ОТЕЧЕСТВЕННАЯ ГЕОЛОГИЯ

Nº 6 / 2022

Основан в марте 1933 года

Журнал выходит шесть раз в год

УЧРЕДИТЕЛИ

Mı Po

Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации



Российское геологическое общество



Центральный научно-исследовательский геологоразведочный институт цветных и благородных металлов

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор: А.И.Иванов

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

Е.М.Аксенов, А.Н.Барышев, А.И.Варламов, С.С.Вартанян, В.Д.Конкин, А.А.Кременецкий, С.Г.Кряжев, М.И.Логвинов, Г.А.Машковцев, И.Ф.Мигачёв, Е.А.Наумов, А.Ю.Розанов, Г.В.Седельникова, И.Г.Спиридонов, В.И.Старостин, Е.Г.Фаррахов, Г.К.Хачатрян

Содержание

ЛИТОЛОГИЯ, ПЕТРОЛОГИЯ, МИНЕРАЛОГИЯ, ГЕОХИМИЯ

Барабаш Е. О., Афанасьев В. П., Похиленко Н. П., Малы-Койжанова А. К., Магомедов Д. Р., Ерденова М. Б., Абдылгина Е. В., Иванова О. А. даев Н. Н., Бакраева А. Н. Оценка возраста и потенциальной алмазоносности ко-Исследование технологии бактериального выщелачивания меди из бедных медьсодержащих отвалов 76 ренных источников по их глубинным минералам из оре-Токтар Г., Кауметова Д. С., Койжанова А. К., Магомедов Д. Р., Атанова О. В., Абдылдаев Н. Н. Нигай Е В Исследования обогатимости золотосодержащей руды 86 Базальтоиды острогорского комплекса: геология, возраст, геохимия, геодинамика (Западный Сихотэ-Алинь) ... 17 Зинчук Н. Н. Особенности петрографического изучения кимберли-ПАМЯТНЫЕ ДАТЫ товых пород 34 Спиридонов Э. М. Серебрянников А. О., Логвинова А. М., Соболев Н. В. Норильские рудоносные интрузивы и сульфидные руды. Особенности микропримесного состава хромшпине-лидов-включений в алмазах из кимберлитов Якутии 50 Памяти Евгения Михайловича Некрасова 117 РЕГИОНАЛЬНАЯ ГЕОЛОГИЯ Мясников Ф. В. Алмазоносная литосфера Сибирской платформы (по гео-Список статей, опубликованных в журнале «Отечесфизическим данным). Тектоническое районирование 64 твенная геология» в 2022 г. 118

ТЕХНОЛОГИИ ОБОГАЩЕНИЯ

МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ

Редакция: Т. М. Папеско, А. П. Фунтикова Компьютерная верстка: А. Д. Юргина

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» Свидетельство о регистрации в средствах массовой информации № 01217 от 03 июня 1992 г. Подписано в печать 26.12.2022 Адрес редакции: 117545, г. Москва, Варшавское шоссе, д. 129, корп. 1 Телефон: (495) 315-28-47. Факс: (495) 315-43-47. Е-mail: ogeo@tsnigri.ru Сайт: http://tsnigri.ru/o_geology Сайт электронной библиотеки: http://elibrary.ru

Типография ФГБУ «ЦНИГРИ»

DOI:10.47765/0869-7175-2022-10031

УДК 552.323.6:549.211:551.3.051 © Коллектив авторов, 2022

Оценка возраста и потенциальной алмазоносности коренных источников по их глубинным минералам из ореолов рассеяния

Для Анабаро-Уджинского междуречья, участков Тарыдак и Мирюга, Келимярской площади и Чомполинского поля оценён возраст коренных источников глубинных минералов из ореолов рассеяния на основе разработанных нами минералогических критериев. Сделаны выводы о перспективах алмазоносности коренных источников, прогнозируемых в пределах данных площадей.

Ключевые слова: кимберлит, среднепалеозойский кимберлитовый магматизм, индикаторные минералы кимберлита, пироп, пикроильменит.

БАРАБАШ ЕКАТЕРИНА ОЛЕГОВНА, кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник¹, egorovaeo@igm.nsc.ru, hyperborean@bk.ru

АФАНАСЬЕВ ВАЛЕНТИН ПЕТРОВИЧ, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник¹, avp-diamond@mail.ru

ПОХИЛЕНКО НИКОЛАЙ ПЕТРОВИЧ, академик РАН, главный научный сотрудник^{1, 2}, chief@igm.nsc.ru

МАЛЫГИНА ЕЛЕНА ВЕНИАМИНОВНА, кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник¹, malygina@igm.nsc.ru

ИВАНОВА ОКСАНА АЛЕКСАНДРОВНА, младший научный сотрудник¹, ivanova@igm.nsc.ru

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук (ФГБУН ИГМ СО РАН), г. Новосибирск

² Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет» (НГУ)

The age and potential of primary diamond deposits: estimation from mantle-derived placer minerals

E. O. BARABASH¹, V. P. AFANASIEV¹, N. P. POKHILENKO^{1, 2}, E. V. MALYGINA¹, O. A. IVANOVA¹

¹ Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk

² Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation

The ages of primary diamond deposits in the Anabar-Udzha interfluve, Tarydak and Miryuga sites, Kelimyar area, and Chompolo field have been estimated using mineralogical criteria from data on mantle-derived minerals found in the related placers. The new data have implications for the diamond potential of primary deposits in the sampled areas.

Key words: kimberlite, Middle Paleozoic kimberlite magmatism, kimberlite indicator minerals, pyrope, picroilmenite.

Введение. На Сибирской платформе известны три эпохи кимберлитового магматизма – среднепалеозойская, нижнетриасовая и юрско-меловая. Кимберлиты с промышленными содержаниями алмазов в пределах Сибирской платформы связаны только со среднепалеозойской эпохой, хотя в ряде кимберлитовых полей этого возраста резко преобладают тела с низкими и убогими содержаниями алмазов. Уровень алмазоносности триасовой эпохи значительно ниже, чем среднепалеозойской, а в большинстве известных триасовых кимберлитов алмазы вообще не установлены. Известные юрско-меловые кимберлиты не содержат алмазов, исключение составляет лишь кимберлитовая трубка Дьянга, содержащая незначительные концентрации алмазов. Поскольку для Сибирской платформы наблюдается зависимость продуктивности кимберлитовых тел от возраста их формирования, то оценка возраста коренных источников по ИМК из ореолов рассеяния имеет большое значение при оценке перспективности изучаемой площади. Поэтому с использованием комплекса критериев оценки возраста коренных источников по индикаторным минералам кимберлитов (ИМК) из ореолов рассеяния [10] обоснован возраст коренных источников для ряда потенциально алмазоносных районов Сибирской платформы.

Район работ и материал для исследования. Материалом для исследования послужили шлиховые пробы из следующих районов Сибирской платформы: Анабаро-Уджинское междуречье (бассейны рек Биллях, Уджа, Маят), участки Тарыдак и Мирюга (бассейн реки Подкаменная Тунгуска), Чомполинское лампрофировое поле, северная часть Оленёкского поднятия (бассейны рек Никабыт, Хорбусуонка, Келимяр).

Методы исследования. С помощью бинокулярного микроскопа (Микромед MC-3-Zoom) изучен габитус кристаллов, степень механического износа, наличие гипергенных изменений и хронологические взаимоотношения разного рода скульптур. Сканирующая электронная микроскопия (JEOL 6380 LA, TESCAN MIRA 3 LMU) применялась с целью изучения микрорельефа наиболее информативных зёрен ИМК и документации представительных выборок гранатов из различных районов.

Химический состав гранатов определялся методом рентгеноспектрального микроанализа с электронным зондом на микроанализаторе JEOL JXA 8100 в аналитическом центре ИГМ СО РАН. Анализ проводился при ускоряющем напряжении 20 кВ и токе пучка 40–70 нА, диаметр пучка электронного зонда составлял 2 мкм, время отсчёта 20 сек для пиков и 10 сек для фона. Для силикатов проводился стандартный 10-элементный анализ на элементы с пересчётом на оксиды: SiO₂, TiO₂, Al₂O₃, Cr₂O₃, FeO, MgO, MnO, CaO, K₂O, Na₂O. Пределы обнаружения для SiO₂, TiO₂, Al₂O₃, MgO, CaO, K₂O, Na₂O и P₂O₅ составляли 0,03–0,04 мас.%, а для FeO, MnO и Cr₂O₃ – 0,05–0,07 мас.%. Точность анализа 2 отн.%. Подробнее метод описан в работе [13].

Результаты исследования. Анабаро-Уджинское междуречье (северо-восток Сибирской платформы). Индикаторные минералы изученной площади представлены пиропом и пикроильменитом. Хромиты, найденные в небольшом количестве, относятся к так называемому «курунгскому» типу, то есть происходят не из кимберлитов, а из неизвестных пород ультраосновного состава; такие хромиты распространены по всей Сибирской платформе [8]. Большинство зёрен пиропов имеет признаки гипергенной коррозии. Степень гипергенной коррозии варьирует от слабой, видимой только на сканирующем микроскопе, до высокой, с формированием выпуклогранных кубоидов, которые являются устойчивыми формами растворения гранатов в процессах выветривания [5, 6, 15].

В бассейнах рек Маят и Уджа преобладает слабая или средняя степень гипергенной коррозии пиропов (рис. 1, Б), а в бассейнах рек Биллях и Эбелях – высокая, практически все пиропы представлены хорошо развитыми кубоидами (см. рис. 1, В, Г).

Степень докоррозионного механического износа пиропов так же, как и степень гипергенеза, различается в зависимости от района. Для пиропов из бассейнов рек Маят и Уджа степень механического износа варьирует от слабой (см. рис. 1, Д) до предельной (см. рис. 1, А, Б), в подавляющем большинстве случаев преобладает слабая степень докоррозионного износа, а для пиропов из бассейнов рек Биллях и Эбелях – высокая, что подтверждается наличием большого количества кубоидов, которые более охотно развиваются по сильно окатанным зёрнам (см. см. рис. 1, В, Г).

На пиропах Анабаро-Уджинской площади часто встречается механогенная полировка, развитая по коррозионной поверхности (см. рис. 1, Б), но присутствуют и шероховатые поверхности при общей слабой степени износа.

