания. Оно сопровождалось проникновением бореальных, аллохтонных родов, которые не могли компенсировать биологическое разнообразие предыдущих эпох, но впоследствии заняли доминантное положение в обеднённой биоте. Её трансформация в большей степени представляла плавный переход от одного состояния к другому и не отражала каких-либо кардинальных перестроек в своей структуре [12]. Природные условия менялись не так внезапно, чтобы те или иные виды исчезли сразу же после таких изменений и вследствие именно их.

В плейстоцене эволюция Байкальской рифтовой зоны была сопряжена с рядом тектонических фаз (ТФ) [17], одной из них являлась тийская ТФ, выявленная по разрыву и смещению на высоту около 200 м отложений 80-метровой байкальской террасы ступенчатым разломом Байкальской впадины [18] и имевшая место в среднем и позднем плейстоцене. Такой возраст подтверждает приведённое полихронное захоронение ископаемых млекопитающих из отложений 60–80-метровой террасы на северо-западном побережье оз. Байкал. В течение данного времени эта молодая, значительная по амплитуде тектонофаза вызвала поднятие его плеч и опускание дна впадины, в результате чего дно

Байкала опустилось до современных глубин и его горное обрамление приняло нынешний облик. Его формирование сопровождалось проникновением аллохтонных и выпадением автохтонных элементов из териофауны северо-западного побережья, занявших не одну сотню тысяч лет. В позднем плейстоцене на берегу озера появился древний человек, впоследствии оказавший негативное воздействие на биоту [24]. Из состава фауны выпали *M. primigenius* и шерстистый носорог, главенствующая роль перешла к их спутникам – *Canis lupus* L., 1758, *Vulpes vulpes* L., 1758, *Ursus arctos* L., 1758, *Cervus elaphus* L., 1758, *Capreolus capreolus* L., 1758, *Alces alces* L., 1758, *Rangifer tarandus* L., 1758. [13], стратиграфическое распространение которых достаточно широкое, оно охватывает почти все этапы плейстоцена. Позже её разнообразие расширилось за счёт ныне живущих *Sorex minutus* Linnaeus, 1766, *Myotis brandtii* (Eversmann, 1845), *Eptesicus nilssonii* (Keyserling et Blasius, 1839), *Lepus timidus* Linnaeus, 1758, *Ochotona hyperborea* (Pallas, 1811), *Sciurus vulgaris* Linnaeus, 1758, *Pteromys volans* (Linnaeus, 1758), *Tamias sibiricus* (Laxmann, 1769), *Marmota camtschatica* (Pallas, 1811), *Alticola lemmings* (Miller, 1899), *Clethrionomys rufocanus* (Sundevall, 1846), *Myopus schisticolor* (Lilljeborg, 1884), *Microtus gregalis* (Pallas, 1779), *Martes zibellina* (Linnaeus, 1758), *Gulo gulo* (Linnaeus, 1758), *Mustela nivalis* Linnaeus, 1766, *Meles leucurus* (Hodgson, 1847), *Lutra lutra* (Linnaeus, 1758), *Lynx lynx* (Linnaeus, 1758), *Moschus moschiferus* Linnaeus, 1758 и др. [22]. Не исключено, что они были распространены в Северном Прибайкалье и ранее, однако их ископаемые остатки пока не обнаружены в связи с недостаточной геологической изученностью.

В заключение отметим, что проблемы стратиграфии плейстоцена на юге Восточной Сибири связаны не только со слабой изученностью этой огромной территории, но и с пренебрежительным отношением к Стратиграфическому кодексу, что привело к номенклатурному кризису. В качестве наглядного примера можно привести каргинский и сартанский горизонты [3], лишённые стратотипов, то есть какой-либо опоры для обсуждения новых данных и пересмотра старых. Продолжающееся употребление терминов схемы В.Н.Сакса, принятых в Западной Сибири для плейстоцена, практически накладывает вето на создание региональной биостратиграфической схемы Восточной Сибири с привлечением многочисленных новых стратифицированных палеонтологических находок. Другая ошибка – выбор не всегда обоснованных геохронометрических данных, вместо экосистемной стратиграфии. Они не в состоянии заменить совокупность литологических, седиментологических и палеонтологических методов построения региональных и местных стратиграфических шкал четвертичных отложений, в частности, Восточной Сибири. Приведённые данные подтверждают ранее сделанные выводы

[9–11]: представления о покровных плейстоценовых оледенениях Байкальской горной страны (и других областей) основаны не только на ошибочном определении генезиса грубообломочных отложений и преувеличении следов горного оледенения [1, 11, 16], но и на отсутствии стратотипов [3] и покровного оледенения. Полихронные захоронения мегафауны в устье р. Тья и исключение Байкальской горной страны из области покровных оледенений [8] являются ярким тому подтверждением. Несмотря на то, что в настоящее время одним из крупных центров покровного оледенения некоторыми исследователями признаются горы плоскогорья Путорана, степень его самостоятельности и возраст до сих пор не установлены [8, 20]. «В существующих реконструкциях сартанский комплекс Путораны почти всегда изображён как обособленный, самостоятельный ледниковый покров», в «горах развивались лишь ограниченные по размерам долинные ледники» [8, с. 65].

Покровных оледенений, соответствующих европейским, в Восточной Сибири не существовало [21]. Из этого утверждения следует, что нет никаких оснований связывать холодные эпохи в плейстоцене юга Восточной Сибири с оледенениями. Каждое последующее похолодание было интенсивнее предыдущего, а каждое новое потепление климата (так называемое межледниковье) было слабее предыдущего. Геологические и палеонтологические данные говорят об общем продолжающемся похолодании климата в раннем и среднем плейстоцене [12], приведшем в конце плейстоцена к развитию локальных горно-долинных ледников, реликты которых встречаются на Баргузинском, Байкальском хребтах, Восточном Саяне.

Публикация подготовлена в рамках реализации ГЗ ЮНЦ РАН на 2018 г., № гр. проекта 01201363186.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агафонов Б.П. Эколитодинамика Байкальской рифтовой зоны. – Новосибирск: Наука, Сибирское отделение, 1990.
2. Астахов В.И. Хроностратиграфические подразделения верхнего плейстоцена Сибири // Геология и геофизика. 2006. Т. 47. № 11. С. 1207–1220.
3. Астахов В.И. Средний и поздний неоплейстоцен ледниковой зоны Западной Сибири: проблемы стратиграфии и палеогеографии // Бюллетень Комиссии по изучению четвертичного периода РАН. 2009. № 69. С. 8–24.
4. Базаров Д.Б., Будаев Р.Ц., Калмыков Н.П. О возрасте плейстоценовых террас северо-западного побережья оз. Байкал // Поздний плейстоцен и голоцен юга Восточной Сибири. – Новосибирск: Наука, Сибирское отделение, 1982. С. 155–158.
5. Белорусова Ж.М. Было ли покровное оледенение на Тазовском полуострове? // Геология и геохимия. 1960. Вып. 3 (IX). С. 95–101.