Степень механического износа пикроильменита в бассейне реки Уджа варьирует от визуально нефиксируемой (см. рис. 1, Е) до предельной с формированием псевдогексагональных пластинок (см. рис. 1, 3). На слабоокатанных зёрнах широко развит микропирамидальный рельеф, изредка встречаются зёрна пикроильменита агрегатного строения (см. рис. 1, Ж).

Распределение химических составов пиропов из всех районов Анабаро-Уджинского междуречья соответствует среднепалеозойским источникам. В небольшом количестве присутствуют гранаты алмазной ассоциации (рис. 2).

Участки Тарыдак и Мирюга (бассейн р. Подкаменная Тунгуска). К северу от Чадобецкого поднятия в районе рек Тарыдак и Мирюга известен среднекарбоновый континентальный коллектор индикаторных минералов, содержащий сильноокатанные пиропы и алмазы с признаками износа. Пикроильменит в ассоциации отсутствует.

По механогенным поверхностям пиропов практически на всех зёрнах, развит каплевидный рельеф (рис. 3, А), часто полностью уничтожающий следы докорового износа. В долине р. Мирюга для большинства пиропов характерен хорошо развитый пирамидально-черепитчатый рельеф (см. рис. 3, Б).



Рис. 1. Морфологические особенности ИМК Анабаро-Уджинского междуречья:

А – предельная степень докорового механического износа (р. Уджа); Б – слабая степень гипергенной коррозии (детали рельефа зерна «А»); В, Г – кубоид пиропа (р. Биллях); Д – пироп со слабой степенью механического износа (р. Маят); Е – пикроильменит со слабым механическим износом (р. Булгунахтах); Ж – зерно пикроильменита агрегатного строения (р. Чымара); 3 – предельная степень механического износа пикроильменита (р. Уджа)



Рис. 2. Диаграммы составов гранатов бассейнов рек Уджа, Биллях, Маят. Поля, по [20]:

В – верлитовый парагенезис, Л – лерцолитовый парагенезис, Д-Г – дунит-гарцбургитовый парагенезис, Алм – гранаты алмазной ассоциации

По химическому составу пиропы с Тарыдакского и Мирюгинского участков показывают типичное среднепалеозойское распределение составов в координатах CaO-Cr₂O₃, в ассоциации устойчиво присутствуют пиропы алмазной ассоциации (рис. 4) [20].



Келимярская площадь. Изучаемый район расположен на северо-восточной окраине Оленёкского поднятия у его подножья на границе с кряжем Чекановского в бассейнах рек Келимяр, Никабыт, Хорбусуонка. Большинство пиропов на Келимярской территории характеризуется слабым механическим износом при отсутствии гипергенной коррозии (рис. 5, А). Однако в некоторых пробах присутствуют единичные пиропы с каплевидным (см. рис. 5, Г) и пирамидально-черепитчатым рельефом (см. рис. 5, В), а также пиропы с повышенным износом.

Степень механического износа пикроильменитов варьирует от слабой до предельной с образованием псевдогексагональных табличек. Подавляющее большинство пикроильменитов имеет слабую до средней степень механического износа с шероховатым механогенным или микропирамидальным рельефом (см. рис. 5, Б).

Необходимо отметить, что внутри изучаемой территории наблюдается некоторая дифференциация по морфологии индикаторных минералов. В бассейнах рек Хорбусуонка и Никабыт индикаторные минералы менее окатаны, практически отсутствуют зёрна с гипергенной коррозией, пирамидально-черепитчатым рельефом и сильным механическим износом. В бассейне реки Келимяр чаще встречаются пиропы с каплевидным и пирамидально-черепитчатым рельефом, а также сильноокатанные зёрна.

Все обнаруженные хромиты по морфологии соответствуют «курунгскому» типу и относятся к «ложным» индикаторам кимберлитов. Их источником на Келимярской площади являются трубки взрыва



Рис. 3. Морфологические особенности пиропов участков Тарыдак и Мирюга:

А – кубоид пиропа, уч. Тарыдак; Б – пирамидально-черепитчатый рельеф на пиропах уч. Мирюга

калиевых щелочных вулканитов на апикальной части Оленёкского поднятия. Об этом свидетельствует полная аналогия составов хромитов Келимярской площади и хромитов из этих трубок [17].

Распределение составов пиропов на диаграмме Н.В. Соболева [20] указывает на среднепалеозойский или триасовый возраст их источников (рис. 6). В некоторых пробах в незначительных количествах присутствуют гранаты алмазной ассоциации.

Чомполинское поле. Чомполинское поле расположено в юго-восточной части Сибирской платформы, в верховьях реки Амга. Трубки взрыва и дайки на данной территории представлены лампрофирами [12, 19]. На большей части его территории на дневной



Рис. 4. Диаграммы составов гранатов участков Тарыдак и Мирюга. Поля, *по [20]*: см. пояснения к рис. 2



Рис. 5. Морфологические особенности пиропов и пикроильменитов Келимярской площади:

А – пироп с первичной морфологией; Б – пикроильменит со слабым механическим износом и микропирамидальным рельефом; В – пироп с пирамидально-черепитчатым рельефом; Г – пироп с каплевидным рельефом

поверхности обнажены породы кембрия-протерозоя, которые являются лампрофировмещающими, на водоразделах встречаются реликты нижнеюрских отложений, содержащие индикаторные минералы.

Индикаторные минералы Чомполинского поля представлены преимущественно пиропом и пикроильменитом, в меньших количествах присутствуют хромит и хромдиопсид.

Степень механического износа пиропов слабая, и лишь единичные зёрна могут быть отнесены к средней степени износа. Как правило, для пиропов характерен «первичный» рельеф, сформированный в коренном источнике (рис. 7, А). Реже встречается развитый в разной степени пирамидально-черепитчатый рельеф (см. рис. 7, Г). Изредка на зёрнах пиропов развит полирующий тип механического износа. На нескольких зёрнах гранатов наблюдается каплевидный (см. рис. 7, В) рельеф гипергенного растворения.

Для пикроильменита характерно наличие микропирамидального рельефа хорошей сохранности (см. рис. 7, Б), что указывает на слабый механический износ. В редких случаях встречаются среднеокатанные зёрна.

Хромиты из трубок взрыва Чомполинского поля представлены двумя морфологическими типами. Для первого типа характерны хорошо оформленные острорёберные октаэдры, а для второго – октаэдры с вициналями, мириоэдрические кристаллы. В аллювии они, как правило, не имеют признаков износа.



Рис. 6. Диаграммы составов гранатов Келимярской площади. Поля, по [20]:

см. пояснения к рис. 2

Распределение составов гранатов из всех проб Чомполинского поля соответствует мезозойским источниками и показывает отсутствие субкальциевых высокохромистых пиропов дунит-гарцбургитового парагенезиса, характерных для алмазоносных кимберлитов (рис. 8) [20].

Обсуждение результатов исследования. Критерии оценки возраста коренных источников по ИМК из ореолов рассеяния. Морфологические особенности ИМК и химический состав гранатов позволяют дать оценку возраста коренных источников по индикаторным минералам из ореолов рассеяния на основании описанных ниже критериев [10].

В качестве первого критерия используется химический состав гранатов. Химический состав гранатов из среднепалеозойских кимберлитов отражает максимальное разнообразие парагенезисов гранатов в кимберлитах [20] (см. рис. 3, А). Основная масса гранатов принадлежит лерцолитовым парагенезисам, в значительном количестве представлены дунитгарцбургитовые и верлитовые гранаты. Присутствуют гранаты алмазной ассоциации, куда попадают



Рис. 7. Морфологические особенности пиропов и пикроильменитов Чомполинского поля:

А – пироп со слабым механическим износом; Б – пикроильменит со слабым механическим износом; В – фрагмент зерна пиропа с каплевидным рельефом; Г – фрагмент зерна пиропа с пирамидально-черепитчатым рельефом



Рис. 8. Диаграммы составов гранатов Чомполинского поля. Поля, по [20]:

см. пояснения к рис. 2

высокохромистые субкальциевые гранаты, по составу соответствующие большей части включений в алмазах ультраосновных парагенезисов.

Триасовые кимберлиты в значительной мере наследуют распределение составов гранатов, характерное для среднепалеозойских кимберлитов. Однако в популяциях гранатов из триасовых кимберлитов значительно снижены доли гранатов гарцбургитдунитового и верлитового парагенезисов, а также гранатов с наиболее высокими содержаниями хрома ($Cr_2O_3 > 10$ мас.%); гранаты алмазной ассоциации представлены в незначительных количествах или отсутствуют (см. рис. 3, Б). Тем не менее только по составу разделить пиропы из кимберлитов среднепалеозойского и триасового возраста в случае их смешивания в ореолах достаточно сложно.

Среди гранатов из юрско-меловых кимберлитов резко снижаются содержания верлитового и гарцбургит-дунитового парагенезисов, гранаты из этих трубок главным образом малохромистые ($Cr_2O_3 < 8$ мас.%) и относятся к так называемым лерцолитам аномального состава [14]; гранаты алмазной ассоциации практически не встречаются (рис. 9).

Следующие критерии связаны с морфологическими особенностями ИМК. Для минералов из среднепалеозойских кимберлитов в большинстве случаев характерна средняя и сильная степень механического износа. Это связано с тем, что после формирования кимберлитовых тел и начального этапа их эрозии в позднем девоне (начало фамена) территория Сибирской платформы испытала мощную трансгрессию, которая обусловила сильное окатывание индикаторных минералов и оставила после себя абразионный пенеплен [3]. В последующие эпохи наступление моря на выровненную сушу имело уже характер не трансгрессии, а ингрессии, то есть подтопления суши. В условиях ингрессии существенный износ минералов не мог осуществиться, поэтому для ИМК из россыпей, сформированных за счёт триасовых и юрско-меловых кимберлитов, характерен только слабый износ и механогенная полировка твёрдых минералов, в первую очередь пиропа.