6. Будаев Р.Ц. Палеоуровни вод Северо-Байкальской впадины в эпохи неоплейстоценовых оледенений // География и природные ресурсы. 2011. № 2. С. 62–69.
7. Геоморфология Северного Прибайкалья и Станового нагорья / Д.-Д.Б.Базаров, И.Н.Резанов, Р.Ц.Будаев и др. – М.: Наука, 1981.
8. Гросвальд М.Г. Оледенение Русского Севера и Северо-Востока в эпоху последнего великого похолодания // Материалы гляциологических исследований. 2009. Вып. 106. С. 4–149.
9. Ендрихинский А.С. Развитие речной сети Станового нагорья в позднем кайнозое // Рельеф и четвертичные отложения Станового нагорья. – М.: Наука, 1981. С. 135–166.
10. Ендрихинский А.С. Последовательность основных геологических событий на территории Южной Сибири в позднем плейстоцене и голоцене // Поздний плейстоцен и голоцен юга Восточной Сибири. – Новосибирск: Наука, Сибирское отделение, 1982. С. 6–35.
11. Ивановский Л.Н. Основные вопросы древнего оледенения Прибайкалья // География и природные ресурсы. 1993. № 3. С. 148–155.
12. Калмыков Н.П. Биомы горного обрамления озера Байкал в кайнозое // Байкальский зоологический журнал. 2017. № 1(20). С. 5–17.
13. Калмыков Н.П. Палеогеография и эволюция биоценологического покрова в бассейне оз. Байкал. – Ростов-на-Дону: Изд-во РГУ, 2003.
14. Калмыков Н.П. Фауна крупных млекопитающих плейстоцена Прибайкалья и Западного Забайкалья. – Улан-Удэ: БНЦ СО РАН, 1990.
15. Калмыков Н.П., Пискунов А.С., Хандуева В.Б. Ископаемые млекопитающие Музея природы Бурятии (систематика, распространение, экология). – Улан-Удэ: БНЦ СО АН СССР, 1992.
16. Макаров С.А. Сели Прибайкалья. – Иркутск: Изд-во института географии им. В.Б.Сочавы СО РАН, 2012.
17. Мац В.Д. Возраст и геодинамическая природа осадочного выполнения Байкальского рифта // Геология и геофизика. 2012. Т. 53. № 9. С. 1219–1244.
18. Мац В.Д., Ефимова И.М. Морфоструктура западного поднятого плеча Байкальского рифта // Геоморфология. 2010. № 1. С. 67–76.
19. Оледенения и межледниковья Сибири – палеоклиматическая запись из озера Байкал и её корреляция с западно-сибирской стратиграфией (эпоха прямой полярности Брюнес) / Е.Б.Карабанов, А.А.Прокопенко, М.И.Кузьмин и др. // Геология и геофизика. 2001. Т. 42. № 1–2. С. 48–63.
20. Палеоклиматы и палеоландшафты внутропического пространства Северного полушария (поздний плейстоцен–голоцен). Атлас-монография / Под ред. проф. А.А.Величко. – М., 2009.
21. Разрез новейших отложений Мамонтова Гора / А.К.Агаджанян, Т.Д.Боярская, Н.И.Глушанкова и др. – М.: Изд-во МГУ, 1973.
22. Фауна и экология млекопитающих Забайкалья / Н.Г.Борисова, А.В.Абрамов, А.И.Старков и др. // Труды ЗИН РАН. 2001. Т. 288. С. 3–95.
23. Фаунистические остатки Байкало-Патомского нагорья и прилегающих территорий (по вымершим видам крупных млекопитающих) / Е.М.Инешин, А.М.Клементьев, Л.Д.Сулержицкий, Л.А.Орлова // Известия Лаборатории древних технологий ИргТУ. 2005. Вып. 5. С. 49–59.
24. Хронология позднеплейстоценовой мегафауны юга Восточной Сибири / Л.А.Орлова, Я.В.Кузьмин, Н.П.Калмыков, Дж.С.Бурр // Позднекайнозойская геологическая история севера аридной зоны: материалы международ. симпозиума (Ростов-на-Дону–Азов, 26–29 сентября 2006 г.). – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮНЦ РАН, 2006. С. 238–242.
25. Шмыгун П.Е. Докерамические комплексы из четвертичных отложений Северного Байкала // Рельеф и четвертичные отложения Станового нагорья. – М.: Наука, 1981. С. 120–128.

Краткий очерк основ металлогении

Е.И.ФИЛАТОВ, Л.К.ФИЛАТОВА (Федеральное государственное бюджетное учреждение «Центральный научно-исследовательский геологоразведочный институт цветных и благородных металлов» (ФГБУ «ЦНИГРИ»); 117545, г. Москва, Варшавское шоссе, д. 129, корп. 1)

Кратко рассмотрены пять вопросов: исторические основы металлогении, современная металлогения, категории металлогении и металлогенические обстановки, эволюция рудообразования в геологической истории, Металлогенический (Минерагенический) кодекс.

В 1906 г. Луи де Лоне подчеркнул важность и необходимость изучения связей минеральных месторождений с региональной геологией и тектоникой. Впоследствии многие исследователи придавали этому термину своё толкование. Современная металлогения подразделяется на теоретическую и прикладную и отличается от исторической анализом месторождений полезных ископаемых и составляемых ими более крупных минерагенических площадей в пространстве и времени. Теоретическая металлогения изучает рудообразующие процессы путём создания их моделей, прикладная – включает металлогенический анализ, региональный и локальный прогнозы с количественной оценкой прогнозных ресурсов изучаемых площадей. *Ключевые слова:* металлогения, минерагения, металлогенический анализ, металлогенические категории (зоны, системы, пояса), оруденение, геологическая и рудная формация, прогнозирование, рудоносная площадь.

Филатов Евгений Иванович
доктор геолого-минералогических наук



filatova.lk@mail.ru

Филатова Людмила Константиновна
кандидат геолого-минералогических наук

A brief outline of metallogeny basics

E.I.FILATOV, L.K.FILATOVA (Central Research Institute of Geological Prospecting for Base and Precious Metals)

Five issues are briefly considered: Historical basics of metallogeny; Modern metallogeny; Categories of metallogeny, Metallogenic conditions; Evolution of ore formation in geological history; Metallogenic (Mineragenic) code.

In 1906, L. de Lone stressed the importance and necessity of studying the relations of mineral deposits to regional geology and tectonics. Subsequently, many researchers have given the term its own interpretation. Modern metallogeny is divided into theoretical and applied, and, unlike historical analysis, its focus extends from ore deposits to any mineral deposits and their larger mineragenic areas in space and time. Theoretical metallogeny studies ore-forming processes by creating their models, applied metallogeny includes metallogenic analysis, regional and local forecast with a quantitative estimation of the inferred resources for the studied areas.

Key words: metallogeny, minerageny, metallogenic analysis, metallogenic categories (zones, systems, belts), mineralization, geological and ore formation, forecasting, ore-bearing area.

Металлогения – раздел учения о полезных ископаемых, характеризующий геологические закономерности формирования и размещения рудных месторождений в пространстве и времени.

Исторические основы металлогении. Термин «металлогения» был введён в 1892 г. французским учёным Луи де Лоне. Первыми металлогенистами были представители Античной Греции: Фалес (624–547 гг. до н.э.) –

отец нептунистов и Гераклит (544–474 гг. до н.э.) – прародитель плутонистов.

Георгий Агрикола (Георг Бауэр, 1494–1555) – немецкий учёный в области горного дела и металлургии известен своими мудрыми постулатами, такими как «Рудные жилы – соки Земли» (то есть продукты циркуляции растворов) или «Ищи руду возле руды» – постулат, указывающий на нептунистические воззрения автора.

В 1906 г. де Лоне подчеркнул важность и необходимость изучения связей минеральных месторождений с региональной геологией и особенно с тектоникой. Совокупность возникающих при этом вопросов он назвал тогда «тектонической металлогенией». В 1913 г. де Лоне писал о том, что *металлогения изучает минеральные месторождения химических элементов с тем, чтобы определить законы, следуя которым эти месторождения должны, преимущественно, появляться в той или иной геологической зоне, представлять то или иное размещение, те или иные изменения с глубиной*. Однако де Лоне включил в понятие металлогения все аспекты и проблемы учения о рудных месторождениях.

Позднее многие исследователи использовали термин «металлогения», давая ему иногда своё толкование. Так, Р.Холмс (1928) определил металлогению как «генетическое изучение рудных месторождений во взаимоотношении с возрастом, региональной тектоникой и петрографическими провинциями». С.С.Смирнов применял этот термин в своих региональных работах 1930–1940 гг. там, где речь шла о региональных исследованиях крупных регионов.

Ю.А.Билибин в 1944 г. под термином «металлогения» понимал совокупность проявлений металлогенического оруденения, осмысленных с точки зрения тех геологических закономерностей, которые управляют их распределением во времени и пространстве. Учёный опубликовал ряд важных обобщений по металлогении складчатых областей, в том числе наметил последовательность этапов их развития. Позже в этом же направлении работали И.Г.Магакян, Е.А.Радкевич, Г.А.Твалчрелидзе и другие выдающиеся отечественные геологи.