Следующий критерий связан с физико-химическими изменениями минералов. В конце фаменаначале раннего карбона Сибирская платформа находилась в районе экватора [18]. Это способствовало тому, что в условиях влажного тропического климата на выровненной после трансгрессии поверхности была сформирована кора выветривания, в которой индикаторные минералы, прежде всего пироп, приобрели признаки гипергенных изменений. Наиболее характерным типом гипергенных изменений на пиропах является каплевидный рельеф [5, 15]. В геологической истории фанерозоя только в среднепалеозойской коре выветривания зафиксировано гипергенное растворение ИМК [16]. Поэтому наличие каплевидного рельефа, а также каналов травления по дислокациям в структуре пиропов однозначно указывают на среднепалеозойский этап гипергенеза и, соответственно, среднепалеозойский возраст коренных источников корродированных пиропов.

Указанные критерии по отдельности могут быть по-разному проявлены на индикаторных минералах, поэтому только их применение в комплексе позволяет диагностировать принадлежность коренных источников к определённой эпохе кимберлитового магматизма с высокой надёжностью.

Анабаро-Уджинская площадь. Для пиропов и пикроильменитов Анабаро-Уджинской площади характерны широкие вариации по степени механического износа и гипергенной коррозии. При этом наблюдается дифференциация района по степени механического износа и гипергенной коррозии ИМК.

В бассейнах рек Уджа и Маят подавляющее большинство пиропов и пикроильменитов характеризуется слабым механическим износом и едва заметным каплевидным рельефом, в то время как в бассейнах рек Биллях и Эбелях пиропы сильно окатаны, в большом количестве присутствуют кубоиды. Вероятно, это объясняется тем, что от р. Маят на север территория была несколько более возвышенная, поэтому в бассейне рек Маят и Уджа индикаторные минералы



Рис. 9. Диаграммы составов гранатов из разновозрастных кимберлитов. Поля, по [20]:

Рг₂ – трубки Удачная, Айхал, Зимняя (средний палеозой); Т₃ – трубки Эвенкийская, Университетская, Малокуонапская (триас), J-К – трубки Обнаженная, Второгодница, Оливиновая, Ирина (юра–мел); см. пояснения к рис. 2

в процессе позднефаменской трансгрессии, охватившей всю Сибирскую платформу, окатаны относительно слабо и, как следствие, менее корродированы, тогда как на р. Биллях и южнее, вплоть до р. Эбелях, индикаторные минералы окатаны значительно сильнее, пиропы были закатаны до шариков, что послужило впоследствии благоприятной основой для



формирования кубоидов при гипергенной коррозии, а пикроильменит в условиях трансгрессии мог истираться полностью.

Различная, в том числе повышенная, степень механического износа ИМК Анабаро-Уджинской площади и широкое распространение пиропов с признаками гипергенной коррозии в сочетании с типичным среднепалеозойским распределением составов гранатов и наличием гранатов алмазной ассоциации дают основания предполагать наличие на данной территории алмазоносных среднепалеозойских коренных источников.

Участки Тарыдак и Мирюга. Индикаторные минералы кимберлитов в бассейнах рек Тарыдак и Мирюга представлены в среднекарбоновом коллекторе сильноокатанными пиропами. Данная степень механического износа достижима только в прибрежноморских трансгрессивных обстановках [4]. Это объясняет отсутствие в ассоциации пикроильменита, который в силу меньшей абразивной устойчивости полностью уничтожается в условиях трансгрессии. Следовательно, в континентальных среднекарбоновых отложениях ореол находится в переотложенном состоянии.

Глубокое растворение пиропов с образованием кубоидов указывает на то, что после формирования прибрежно-морского коллектора, пиропы находились в условиях среднепалеозойской коры выветривания [5, 6, 15], которая на данной территории, как и на всей Сибирской платформе, была развита в позднем девоне [11, 16]. На большинстве зёрен пиропов из Мирюгинского коллектора развит ярко выраженный пирамидально-черепитчатый рельеф, формирование которого связано с тем, что после этапа гипергенеза в среднепалеозойской коре выветривания они испытали на себе воздействие пермотриасовых дифференцированных траппов [1].

Таким образом, высокая степень механического износа, наличие коррозионного рельефа и среднепалеозойское распределение составов гранатов с наличием гранатов алмазной ассоциации указывают на наличие в районе Тарыдакского и Мирюгинского участков алмазоносных кимберлитовых тел среднепалеозойского возраста. Однако поисковая обстановка на данной территории осложняется тем, что коллектор, содержащий ИМК, а следовательно, и кимберлитовые тела погребены под более поздними осадками.

Келимярская площадь. Для пиропов характерен слабый износ, для пикроильменитов – слабый до среднего. Механогенные поверхности в обоих случаях имеют большие радиусы закругления, что характерно для однородной в гранулометрическом плане абразивной среды. Такая форма износа характерна для достаточно вялого гидродинамического режима мелководного моря. Эти условия были широко распространены в мезозойское время на территории всей Сибирской платформы при ингрессивном наступлении моря на пенепленизированную после девонской трансгрессии сушу [2].

ИМК с высокой степенью механического износа и пиропы со следами гипергенной коррозии, присутствующие в незначительных количествах, указывают на подпитку ореолов минералами из среднепалеозойского коллектора. Однако на исследуемой территории рэтский коллектор (Т₃), содержащий комплекс ИМК, повсюду залегает на неразмытой перми, соответственно, пермские отложения не могли подпитывать рэтские ореолы корродированными минералами. К тому же в ходе полевых работ было проведено шлиховое опробование базального горизонта перми, которое показало отсутствие в ней индикаторных минералов кимберлитов. Следовательно, рэтский коллектор содержит только индикаторные минералы мезозойских кимберлитов.

Присутствие небольшого количества ИМК, характерных для среднепалеозойских источников, вероятно, связано с привносом материала ледником из-за границ рассматриваемого района. Это предположение подтверждается обнаружением эскеров субширотного направления на водоразделах ручьёв Эмяхсин-Юряге и Толуопка-Юряге.

Помимо пиропов со следами гипергенной коррозии, в пробах присутствуют единичные зёрна с типичным пирамидально-черепитчатым рельефом. Формирование пирамидально-черепитчатого рельефа связано с метагенезом при формировании складчатости либо с метасоматозом при внедрении дифференцированных траппов [1]. Однако для изучаемой территории ни те, ни другие условия нехарактерны. Наиболее вероятно, что эти зёрна также были принесены ледником из-за пределов Келимярской территории.

Необходимо отметить, что внутри изучаемой территории наблюдается некоторая дифференциация по минералогии индикаторных минералов. В бассейнах рек Хорбусуонка и Никабыт индикаторные минералы менее окатаны, практически отсутствуют «экзотические» зёрна с гипергенной коррозией, пирамидально-черепитчатым рельефом и сильным механическим износом. В бассейне р. Келимяр значительно чаще встречаются пиропы с каплевидным и пирамидально-черепитчатым рельефом, а также сильноокатанные зёрна, соответствующие трансгрессивным прибрежно-морским обстановкам. Вероятно, это объясняется тем, что индикаторные минералы в бассейнах рек Хорбусуонка и Никабыт питаются преимущественно за счёт местных источников, в то время как в бассейне Келимяра велика вероятность привноса ледником материала с западных румбов.

На основании морфологии и состава индикаторных минералов наиболее вероятно, что на Келимярской площади распространены кимберлиты триасового возраста. Слабый механический износ и отсутствие гипергенной коррозии характерны как для триасовых, так и для юрско-меловых кимберлитов. Однако распределение составов пиропов на диаграмме Н. В. Соболева [20] несвойственно юрскомеловым кимберлитам и указывает на среднепалеозойский или триасовый возраст их источников. В некоторых пробах в небольших количествах присутствуют гранаты алмазной ассоциации, что даёт основания предполагать алмазоносность коренных источников, расположенных на данной территории.

Незначительное количество индикаторных минералов со следами гипергенной коррозии и сильным износом, характерных для среднепалеозойских кимберлитов, а также с пирамидально-черепитчатым рельефом наиболее вероятно принесено ледником из-за пределов Келимярской площади.

Чомполинское поле. Среди изученных индикаторных минералов из лампрофировых тел и аллювиальных шлиховых ореолов Чомполинского поля подавляющее большинство имеет типичные признаки «первичного» рельефа, то есть сформированного в трубке взрыва. Вместе с тем некоторые зёрна обнаруживают признаки механического износа, указывающего на поступление данных зёрен из промежуточного нижнеюрского коллектора. Характерен полирующий тип механического износа, который



Рис. 10. Предполагаемый возраст коренных источников глубинных минералов в изученных районах:

1 – участки Тарыдак и Мирюга, 2 – Келимярская площадь, 3 – Чомполинское поле; 4 – Анабаро-Уджинское междуречье; предполагаемый возраст коренных источников: 1 – триас, 2 – средний палеозой

свойственен в целом минералам из нижнеюрских отложений региона.

Реже встречается развитый в разной степени пирамидально-черепитчатый рельеф, который на данной территории связан с периодом позднеюрской– меловой магматической активизации при образовании Ямалахского горста [7]. На нескольких зёрнах гранатов наблюдается каплевидный рельеф гипергенного растворения. Поскольку на Сибирской платформе гипергенез индикаторных минералов достоверно связан только со среднепалеозойской корой выветривания (D₃-C₁), есть вероятность, что кубоидный рельеф на гранатах Чомполинского поля является формой развития

пирамидально-черепитчатого рельефа, связанного с постмагматической проработкой лампрофировых тел при формировании сиенитовых массивов. Сходная ситуация наблюдается в Хатыстырском поле лампроитов, расположенном юго-восточнее Чомполинского поля. Трубки Хатыстырского поля имеют юрско-меловой возраст. Однако в трубке Нэт присутствуют гранаты со следами гипергенного растворения по кубоидному типу. Наиболее вероятно, что их появление связано с мощнейшей постмагматической карбонатизацией [9]. Пока в этом вопросе нет ясности. Необходимы новые данные.

Распределение составов гранатов из всех проб Чомполинского поля соответствует мезозойским источникам и показывает отсутствие субкальциевых высокохромистых пиропов дунит-гарцбургитового парагенезиса, характерных для алмазоносных кимберлитов [20].