Металлогения, согласно Е.Т.Шаталову и его соавторам (1964), имеет свои *объекты исследования* – металлогенические пояса и провинции, зоны и области, рудные районы и узлы, а также свои *специфические задачи* – выявление закономерностей распределения рудоносных площадей и рудных месторождений в пространстве и времени, изучение критериев связи оруденения с комплексом геологических обстановок, влияющих на процессы минерализации, систематизацию и изучение типовых особенностей рудоносных площадей, прогнозирование новых рудоносных площадей.

К числу основных методов металлогенических исследований относились: региональный металлогенический анализ, применяемый при изучении более или менее обширных регионов, металлогенический анализ рудоконтролирующих факторов, используемый при детальном исследовании рудных районов, формационный анализ и другие. Вместе с тем металлогения тесно увязывалась с тектоникой, петрографией, литологией, учением о полезных ископаемых. Ю.А.Билибин, как и де Лоне, рассматривал *металлогению* общую, региональную и специальную. Термин «металлогения», сопровождаемый географическим названием какого-либо региона или рудоносной площади (например, металлогения

Урала, Италии и др.), следовало рассматривать как одно из значений металлогении региональной.

Выделялась *металлогения* эндогенная и экзогенная. В качестве синонима металлогении употреблялся термин «минерагения», иногда применительно только к закономерностям размещения месторождений неметаллических полезных ископаемых. Как подчёркивали Е.Т.Шаталов и П.Рутье (1963) оба эти термина этимологически тождественны.

Современная металлогения отличается от исторической анализом месторождений полезных ископаемых и составляемых ими более крупных минерагенических площадей в пространстве и времени.

Современное учение о полезных ископаемых, кроме металлогении, включает основы учения о полезных ископаемых с генетическими и промышленными типами месторождений, структуры рудных полей и месторождений, а также поиски и разведку месторождений полезных ископаемых.

К сфере современной металлогении относятся как рудные, так и нерудные полезные ископаемые. Поэтому синонимом данного термина является минерагения, буквально означающая «происхождение руд».

Современная металлогения подразделяется на теоретическую и прикладную. Теоретическая металлогения изучает рудообразующие процессы путём создания их моделей, реконструируя условия формирования геологических и рудных формаций в истории развития земной коры. Прикладная металлогения включает металлогенический анализ, региональный и локальный прогнозы рудоносности изучаемых территорий с количественной оценкой прогнозных ресурсов.

Значительный вклад в развитие современной металлогении внесли отечественные ученые: В.И.Смирнов, Е.Т.Шаталов, В.А.Кузнецов, Д.В.Рундквист, Н.С.Шатский, Ю.А.Кузнецов, Ю.А.Косыгин.

В.И.Смирнов – один из самых выдающихся в нашей стране учёных в области геологии полезных ископаемых и металлогении. Ему принадлежат первенство в разработке генетических моделей месторождений полезных ископаемых и понятия полихронности и полигенности процессов рудообразования при формировании стратиформных месторождений. Им созданы труды, посвящённые связи процессов вулканизма и формирования рудных особенно колчеданных месторождений; связи рудообразования с зонами Беньюфа; эволюции рудообразования в связи с его цикличностью, стадийностью, направленностью и необратимостью; металлогенической зональности (региональной и локальной); источникам рудного вещества, составляющим три группы (1 – ювенильная подкоровая, 2 – ассимиляционная коровая, связанная с гранитной магмой, 3 – внемагматическая инфильтрационная).

Е.Т.Шаталов разработал классификацию металлогенических площадей, включающую металлогенические пояса, провинции, зоны, подзоны, рудные районы и поля.

В.А.Кузнецов создал классификацию рудных формаций.

Д.В.Рундквист в своих работах рассмотрел соотношения геологических и рудных формаций, металлогеническую зональность, возможности изотопных методов при металлогеническом анализе.

Н.С.Шатский, Ю.А.Кузнецов, Ю.А.Косыгин создали учение о геологических формациях, являющихся геологической основой металлогенических исследований.