Комплекс минералогических критериев оценки возраста коренных источников индикаторных минералов показывает, что основное количество лампрофировых минералов происходит из неалмазоносных мезозойских источников, о чём свидетельствуют преимущественно слабый износ индикаторных минералов, отсутствие гипергенных изменений, типичное для мезозойских источников распределение составов пиропов с полным отсутствием высокохромистых субкальциевых гранатов алмазной ассоциации [20]. Дать однозначную оценку возраста лампрофиров Чомполинского поля пока сложно. Изотопные датировки ⁴⁰Ar/³⁹Ar методом указывают на юрско-меловой возраст [19]. Однако по геологическим данным более вероятен триасовый возраст, поскольку трубка Перевальная частично перекрыта нижнеюрскими отложениями, к тому же сохранившиеся на данной территории нижнеюрские коллекторы содержат комплекс индикаторных минералов.

Выводы. Использование комплекса критериев оценки возраста по индикаторным минералам из ореолов позволило надёжно обосновать возраст коренных источников для ряда изученных площадей, тем самым выделив из них наиболее перспективные с кимберлитами среднепалеозойского возраста.

На основании проведённого исследования установлено, что на Анабаро-Уджинском междуречье, участках Тарыдак и Мирюга в бассейне р. Подкаменная Тунгуска представлены ИМК, типичные для среднепалеозойских коренных источников, а на Келимярской площади на севере Оленёкского поднятия и в Чомполинском поле – для триасовых. Наиболее перспективной на обнаружение среднепалеозойских алмазоносных кимберлитов является Анабаро-Уджинская площадь (рис. 10).

Работа выполнена в рамках Госзадания ИГМ СО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Афанасьев В. П. Генезис пирамидально-черепитчатого рельефа растворения на гранатах пиропальмандинового ряда // Записки Всесоюзного минералогического общества. – 1985. – Ч. 114, Вып. 1. – С. 73–80.
- Афанасьев В. П. Типизация шлихо-минералогических поисковых обстановок Якутской алмазоносной провинции // Советская геология – 1989. – № 1. – С. 24–33.
- Афанасьев В. П., Агашев А. М., Похиленко Н. П. Основные черты истории и условий формирования ореолов индикаторных минералов кимберлитов Сибирской платформы // Геология рудных месторождений. – 2013. – Т. 55, № 4. – С. 295–304.
- Афанасьев В. П., Зинчук Н. Н. Основные литодинамические типы ореолов индикаторных минералов кимберлитов и обстановки их формирования // Геология рудных месторождений. – 1999. – Т. 41, № 3. – С. 281–288.
- Афанасьев В. П., Зинчук Н. Н., Похиленко Н. П. Морфология и морфогенез индикаторных минералов кимберлитов. – Новосибирск : Издательство СО РАН, филиал «Гео», 2001. – 276 с.

- Афанасьев В. П., Зинчук Н. Н., Похиленко Н. П. Поисковая минералогия алмаза. – Новосибирск : Академическое издательство «Гео», 2010. – 650 с.
- Афанасьев В. П., Николенко Е. И., Лобов К. В., Зольников И. Д., Картозия А. А., Глушкова Н. В. Геологогеоморфологические особенности строения и история формирования Ямалахского горста (южная Якутия) // Отечественная геология. – 2020. – № 6. – С. 80–87
- Афанасьев В. П., Похиленко Н. П., Логвинова А. М., Зинчук Н. Н., Ефимова Э. С., Сафьянников В. И., Красавчиков В. О., Подгорных Н. М., Пругов В. П. Особенности морфологии и состава некоторых хромшпинелидов алмазоносных площадей в связи с проблемой «ложных» индикаторов кимберлитов // Геология и геофизика. – 2000. – Т. 41, № 12. – С. 1729–1741.
- Богатиков О. А., Рябчиков И. Д., Кононова В. А., Махоткин И. Л. Лампроиты: монография. – М. : Наука, 1991. – 301 с.
- 10. Егорова Е. О., Афанасьев В. П., Похиленко Н. П. О среднепалеозойском кимберлитовом магматизме северо-востока Сибирской платформы // Доклады Академии наук. 2016. Т. 470, № 6. С. 692–695.
- Зинчук Н. Н. Коры выветривания и вторичные изменения кимберлитов Сибирской платформы (в связи с проблемой поисков и разработки алмазных

месторождений) // Новосибирск : Издательство Новосибирского университета, 1994. – 240 с.

- Корнилова В. П. Петрография и минералогия известково-щелочных лампрофиров и эруптивных брекчий бассейна р. Чомполо // Отечественная геология. – 1997. – № 9. – С. 6–9.
- Королюк В. Н., Лаврентьев Ю. Г., Усова Л. В., Нигматулина Е. Н. О точности электронно-зондового анализа породообразующих минералов на микроанализаторе JXA-8100 // Геология и геофизика. – 2008. – Т. 49, № 3. – С. 221–225.
- Тычков Н. С., Похиленко Н. П., Кулигин С. С., Малыгина Е. В. Особенности состава и происхождение пиропов аномального состава из лерцолитов (свидетельства эволюции литосферной мантии Сибирской платформы) // Геология и геофизика. – 2008. – Т. 49, № 4. – С. 302–318.
- Харькив А. Д., Волотовский А. Г. О природе скульптур на зернах пиропа из осадочных пород // Минералогический сборник Львовского университета. Вып. 4. – 1968. – № 22. – С. 399–402.

REFERENCES

- Afanas'yev V. P. Genezis piramidal'no-cherepitchatogo rel'yefa rastvoreniya na granatakh pirop-al'mandinovogo ryada [Genesis of the pyramidal-tiled dissolution relief on pyrope-almandine garnets]. Zapiski Vsesoyuznogo mineralogicheskogo obshchestva [Notes of the All-Union Mineralogical Society]. 1985, Ch. 114, Is. 1, P. 73–80. (In Russ.)
- Afanas'yev V. P. Tipizatsiya shlikho-mineralogicheskikh poiskovykh obstanovok Yakutskoy almazonosnoy provintsii [Typization of schlicho-mineralogical prospecting environments of the Yakutsk diamondiferous province]. Sovetskaya geologiya [Soviet geology], 1989, № 1, P. 24–33. (In Russ.)
- Afanas'yev V. P., Agashev A. M., Pokhilenko N. P. Osnovnyye cherty istorii i usloviy formirovaniya oreolov indikatornykh mineralov kimberlitov Sibirskoy platformy [The main features of the history and conditions of formation of aureoles of indicator minerals in kimberlites of the Siberian Platform]. Geologiya rudnykh mestorozhdeniy [Geology of ore deposits], 2013, V. 55, No. 4, P. 295–304. (In Russ.)
- Afanas'yev V. P., Zinchuk N. N. Osnovnyye litodinamicheskiye tipy oreolov indikatornykh mineralov kimberlitov i obstanovki ikh formirovaniya [The main lithodynamic types of aureoles of indicator minerals of kimberlites and their formation environment]. Geologiya rudnykh mestorozhdeniy [Geology of ore deposits], 1999, V. 41, No. 3, P. 281–288. (In Russ.)
- Afanas'yev V. P., Zinchuk N. N., Pokhilenko N. P. Morfologiya i morfogenez indikatornykh mineralov kimberlitov [Morphology and morphogenesis of kimberlite indicator minerals]. Novosibirsk, Geo publ., 2001, 276 p. (In Russ.)

- Шамшина Э. А. Коры выветривания кимберлитовых пород Якутии. – Новосибирск : Наука. – 1979. – 151 с.
- 17. Шпунт Б. Р., Шамшина Э. А. Поздневендские калиевые щелочные вулканиты Оленекского поднятия (северо-восток Сибирской платформы) // Доклады Академии наук СССР. – 1989. – Т. 7, № 3. – С. 678–682.
- Cocks L. R. M., Torsvik T. H. Siberia, the wandering northern terrane, and its changing geography through the Palaeozoic // Earth-Science Reviews. – 2007. – V. 82. – P. 29–74.
- Nikolenko E. I., Lobov K. V., Agashev A. M., Sharygin I. S., Nikolenko A. M. ⁴⁰Ar/³⁹Ar geochronology and new mineralogical and geochemical data from lamprophyres of Chompolo field (South Yakutia, Russia) // Minerals. – 2020. – V. 10, № 10. – P. 886.
- Sobolev N. V., Lavrent'ev Yu. G., Pokhilenko N. P., Usova L. V. Chrome-rich garnets from the kimberlites of Yakutia and their parageneses // Contributions to Mineralogy and Petrology. 1973. V. 40. P. 39–52.
- Afanas'yev V. P., Zinchuk N. N., Pokhilenko N. P. Poiskovaya mineralogiya almaza [Prospecting diamond mineralogy]. Novosibirsk, Geo publ., 2010, 650 p. (In Russ.)
- Afanas yev V. P., Nikolenko Ye. I., Lobov K. V., Zol'nikov I. D., Kartoziya A. A., Glushkova N. V. Geologogeomorfologicheskiye osobennosti stroyeniya i istoriya formirovaniya Yamalakhskogo gorsta (yuzhnaya Yakutiya) [Geological and geomorphological features of the structure and history of the formation of the Yamalakh horst (southern Yakutia)]. Otechestvennaya geologiya [Domestic geology], 2020, No. 6, P. 80–87. (In Russ.)
- Afanas'yev V. P., Pokhilenko N. P., Logvinova A. M., Zinchuk N. N., Yefimova E. S., Saf'yannikov V. I., Krasavchikov V. O., Podgornykh N. M., Prugov V. P. Osobennosti morfologii i sostava nekotorykh khromshpinelidov almazonosnykh ploshchadey v svyazi s problemoy "lozhnykh" indikatorov kimberlitov [Peculiarities of morphology and composition of some chrome-spinels of diamond-bearing areas in connection with the problem of "false" indicators of kimberlites]. Geologiya i geofizika, 2000, V. 41, No. 12, P. 1729–1741. (In Russ.)
- Bogatikov O. A., Ryabchikov I. D., Kononova V. A., Makhotkin I. L. Lamproity: monografiya [Lamproites: monograph]. Moscow, Nauka publ., 1991, 301 p. (In Russ.)
- Yegorova Ye. O., Afanas'yev V. P., Pokhilenko N. P. O srednepaleozoyskom kimberlitovom magmatizme severo-vostoka Sibirskoy platformy [On the Middle Paleozoic kimberlite magmatism of the northeast of the Siberian Platform]. Doklady Akademii nauk, 2016, V. 470, No. 6, P. 692–695. (In Russ.)
- 11. Zinchuk N. N. Kory vyvetrivaniya i vtorichnyye izmeneniya kimberlitov Sibirskoy platformy (v svyazi s problemoy poiskov i razrabotki almaznykh mestorozhdeniy) [Weathering crusts and secondary changes in kimberlites of the Siberian platform (in connection with the problem of prospecting and development of diamond

deposits)]. Novosibirsk, Novosibirsk University publ., 1994, 240 p. (In Russ.)

- 12. *Kornilova V. P.* Petrografiya i mineralogiya izvestkovoshchelochnykh lamprofirov i eruptivnykh brekchiy basseyna r. Chompolo [Petrography and mineralogy of calc-alkaline lamprophyres and eruptive breccias of the river Chompolo]. Otechestvennaya geologiya [Domestic Geology], 1997, No. 9, P. 6–9. (In Russ.)
- Korolyuk V. N., Lavrent'yev Yu. G., Usova L. V., Nigmatulina Ye. N. O tochnosti elektronno-zondovogo analiza porodoobrazuyushchikh mineralov na mikroanalizatore JXA-8100 [On the accuracy of electron probe analysis of rock-forming minerals on a JXA-8100 microanalyzer]. Geologiya i geofizika [Geology and Geophysics], 2008, V. 49, No. 3, P. 221–225. (In Russ.)
- Tychkov N. S., Pokhilenko N. P., Kuligin S. S., Malygina Ye. V. Osobennosti sostava i proiskhozhdeniye piropov anomal'nogo sostava iz lertsolitov (svidetel'stva evolyutsii litosfernoy mantii Sibirskoy platformy) [Compositional features and origin of pyropes of anomalous composition from Iherzolites (evidence of the evolution of the lithospheric mantle of the Siberian Platform)]. Geologiya i geofizika [Geology and Geophysics], 2008, V. 49, No. 4, P. 302–318. (In Russ.)
- 15. *Khar'kiv A. D., Volotovskiy A. G.* O prirode skul'ptur na zernakh piropa iz osadochnykh porod [On the nature of

sculptures on pyrope grains from sedimentary rocks]. Mineralogicheskiy sbornik L'vovskogo universiteta, Is. 4, 1968, No. 22, P. 399–402. (In Russ.)

- 16. *Shamshina E. A.* Kory vyvetrivaniya kimberlitovykh porod Yakutii [Weathering crusts of kimberlite rocks of Yakutia]. Novosibirsk, Nauka publ., 1979, 151 p. (In Russ.)
- Shpunt B. R., Shamshina E. A. Pozdnevendskiye kaliyevyye shchelochnyye vulkanity Olenekskogo podnyatiya (severo-vostok Sibirskoy platformy) [Late Vendian potassium alkaline volcanics of the Olenek uplift (northeast of the Siberian platform)]. Doklady Akademii nauk SSSR [Reports of the Academy of Sciences of the USSR], 1989, V. 7, No. 3, P. 678–682. (In Russ.)
- Cocks L. R. M., Torsvik T. H. Siberia, the wandering northern terrane, and its changing geography through the Palaeozoic. Earth-Science Reviews, 2007, V. 82, P. 29–74.
- Nikolenko E. I., Lobov K. V., Agashev A. M., Sharygin I. S., Nikolenko A. M. ⁴⁰Ar/³⁹Ar geochronology and new mineralogical and geochemical data from lamprophyres of Chompolo field (South Yakutia, Russia). Minerals, 2020, V. 10, No. 10, P. 886.
- Sobolev N. V., Lavrent'ev Yu. G., Pokhilenko N. P., Usova L. V. Chrome-rich garnets from the kimberlites of Yakutia and their parageneses. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1973, V. 40, P. 39–52.

Статья поступила в редакцию 08.07.22; одобрена после рецензирования 08.09.22; принята к публикации 27.09.22. The article was submitted 08.07.22; approved after reviewing 08.09.22; accepted for publication 27.09.22.

DOI:10.47765/0869-7175-2022-10032

УДК 552.3.550.4 (571.6) © Е. В. Нигай, 2022

Базальтоиды острогорского комплекса: геология, возраст, геохимия, геодинамика (Западный Сихотэ-Алинь)

В обзорной аналитической статье приведены важнейшие геологические, геохронологические и геохимические характеристики базальтоидов острогорского комплекса. Некоторые раннемиоценовые датировки возраста острогорских базальтоидов на Госгеолкарте третьего поколения (лист М-53) не были учтены из-за методических соображений, и для большей объективности они приведены автором в данной статье. Базальтоиды острогорского комплекса, как и щелочные базальты аякитского комплекса, относятся к внутриплитным рифтогенным базальтам. Спектры редкоземельных и редких элементов у обоих комплексов имеют большое сходство. Состав базальтоидов острогорского комплекса, как и аякитского, близок к составам базальтов океанических островов и рециклированного компонента, что позволяет предположить их единый мантийно-коровый источник.

Ключевые слова: острогорский комплекс, базальтоиды, микроэлементы, кларки концентраций, Западный Сихотэ-Алинь.

НИГАЙ ЕЛЕНА ВАЛЕНТИНОВНА, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, helenvn54@gmail.com

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт тектоники и геофизики им. Ю. А. Косыгина Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИТиГ ДВО РАН), г. Хабаровск

Basaltoids of the ostrogorsk complex: geology, age, geochemistry, geodynamics (Western Sikhote-Alin)

E. V. NIGAI

Yu. F. Kosygin Institute of Tectonics and Geophysics, FEB RAS, Khabarovsk

This review-analytical article presents the most important geological, geochronological and geochemical characteristics of the basaltoids of the Ostrogorsk complex. Some Early Miocene datings of the age of Ostrogorsk basaltoids on the State Geological Map of the third generation (sheet M-53) were not considered due to methodological considerations and, for greater objectivity, they are given by the author in this article. The basaltoids of the Ostrogorsk complex, like the alkaline basalts of the Ayakit complex, belong to intraplate rift basalts. The spectra of rare earth and rare elements in both complexes are very similar. The composition of basaltoids of the Ostrogorsk and Ayakit complexes is close to the composition of oceanic island basalts and recycled components, which suggests that they have a single mantle-crustal source.

Key words: Ostrogorsk complex, basaltoids, trace elements, concentration clarks, Western Sikhote-Alin.

Район исследований находится в восточном обрамлении Среднеамурской впадины, входящей в состав Западного Сихотэ-Алиня, его центральной части.

Генезису, возрасту, геологии и геохимии неогеновых базальтоидов, выяснению их роли в развитии новейших геологических структур юга Дальнего Востока посвящена обширная литература [3, 19, 4, 6, 11, 14, 15, 17, 21, 24, 26 и др.]. Большое внимание им уделялось и при составлении государственных геологических карт на территорию Сихотэ-Алинской складчатой системы (САСС) и прилегающую к ней восточную часть Буреинского массива [1, 2, 5, 8–10, 12, 13, 20, 22, 25, 29, 30]. Выбранными нами объектами исследований являются базальтоиды острогорского вулканического комплекса, распространённые в восточной части Среднеамурской впадины. По возрасту, петрографо-минералогическому составу и внешнему облику они имеют значительное сходство с щелочными базальтами аякитского комплекса и удурчуканскими андезибазальтами, ареалы которых распространены в восточной части Буреинского массива и прилегающих к нему площадях Западного Сихотэ-Алиня.

Цель исследований – выяснение важнейших геологических, геохронологических и геохимических особенностей базальтоидов острогорского комплекса, интерпретация геодинамических обстановок их формирования, а также сравнение их геохимических характеристик с геохимией миоценовых базальтоидов приграничной восточной части Буреинского массива.

Методика исследований заключалась в сборе, анализе и обработке данных по базальтоидам острогорского комплекса. Составлена схема размещения этого комплекса. Подсчитывались кларки концентраций малых элементов. Производились подборка, построение и интерпретация специальных петрохимических диаграмм, включая диаграммы по геодинамическим обстановкам.

Геологическая позиция базальтоидов острогорского комплекса. Ранее их относили к кизинской свите, образования которой на разномасштабных геологических картах прошлого века показаны как в районах Восточно-Сихотэ-Алинского вулканогенного пояса, так и в пределах Западного Сихотэ-Алиня, включая Среднеамурскую впадину [3, 4, 11, 19, 29]. Комплекс представлен средними и крупными (от 400 до 5000 км²) ареалами платобазальтов и покровами базальтов, распространённых по восточному борту Среднеамурской впадины, в бассейнах правых



Рис. 1. Схема размещения базальтоидов острогорского комплекса. Составила Е. В. Нигай, по данным [5, 10, 26, 29]:

1 – плиоценовые и четвертичные аллювиальные и озёрные отложения; 2 – миоценовые базальтоиды острогорского базальтоидного комплекса; 3–5 – палеогеновые и позднемеловые образования: 3 – вулканиты среднего (*a*) и кислого (*б*) составов, 4 – диориты (*a*), дациты (*б*), 5 – гранитоиды; 6 – комплексы осадочных пород мезозоя и позднего палеозоя; 7 – гнейсы, кварциты, кристаллические сланцы раннего протерозоя; 8 – разломы: *a* – установленные основные: Маноминский (1), Центральный Сихотэ-Алинский (2), *б* – под рыхлыми отложениями, *в* – прочие; 9 – места отбора проб и их номера; 10 – район исследований на врезке



Рис. 2. Схема размещения миоценовых базальтоидов на востоке Буреинского массива. Составила Е. В. Нигай, по данным [5, 8, 9, 20]:

1 – базальты аякитского комплекса, крупный ареал – Аякитское плато (N_1); 2 – андезибазальты Удурчуканского плато (N_1); 3 – алевропелиты, глины, пески, галечники, лигниты (N_1 , N_2); 4 – риолиты, риодациты (K_2); 5 – андезиты, андезидациты (K_2); 6 – диоритовые порфириты иороханского комплекса (K_1); 7 – юрские терригенные и кремнисто-терригенные осадочные породы с примесью туфов (a); юрско-меловые угленосные толщи ургальской серии (b); 8 – гранитоидные комплексы: a – харинский (T_3 – J_1), 6 – тырмо-буреинский (P_3 – T_1), e – суларинский, кивилийский, биробиджанский (\in , O); 9 – кварциты, мраморы, кристаллические сланцы (PR_1) гуджальской свиты; 10 – докембрийские кристаллосланцы, амфиболиты амурской серии и дягдаглейской толщи (a), плагиограниты, гранитогнейсы древнебуреинского комплекса (b) (AR_2 ?); цифры в кружках – разломы: 1 – Тастахский, 2 – Хинганский

притоков рек Амур и Уссури, вдоль Маноминского и вблизи Центрального Сихотэ-Алинского разломов (рис. 1).