К ведущим представителям зарубежных металлогенических школ можно отнести ряд известных учёных, среди которых:

П.Лаффит и П.Рутье (Франция), составившие металлогеническую карту Европы в масштабе 1:2 500 000;

С.Бартон, Ф.Гайл, А.Митчелл, М.Гарсон, М.Луфф, А.Хейл, представляющие объединённую металлогеническую школу США, Канады и Австралии, рассмотревшие тектонические позиции минеральных месторождений континентов;

Р.Фритч – представитель скандинавской металлогенической школы, много сделавший для познания металлогении Балтийского щита;

Г.Борхерт, Л.Гауман (Германия), изучавшие закономерности формирования и размещения стратиформных рудных месторождений Западной и Центральной Европы;

Т.Ватанабэ, Т.Сато, Т.Тацума (Япония), создавшие классические работы по генезису колчеданных месторождений;

Т.Йовчев, Р.Доков, Р.Димитров, С.Симов, А.Панайотов, М.Стайков (Болгария), М.Петкович (Сербия), А.Янкович (Македония), изучавшие металлогению Балкан.

Современная металлогения в значительной степени базируется на тектонике литосферных плит и на методе дедукции, то есть, на исследованиях в направлении от общего к частному. Они, опираясь на знания об общей геологической ситуации, способом последовательного приближения трансформируются в оконтуривание потенциальных и реальных частных рудных площадей. Метод индукции же (от частного к общему) эффективен для выделения эталонных объектов.

Известные металлогенические школы России сосредоточены в ведущих геологических организациях: ИГЕМ, ЦНИГРИ, ИМГРЭ и Высших учебных заведениях (прежде всего, школа академика В.И.Смирнова при кафедре геологии и геохимии полезных ископаемых МГУ).

Категории металлогении и металлогенические обстановки. Основные категории металлогении подразделяются на пространственные и временные.

Пространственные категории – металлогенические пояса и провинции, металлогенические системы, зоны, подзоны, рудные районы, поля, месторождения.

Металлогенические пояса эквивалентны планетарным линейным поясам, например, в современной структуре – складчатым поясам (Урало-Монгольский и др.), зонам перехода или сочленения океанов и континентов (Тихоокеанский, Средиземноморский и др.). *Металлогенические*

провинции в современной структуре отвечают крупным частям планетарных поясов, например, складчатым областям – системам островных дуг и окраинных морей, а в формационном выражении – ареалам развития вулканоплутонических и осадочных ассоциаций геологических формаций (Южно-Уральская, Кавказская и др.). *Металлогенические системы* – крупные части провинций, например, системы островных дуг или сопряжённые дуги окраинного моря (система Юго-Западного Алтая). В литературе системы иногда именуются областями или мегазонами. *Металлогенические зоны* эквивалентны структурно-формационным зонам или ареалу развития ведущей рудоносной геологической формации или ассоциации формаций. *Металлогенические подзоны* охватывают структурно-формационные подзоны или линейные ареалы развития нескольких рудоносных геологических субформаций. *Рудные районы* отвечают структурно-формационным блокам I порядка или изометричным ареалам развития 2–3 рудоносных геологических субформаций, а *рудные поля* – структурно-формационным блокам II порядка или ареалам развития рудоносной геологической субформации. *Рудные узлы* включают сближенные в пространстве рудные поля, контролируемые одной геологической структурой.

Временные металлогенические категории – циклы, эпохи, стадии, подстадии.

Металлогенические циклы охватывают время преобразования океанической коры в континентальную по схеме: океан → островные дуги → окраинные моря → краевые ВПП → континент. *Металлогенические эпохи*, по В.И.Смирнову (в млн. лет): AR (3500–2500), PR₁ (2500–1900), PR₂ (1900–1400), PR₃ (1400–600), PZ₁ (600–400, каледонская складчатость), PZ₂ (400–225, герцинская складчатость), MZ (225–100, киммерийская складчатость), Pg–N–Q (100–0, альпийская складчатость).

Металлогенические стадии – океанические, островодужные, коллизионные, континентальные. *Металлогенические подстадии* – раннеостроводужная, позднеостроводужная.

Металлогенические обстановки – океанические, переходные от океанических к континентальным и континентальные. Океанические обстановки – это океаническое плато и переокеанические зоны спрединга (рифтовые зоны).