Общая протяжённость ареалов платобазальтов и базальтовых покровов описываемого комплекса большая и составляет свыше 460 км при максимальной ширине распространения 75 км. Платобазальты и покровы андезибазальтов слагают в основном водораздельные и приводораздельные пространства и представляют собой наиболее молодые магматические образования Киселевско-Маноминского блока, выделенного в качестве раннемелового террейна [7]. Базальтоиды острогорского комплекса залегают на олигоценовых, эоцен-палеоценовых, меловых и триасовых образованиях центральной части Западного

Сихотэ-Алиня и местами перекрыты позднеплиоценовыми и четвертичными озёрными и аллювиальными отложениями р. Амур и его притоков. Они вскрыты скважинами в разрезах чернореченской, ушумунской, головинской свит в северо-восточной части Среднеамурской впадины. Мощность базальтовых потоков и покровов, задокументированная по керну скважин, составляет от 8 до 100 м. Под острогорскими базальтами в верховьях р. Кия на раннемеловых песчаниках пионерской свиты залегают галечники, уплотнённые глины и угленосные отложения олигоцен-миоценовой ушумунской свиты. Сами базальты перекрыты отложениями плиоценчетвертичной приамурской свиты. Базальты в центре имеют массивный облик, а в кровле и подошве пузыристые, до шлаков. Между отдельными потоками отмечаются слои каолиновых глин и примесь гальки мощностью до 5 м. Иногда отмечаются вулканогенно-осадочные и жерловые образования [13, 29].

В основании острогорской толщи долины среднего течения р. Манома описан разрез: снизу – туфоконгломераты (2 м), туффиты (3 м), туфы (6 м), далее вверх – спёкшиеся туфобрекчии с обломками пузырчатых базальтов (10 м) и выше – поток базальтовой лавы (10 м).

Мощность толщи острогорских базальтоидов вблизи поселков Маяк и Синда составляет от 40 до 50– 60 м. Значительная часть толщи представлена туфами, туффитами, туфовыми агломератами и туфобрекчиями базальтов (3–10 м и более), переслаивающимися с пластами базальтов (1–5 м) и андезибазальтов (1–7 м). Туфовые агломераты, туфы базальтов мощностью до 50 м были вскрыты скважиной в верхней части разреза описываемого комплекса в верховьях р. Пихца [29].

Максимальная мощность миоценовой толщи в восточной части Среднеамурской впадины от р. Манома до р. Хор, по оценке В.Г. Варнавского, ориентировочно составляет 300-600 м [4, с. 84] (видимо, с учётом предполагаемых мощных погребённых толщ, перекрытых позднеплиоценовыми и четвертичными отложениями). По оценке А.Ф. Васькина, мощность образований острогорского комплекса в обрамлении Среднеамурской впадины составляет 250 м [5, с. 117]. Для сравнения очень кратко приведём данные по соседним миоценовым базальтам Буреинского массива. Максимальная мощность толщи аякитских базальтоидов на Аякитском плато площадью 1200 км² (восток Буреинского массива) определена С. Н. Добкиным визуально (от подошвы до кровли) и составляет 300 м [8]. Удурчуканская свита слагает Удурчуканское плато площадью 550 км², мощность удурчуканской толщи 180 м [9]. Аякитское и Удурчуканское плато показаны на рис. 2.

Петрографо-минералогические особенности. В составе острогорских базальтоидов преобладают трахибазальты, субщелочные андезибальты, щелочные базальты, трахиандезибазальты и базальты. Тёмносерые трахибазальты имеют мелкие вкрапленники средних и основных плагиоклазов (андезина, лабрадора, битовнита) размерами от десятых долей мм до 2-3 мм, пироксенов – в виде эгирин-авгита и титан-авгита (1-3 мм) и микрокристаллов оливина (менее 1 мм). В субщелочных оливиновых андезибазальтах наблюдаются: густая вкрапленность мелких кристаллов оливина, от сотых долей мм до 1,5 мм, наличие пироксенов – титан-авгита и эгирин-авгита, размерами 1-2 мм. Калиевые полевые шпаты (ортоклаз, санидин) каймой обрастают плагиоклазы (андезин № 40-50, лабрадор № 52-56, размеры 3-4 мм). Среди других вкрапленников встречаются биотит, иддингсит. Пустоты бывают заполнены кальцитом, халцедоном, анальцимом, цеолитами, хлоритом, эпидотом. Серые с сиреневатым оттенком щелочные базальты отличаются от трахибазальтов и андезибазальтов мелкопорфировым обликом. В порфирах выделяются мелкие кристаллы оливина (хризолит), пироксена (титан-авгит, эгирин-авгит) и плагиоклаза (лабрадор № 52-58 в виде удлинённых табличек размерами до 3-4 мм). Они имеют массивную структуру с густой вкрапленностью оливина и более редкой – пироксена, а также нефелина и лейцита, проросших тонкими тёмными кристаллами авгита и магнетита. В составе острогорского комплекса, по

многим описаниям, доминируют оливин-пироксеновые базальты с частой вкрапленностью мелкозернистых оливинов и пироксенов [10, 13, 29]. В аякитском же комплексе доминируют щелочные базальты и трахибазальты [8]. Основную часть вкрапленников в них составляют мелкие кристаллы оливина, меньшую – пироксены (титан-авгит) и плагиоклазы (лабрадор, битовнит, андезин). Поры в базальтах либо пустые, либо заполнены цеолитами, анальцимом, халцедоном, шабазитом. В удурчуканской свите преобладают андезибазальты и андезиты, но есть и трахибазальты, и базальты. Андезибазальты массивные мелкозернистые тёмно-серого цвета, большая часть вкрапленников представлена андезином и лабрадором, присутствуют также ортоклаз, анортоклаз, оливин, пироксены (титан-авгит и эгирин-авгит). Структура андезитов более крупнозернистая в отличие от базальтов и андезибазальтов. Вверх по разрезу увеличивается основность эффузивов – от андезитов до андезибазальтов и трахибазальтов [1, 2, 9].

Радиологические датировки возраста. Потоки и покровы острогорских базальтоидов залегают на раннемеловых осадочных образованиях пионерской, пиванской и горнопротокской свит, палеоцен-эоценовых андезитах моадийской толщи, а также среди олигоцен-раннемиоценовых отложений ушумунской и головинской свит.

В табл. 1 приведены радиологические датировки базальтоидов острогорского комплекса, полученные К-Аг методом [1, 2, 9, 10; Кузьменко, 1979] и методом

Название	Места отбора проб	Возраст, млн лет						
Буреинский массив (БМ)								
Аякитский комплекс	Аякитское плато	10,0 [1, 2]; 9,68 ; 9,3 [8] (поздний миоцен)						
Удурчуканская свита	Удурчуканское плато	22,6; 22,3; 22,1; 18,6 (ранний миоцен) [9]						
Сихотэ-Алинская складчатая система (САСС)								
Острогорский комплекс	Бассейн р. Манома	9,5; 8,1 (поздний миоцен) [21]						
Острогорский комплекс	Бассейн р. Кия	11,0; 8,6; 8,5; 7,4; 4,8; 4,3; 4,1 (поздний миоцен, ранний плиоцен) [21]						
Острогорский комплекс	Верховья р. Тормасу, верховье р. Сооли, р. Тормасу, р. Анюй	18; 17; 13; 12 (ранний миоцен, средний миоцен) [10]						
Острогорский комплекс	Северо-восточный участок Среднеамурской впадины	24; 22 (поздний олигоцен, ранний миоцен) [Кузьменко, 1979]						
Аякитский комплекс	пос. Солнечный (Комсомольский оловорудный район)	14,8; 13,0 (средний миоцен) [21]						

1. Радиологические датировки миоценовых базальтоидов БМ и САСС

Компоненты	130	132	141	142	144	146	147	148	153
Петрогенные оксиды, %									
SiO ₂	53,30	51,06	46,25	46,92 48,7 52,54 50,51 44,95		44,95	52,4		
TiO ₂	1,66	1,49	2,39	1,82	2,01	2,24	2,11	2,09	2,3
Al ₂ O ₃	15,10	14,72	13,95	14,12	14,45	14,30	14,01	13,25	15,5
Fe ₂ O ₃	1,86	3,73	5,06	5,36	2,59	1,22	3,15	2,02	2,3
FeO	8,40	6,40	6,11	6,00	8,27	8,76	6,98	8,23	7,6
MnO	0,13	0,10	0,13	0,19	0,14	0,11	0,09	0,14	0,2
MgO	7,00	7,37	7,97	7,66	8,94	6,82	7,00	9,63	5,4
CaO	7,44	7,55	9,14	8,68	8,01	7,42	7,46	6,58	7,6
Na ₂ O	3,28	3,46	4,64	5,28	3,24	3,30	3,15	4,23	3,6
K ₂ O	0,98	0,46	0,80	1,11	1,90	1,62	1,54	1,70	1,9
P ₂ O ₅	0,32	0,28	0,71	0,72	0,46	0,48	0,45	0,85	0,5
H ₂ O ⁻	1,07	1,55	0,63	0,20	0,18	0,23	1,30	0,28	0,3
H_2O^+	1,80	2,16	2,75	1,87	0,95	0,97	1,95	6,24	0,8
Сумма	102,34	100,33	100,53	99,93	99,84	100,01	99,70	100,19	100,3
				Микроэлем	енты, мкг/г				
Sc	20,4/0,7	21,3/0,7	14,8/0,5	19,1/0,6	16,5/0,5	20,0/0,7	20,4/0,7	14,6/0,5	17,0/0,6
Rb	17,1/0,3	7,1/0,1	35,2/0,7	53,9/1,1	25,8/0,5	24/0,5	30,7/0,6	36,8/0,7	21,5/0,4
Sr	586/1,2	595/1,3	650/1,4	911/1,9	507/1,1	536/1,2	573/1,2	1030/2,2	743/1,6
Y	20,0/0,7	20,6/0,7	20,6/0,7	23,7/0,9	21,7/0,8	21,0/0,7	21,7/0,8	24,5/0,9	22,8/0,8
Zr	127/0,8	119/0,8	165/1,1	188/1,2	141/0,9	154/1,0	207/1,4	219/1,5	214/1,4
Nb	18,6/2,6	17,3/2,5	62/8,8	76,0/10,8	31,2/4,4	23,9/3,4	26,4/3,8	78/11,1	32/14,5
Sn	1,56/0,8	1,30/0,6	1,37/0,6	1,10/0,5	1,02/0,5	1,37/0,7	1,44/0,7	2,08/1,0	1,0/0,5
Cs	0,12/0,1	0,12/0,1	0,49/0,5	0,84/0,8	0,56/0,6	0,43/0,4	0,20/0,2	0,71/0,7	0,2/0,2
Ва	252/0,8	243/0,8	324/1,1	445/1,5	346/1,2	470/1,6	440/1,5	765/2,6	648/2,2
La	14,2/0,8	12,8/0,7	32,1/1,9	53,6/3,1	23,2/1,4	25,2/1,5	21,8/1,3	57,5/3,4	31,0/1,8
Ce	29,4/0,9	27,0/0,9	56,4/1,8	91,2/2,9	43,7/1,4	47,6/1,5	42,9/1,4	114,9/3,7	65,0/2,1
Pr	3,90/1,1	3,65/0,9	6,14/1,6	9,34/2,5	4,64/1,2	6,78/1,8	5,09/1,4	14,05/3,8	7,6/2,0
Nd	18,6/1,2	18,4/1,1	28,0/1,7	36,2/2,3	21,4/1,3	35,3/2,2	28,1/1,7	62,9/3,9	33,6/2,1
Sm	4,29/1,1	4,75/1,2	5,90/1,5	6,75/1,7	5,19/1,3	6,78/1,7	7,05/1,7	10,32/2,6	7,1/1,8
Eu	1,55/1,0	1,58/1,0	1,95/1,3	2,03/1,3	1,77/1,2	2,18/1,4	2,24/1,5	2,66/1,8	2,2/1,4
Gd	4,47/0,9	4,59/0,9	7,37/1,5	5,66/1,2	5,27/1,1	6,90/1,5	6,37/1,3	6,34/1,3	6,0/1,3
Tb	0,69/0,9	0,71/1,0	1,11/1,5	0,95/1,3	0,88/1,2	1,14/1,6	1,07/1,5	0,94/1,3	0,9/1,3
Dy	3,56/0,7	3,75/0,7	5,44/1,1	4,33/0,8	4,53/0,9	4,97/0,9	5,21/1,0	4,70/0,9	4,5/0,9
Но	0,63/0,5	0,67/0,5	0,96/0,8	0,81/0,7	0,87/0,7	1,02/0,8	0,91/0,7	0,95/0,8	0,8/0,7
Er	1,59/0,5	1,71/0,6	2,41/0,8	2,01/0,7	2,06/0,7	2,54/0,8	2,47/0,8	2,56/0,8	2,1/0,7
Tm	0,24/0,9	0,28/1,1	0,39/1,5	0,35/1,4	0,34/1,4	0,35/1,4	0,35/1,4	0,34/1,4	0,3/1,2
Yb	1,22/0,6	1,44/0,7	2,08/1,0	1,61/0,8	1,61/0,8	1,76/0,9	1,81/0,9	1,73/0,8	1,5/0,7
Lu	0,18/0,4	0,21/0,4	0,28/0,5	0,22/0,4	0,22/0,4	0,27/0,5	0,24/0,5	0,29/0,6	0,2/0,4
Hf	2,69/0,9	2,72/0,9	4,56/1,5	4,20/1,4	3,29/1,1	4,96/1,6	5,08/1,7	5,08/1,7	4,9/1,6
Та	0,95/0,9	0,95/0,9	4,32/4,3	4,14/4,1	2,33/2,3	1,84/1,8	1,46/1,5	4,76/4,8	1,7/1,7
Pb	3,3/0,5	3,1/0,5	3,8/0,6	5,30/0,8	4,1/0,7	4,1/0,7	3,9/0,6	7,1/1,2	7,9/1,3
Th	1,74/0,9	1,57/0,8	6,06/3,3	7,08/3,9	4,09/2,3	2,75/1,5	2,75/1,5	7,49/4,2	3,1/1,7
U	0,50/0,8	0,45/0,8	1,64/2,7	1,86/3,1	1,09/1,8	0,72/1,2	0,66/1,1	1,73/2,9	0,6/1,0

2. Химический и микроэлементный состав базальтоидов острогорского комплекса

Примечание. 130, 132, 141 – бассейн р. Манома; 142, 144 – пос. Маяк; 146–148, 153 – бассейн р. Немта; исходные данные по [21]; числитель – содержание, знаменатель – кларк концентрации (Кк); кларки для основных пород по [28]; выделены содержания выше кларковых значений и Кк > 1.

Компоненты	134	135	136	137	12	1	3		
Петрогенные оксиды, %									
SiO,	48,37	46,19	48,37	49,58	44,02	44,28	44,44		
TiO,	1,92	2,11	1,82	1,59	2,37	2,36	2,42		
Al ₂ O ₃	15,45	14,07	14,37	14,07	13,75	13,45	13,80		
Fe ₂ O ₃	2,50	2,18	2,67	3,01	3,04	5,33	5,60		
FeO	7,80	8,94	8,26	7,93	7,88	5,69	5,62		
MnO	0,13	0,15	0,13	0,12	0,17	0,17	0,15		
MgO	7,70	9,82	9,70	8,43	10,38	10,22	10,02		
CaO	8,27	8,12	7,62	7,36	8,50	8,59	8,10		
Na ₂ O	3,07	2,64	2,90	3,18	4,07	4,17	4,25		
K,0	1,36	1,65	1,41	1,19	3,89	3,79	3,63		
P_2O_5	0,36	0,49	0,36	0,28	1,14	1,16	1,18		
H ₂ O ⁻	0,42	0,55	0,52	1,05	0,08	0,12	0,32		
H ₂ O ⁺	2,77	3,58	2,44	1,95	0,96	1,11	0,93		
Сумма	100,12	100,49	100,57	99,74	100,25	100,44	100,46		
Микроэлементы, мкг/г									
Sc	24,4/0,8	22,8/0,7	27,1/0,9	25,0/0,8	18,3/0,6	18,6/0,6	23,0/0,7		
Rb	15,0/0,3	26,4/0,5	19,7/0,4	19,5/0,4	50,3/1,0	52,4/1,0	56,3/1,1		
Sr	547/1,2	910/2,0	584/1,3	424/0,9	1102/2,4	1109/2,4	1274/2,7		
Y	21,1/0,8	20,5/0,7	23,1/0,8	23,5/0,9	26,2/0,9	26,4/0,9	28,8/1,1		
Zr	159/1,1	197/1,3	175/1,2	144/0,9	261/1,7	261/1,7	278/1,8		
Nb	22,6/3,2	41,3/5,9	27,9/4,0	22,8/3,2	79/11,3	80/11,4	87/12,4		
Sn	1,42/0,7	1,67/0,8	1,47/0,7	1,12/0,5	1,64/0,8	1,89/0,9	2,09/1,0		
Cs	0,25/0,2	0,46/0,5	0,18/0,2	0,26/0,3	0,97/0,97	0,90/0,9	1,03/1,0		
Ва	182/0,6	292/1,0	242/0,8	200/0,7	679/2,3	689/2,4	739/2,5		
La	16,6/0,9	24,1/1,5	19,2/1,1	26,7/1,6	61,4/3,6	61,4/3,6	64,6/3,8		
Ce	35,4/1,1	49,6/1,6	40,8/1,3	44,9/1,4	112,5/3,6	114,5/3,7	119,8/3,8		
Pr	4,57/1,2	5,91/1,6	5,22/1,4	5,08/1,3	13,78/3,7	13,86/3,7	14,53/3,9		
Nd	19,9/1,2	26,1/1,6	25,4/1,6	21,4/1,3	50,7/3,2	50/3,2	56,5/3,5		
Sm	4,46/1,1	5,4/1,3	5,38/1,3	4,69/1,3	9,46/2,3	9,60/2,4	10,17/2,5		
Eu	1,46/0,9	1,73 /1,1	1,60 /1,0	1,40/0,9	2,93/1,9	3,07/2,0	2,95/2,0		
Gd	4,80/1,0	4,92 /1,0	4,80/1,0	4,83/1,0	7,79/1,6	7,92/1,7	7,68/1,6		
Tb	0,68/0,9	0,73/1,0	0,79/1,1	0,74/1,0	1,10/1,5	1,16/1,5	1,30/1,8		
Dy	3,57/0,7	3,59/0,7	4,15/0,8	3,43/0,7	5,39/1,1	5,55/1,1	5,86/1,2		
Но	0,65/0,5	0,62/0,5	0,71/0,6	0,60/0,5	0,87/0,7	0,86/0,7	0,98/0,8		
Er	1,72/0,6	1,54/0,5	1,75/0,6	1,68/0,6	2,32/0,8	2,45/0,8	2,75/0,9		
Tm	0,25/1,0	0,23/0,9	0,29/1,2	0,30/1,2	Н. о.	Н. о.	0,32/1,3		
Yb	1,38/0,7	1,20/0,6	1,47/0,7	1,67/0,8	1,78/0,9	1,82/0,9	1,98/1,0		
Lu	0,17/0,3	0,17/0,3	0,19/0,4	0,22/0,4	0,25/0,5	0,25/0,5	0,30/0,6		
Hf	3,12/1,0	3,93/1,3	3,51/1,2	3,03/1,0	6,03/2,0	5,99/2,0	6,47/2,1		
Та	1,14/1,1	2,03/2,0	1,53/1,5	1,32/1,3	4,71/4,7	4,58/4,6	4,59/4,6		
Pb	3,5/0,6	3,7/0,6	4,0/0,7	3,9/0,6	4,8/0,8	4,7/0,8	6,9/1,1		
Th	2,07/1,1	3,15/1,7	2,61/1,4	2,76/1,5	7,02/3,9	6,85/3,8	7,47/4,1		
U	0,71/1,2	0,99/1,6	0,79/1,3	0,65/1,1	1,79/3,0	1,81/3,0	2,16/3,6		

3. Химический и микроэлементный состав базальтов аякитского комплекса

Примечание. 134–137 – базальты пос. Солнечный; 12, 1, 3 – базальты оз. Болонь; исходные данные, по [21]; числитель – содержание, знаменатель – кларк концентрации (Кк); выделены содержания выше кларковых и Кк >1; кларки для основных пород, по [28]. Н. о. – не обнаружено.