Переходные от океанических к континентальным обстановки представлены энсиматическими и энсиалическими островными дугами, окраинными морями и краевыми вулканоплутоническими поясами.

Континентальные обстановки объединяют плиты с внутренними морями, рифты и авлакогены, а также древние континенты и микроконтиненты.

Эволюция рудообразования в геологической истории. Закономерности рудообразования в геологической истории имеют не только теоретическую ценность, но и большое прикладное значение. Они могут быть выявлены на основе количественного анализа эволюции фор-

мирования месторождений полезных ископаемых в ходе развития земной коры.

Количественную оценку эволюции рудообразования в геологической истории логично привязать к её временным категориям, а именно к архейской, ранне-протерозойской и другим геотектоническим и металлогеническим эпохам.

Суждение о количественной эволюции рудообразования во времени в первом приближении может быть получено на основе учёта суммарных запасов металлов, возникших в соответствующие металлогенические эпохи.

Анализ эволюции эндогенно-экзогенного рудообразования может быть произведён на примере какого-либо одного класса месторождений, например, месторождений сульфидных руд.

Такой сравнительный анализ количественной эволюции медного и свинцового рудообразования в своё время был выполнен Е.И.Филатовым и Е.П.Шираем для ведущих формационных типов медных и полиметаллических месторождений [7].

Металлогенический (Минерагенический) кодекс. Основными составителями Металлогенического кодекса – сотрудники ЦНИГРИ: доктора геолого-минералогических наук профессор А.И.Кривцов и профессор Г.В.Ручкин, кандидат геолого-минералогических наук В.И.Кочнев-Первухов. Глава I Кодекса составлена сотрудником Роснедра кандидатом геолого-минералогических наук А.Ф.Карпузовым, остальные главы и приложения – основным коллективом при участии сотрудника «ООО УралИКЦ» доктора геолого-минералогических наук Е.С.Контаря и старшего научного сотрудника ЦНИИГеолнеруд А.Г.Ахманова.

На разных стадиях работы над кодексом авторы широко использовали возможность обсуждения его аспектов с коллегами, которым выразили свою благодарность. Особо отмечены конструктивная критика и ценные предложения профессоров В.В.Авдонинова (МГУ), П.А.Игнатьева (МГРИ-РГГРУ), Е.И.Филатова (ИМГРЭ), Е.М.Аксенова (ЦНИИГеолнеруд).

Основные термины. *Месторождение* (минеральное, полезного ископаемого, минерального сырья) – природное или техногенное скопление полезного ископаемого, которое в количественном или качественном отношении может быть предметом промышленной разработки при данном состоянии техники и в данных экономических условиях.

Рудообразующий процесс – совокупность геологических процессов и явлений, которые сопровождаются возникновением месторождений-обособлений значительных масс рудного вещества за счёт его однонаправленной миграции из областей заимствования (выноса) в области накопления с ростом содержаний на локальных участках.

Рудообразующая система – совокупность совмещённых в пространстве и времени источников энергии и рудного вещества, транспортирующих агентов (носи-

телей), путей транспортировки рудного вещества и областей (среды) его накопления.

Рудная формация – группа месторождений или рудопроявлений, однотипных по вещественному, элементному и минеральному составу руд и геологической обстановке нахождения, которая характеризуется связью с определённой геологической формацией (либо сочетанием геологических формаций) и типовыми структурными условиями рудонакопления.

Метасоматическая (гидротермально-метасоматическая) формация – устойчиво повторяющаяся совокупность метасоматических пород, закономерно располагающихся в пространстве и развивающихся в ходе однонаправленного процесса гидротермального преобразования пород.

Геологическая формация – естественное сообщество горных пород (геологические тела), обладающих пространственно-временной общностью при близости обстановок возникновения и формирования на отдельных отрезках однотипного становления земной коры; каждая геологическая формация фиксирует определённый режим развития.

Металлогеническая формация – устойчивая постоянно наблюдаемая пространственно-временная ассоциация геологических, метасоматических и рудных формаций. Металлогеническая формация состоит из триады: геологическая формация (или их сочетание)–метасоматическая формация–рудная формация (или ассоциация формаций).

Металлогенический таксон – пространственная категория металлогении, соответствующая рудоносным площадям различных размеров и рангов. Базовым таксоном металлогении является металлогеническая зона – эквивалент структурно-формационной зоны, в которой установлены продукты рудообразующих процессов (месторождения, рудопроявления).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Геохимическая и металлогеническая специализация структурно-вещественных комплексов* // Г.С.Гусев, Ю.К.Кудрявцев и др. – М., 1999.
2. *Кривцов А.И.* Прикладная металлогения. – М.: Недра, 1989.
3. *Металлогенический кодекс России* // А.И.Кривцов, Г.В.Ручкин, А.Ф.Карпузов, и др. – М.: Геокарт-ГЕОС, 2012
4. *Российский металлогенический словарь* // Под ред. А.И.Кривцова. – СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2003.
5. *Смирнов В.И.* Металлогения. Избранные труды. – М.: Наука, 1993
6. *Филатов Е.И., Ширай Е.П.* Формационный анализ в прогнозных исследованиях // Советская геология. 1987. № 2. С. 45–55.
7. *Филатов Е.И., Ширай Е.П.* Формационный анализ рудных месторождений. – М.: Недра, 1988.
8. *Филатов Е.И., Филатова Л.К.* Основы металлогении и формационный анализ рудоносных комплексов. Учебное пособие. – М.: РУДН, 2016.

ТРЕБОВАНИЯ К АВТОРАМ СТАТЕЙ

1. Рукопись представляется с установленными сопровождающими документами: письмом (разрешением на опубликование) руководителя учреждения и экспертным заключением о возможности публикации в открытой печати. В конце статьи ставятся подписи всех авторов. В том случае, если автор не один, то указать фамилию автора, с которым будет вестись переписка.
2. К материалам, направляемым в редакцию, должна быть приложена справка об авторе (авторах) с указанием: фамилии, имя, отчества, учёной степени, звания, должности, места работы, адреса для переписки (почтового), телефона, e-mail каждого автора.
3. Научные статьи, поступившие в редакцию, подлежат обязательному рецензированию с целью их экспертной оценки.
4. В журнале не публикуются статьи, излагающие обобщения и предположения, не вытекающие из публикуемого оригинального фактического материала; серийные и излагающие отдельные этапы исследований.
5. Объём статьи не должен превышать 20 страниц, включая таблицы и список литературы. Следует выставить поля: сверху (2 см), снизу (2 см), справа (1 см) и слева (3 см). Все страницы рукописи нумеруются. Текст предоставляется в формате MS Word (*.doc) с использованием шрифта Times New Roman (размер 12, полуторный межстрочный интервал). В отдельные файлы помещаются статья, таблицы. Возможна передача статей по электронной почте: geo@tsnigri.ru
6. Для набора математических формул и химических символов рекомендуется использовать Microsoft Equation 2.0.
7. Список литературы даётся сквозной нумерацией в алфавитном порядке. Иностранная литература помещается после отечественной. Ссылки в тексте на источник из списка литературы приводятся соответствующим порядковым номером в квадратных скобках. В список не включаются неопубликованные работы.
8. Рисунки и другие графические материалы (не более 6) представляются в цветном или чёрно-белом варианте в электронном формате. Размер оригиналов рисунков не должен превышать формата страницы журнала (170x237 мм). Каждый рисунок помещается в отдельный файл в одном из следующих форматов: графический редактор Corel Draw, JPEG, TIFF (только для фото), диаграмма Microsoft Exsel. Графика должна быть прямо связана с текстом и способствовать его сокращению. Оформление и содержание иллюстративного материала должны обеспечивать его читаемость после возможного уменьшения. Ксерокопии и сканированные ксерокопии не принимаются. Подрисуночные подписи печатаются на отдельной странице (текстовый файл, после списка литературы). Рисунки, не удовлетворяющие требованиям редакции, возвращаются автору.
9. Редакция оставляет за собой право сокращать и редактировать название статьи, текст, рисунки.
10. Статьи, превышающие установленный объём или не отвечающие данным требованиям, возвращаются автору.