⁴⁰Ar/³⁹Ar [21] с полным плавлением образца (биотитов) в лаборатории геохронологии университета г. Киото (Япония).

По В.И. Дымовичу [10], кизинские базальты (ныне острогорские) в долинах рек Анюй и Тормасу (Западный Сихотэ-Алинь) датируются **18**, **17** Ма (ранний миоцен) и **13**, **12** Ма (средний миоцен).

На северо-востоке Среднеамурской впадины, в районе верховьев р. Манома две пробы острогорских базальтоидов, по неопубликованным фондовым данным С.П. Кузьменко (1979), также показали раннемиоценовый возраст – **24** и **22** Ма (поздний олигоцен – ранний миоцен), он совпадает с раннемиоценовым удурчуканским магматизмом: **22,6, 22,3, 22,1, 18,6** Ма [9] (табл. 1).

4.	Химический	состав	И	элементы-примеси	В	андези
ба	ізальтах удурч	уканско	рЙ	СВИТЫ		

Компонент	SA-40	SA-41	SA-42	SA-43					
Петрогенные оксиды, %									
SiO ₂ (%)	55,46	57,24	54,77	57,25					
TiO ₂	1,89	1,60	1,97	1,49					
Al ₂ O ₃	15,16	15,65	15,29	15,50					
FeOt	8,37	7,78	9,00	8,71					
MnO	0,11	0,12	0,12	0,13					
MgO	3,97	4,57	4,35	4,26					
CaO	5,58	6,37	6,11	6,54					
Na ₂ O	3,86	3,77	3,67	3,84					
K ₂ O	3,38	1,66	2,95	1,25					
P ₂ O ₅	0,62	0,29	0,57	0,24					
Σ	98,41	99,06	98,80	99,21					
	Микроз	элементы,	мкг/г						
Ва	1080/3,7	526/1,8	919/3,1	328/1,1					
Nb	40/5,7	12/1,7	32/4,6	8/1,1					
Ni	74/0,9	101/1,3	78/1,0	106/1,3					
Pb	6/1,0	4/0,7	6/1,0	3/0,5					
Rb	74/1,5	31/0,6	54/1,1	25/0,5					
Sr	839/1,8	502/1,1	861/1,9	346/0,7					
Th	4/2,2	2/1,1	4/2,2	2/1,1					
Y	15/0,5	17/0,6	17/0,6	17/0,6					
Zr	200/1,3	131/0,9	188/1,2	143/0,9					

Примечание. Числитель – содержание, знаменатель – Кк; выделены содержания выше кларковых и Кк > 1; кларки для пород основного состава, по [28]; исходные данные, по [9].

Г.И. Харитонычев по поводу возраста исследуемых базальтов в бассейнах рек Манома, Анюй, Пихца, Картанга и Мухен писал, что на смежных территориях по породам кизинской (ныне острогорской) свиты широко развиты каолиновые коры выветривания. Возраст их был определён по большому сходству с миоценовыми флорами *верхнедуйской* и *агневской свит* о-ва Сахалин как миоценовый. Коры выветривания острогорских базальтов (4– 7 м) перекрывают олигоцен-миоценовую чернореченскую свиту, охарактеризованную палинологически и вскрытую скважиной в северо-восточном обрамлении Среднеамурской впадины на глубине 157 м [29].

Вспышки острогорского магматизма происходили, вероятнее всего, в четыре этапа. Первый – ранний миоцен, бассейны рек Анюй и Тормасу - 18-17 Ма, по В.А. Дымовичу [10]. Имеет право на существование ещё более ранний, олигоцен-раннемиоценовый, интервал датирования, по А. П. Кузьменко (1979) – 24–22 Ma. *Второй* – средний миоцен, междуречье Сооли и Тормасу, вблизи Центрального Сихотэ-Алинского разлома – 13–12 Ма [10]. Третий – поздний миоцен, бассейны рек Манома, Пихца, Кия -9,5-7,4 Ма [21]. Четвёртый – раннеплиоценовый – 4,8-4,1 Ма [21] – бассейн р. Кия. Аякитские вспышки вулканизма (средний и поздний миоцен) на востоке Буреинского массива и прилегающей части САСС проявились в меньшей степени по сравнению с острогорскими, а удурчуканский магматизм (ранний миоцен) проявился ещё слабее, чем аякитский (см. табл. 1).

Особенности химического состава. Химический и микроэлементный составы базальтоидов острогорского комплекса представлены в табл. 2.

Для сравнения приведены данные по химическому и микроэлементному составам базальтов аякитского комплекса (таблицы 3 и 5) и удурчуканской свиты (табл. 4).

Как видно из таблиц, содержания SiO_2 в острогорских базальтоидах составляют от 44,9 до 53,3 % (см. табл. 2), а в аякитских базальтах – 44,0–49,6 % (см. табл. 3). Наиболее насыщены кремнезёмом андезибазальты удурчуканской свиты: SiO_254 ,7–57,2 % (см. табл. 4).

Ранее, при исследовании щелочных базальтов аякитского комплекса, нами было установлено (см. табл. 5), что в двух проанализированных в ИТиГ ДВО РАН пробах содержатся высокие Кк теллура (578,0– 578,5) и серебра (28,5–172,7), а также повышенные Кк ниобия (3,9–6,2), тантала (2,1–2,6), тория (2,2– 2,7) и урана (1,8–2,4), Ве (3,4–3,6), Р (1,7–2,4), Мо (1,5–2,6), Ni (1,4–1,5), Sr (1,8–2,7), Нf (2,5), лёгких и средних РЗЭ (1,1–2,2) [16].

Элемент	8144	8146	Элемент	8144	8146	Элемент	8144	8146
Li	9,03/0,4	9,22/0,5	Y	18,82/0,7	21,84/0,8	Tb	0,83/1,2	1,06/1,5
Be	1,35/3,4	1,46/3,6	Zr	166,9/1,1	222,27/1,5	Dy	4,64/0,9	5,74/1,1
В	4,14/0,8	5,37/1,1	Nb	27,16/3,9	43,73/6,2	Но	0,85/0,7	1,03/0,9
Р	2154,1/1,7	3000,7/2,4	Мо	1,89/1,5	3,38/2,6	Er	2,31/0,8	2,82/0,9
Sc	21,51/0,7	22,31/0,7	Ag	2,85/28,5	17,28/172,7	Tm	0,26/0,1	0,32/0,1
Ti	11369,7/1,0	15187,3/1,4	Cd	0,06/0,3	0,10/0,5	Yb	1,81/0,9	2,28/1,1
V	181,76/0,6	197,01/0,7	Sn	1,33/0,7	1,70/0,8	Lu	0,23/0,5	0,29/0,6
Cr	269,35/1,2	226,73/0,6	Sb	0,19/0,5	0,04/0,1	Hf	4,81/2,5	6,25/2,5
Mn	1615,05/1,1	1380,79/0,9	Te	4,05/578,5	4,05/578,0	Та	2,14/2,1	3,43/2,6
Со	42,58/1,4	41,56/1,4	Cs	0,28/0,3	0,41/0,4	W	1,15/1,1	1,28/1,3
Ni	109,84/1,4	123,20/1,5	Ba	316,061,1	330,3/1,1	Re	0,001/0,0	0,001/0,0
Cu	39,28/0,4	51,04/0,6	La	21,77/1,3	32,85/1,9	Hg	0,03/0,8	0,08/2,6
Zn	107,51/1,3	111,58/1,3	Ce	48,12/1,5	68,65/2,2	Tl	0,001/0,0	0,001/0,0
Ga	19,96/1,1	22,95/1,3	Pr	5,95/1,6	8,20/2,2	Pb	5,62/0,9	5,88/1,0
Ge	1,25/0,8	1,34/0,9	Nd	26,26/1,6	35,60/2,2	Bi	0,01/0,2	0,03/0,5
As	3,77/1,9	3,51/1,7	Sm	5,89/1,5	7,65/1,9	Th	3,90/2,2	4,93/2,7
Rb	29,69/0,6	25,31/0,5	Eu	1,95/1,3	2,43/1,6	U	1,05/1,8	1,45/2,4
Sr	1041,6/2,7	833,50/1,8	Gd	6,85/1,5	8,82/1,9	Всего: 53 элемента		

5. Содержания (г/т) и Кк элементов-примесей в базальтах Аякитского плато

Примечание. **8144; 8146** – номера проб базальтов; числитель – содержание, знаменатель – Кк; выделены содержания выше кларковых и Кк > 1; кларки для пород основного состава, по [28]; анализы выполнены методом ISP-MS в лаборатории ИТиГ ДВО РАН А. В. Штаревой и А. Ю. Лушниковой в 2017 г.; исходные данные автора [19].

Петрохимические диаграммы и их интерпретация. Острогорские базальтоиды занимают на классификационной TAS-диаграмме, по [18], преимущественно поля щелочных базальтов и трахибазальтов, меньшее их количество – поля трахиандезибазальтов, андезибазальтов и базальтов (см. рис. 3, А).

На диаграмме K₂O–Na₂O, по [36] и др., (см. рис. 3, Б) точки, характеризующие калий-натриевые соотношения в породах острогорского комплекса, размещаются большей частью в поле известково-щелочной и в малом количестве шошонит-латитовой серий.

На диаграмме K₂O–Na₂O, по [35], (см. рис. 3, В) большая часть фигуративных точек острогорского комплекса попала в поле умереннокалиевой серии, две – в поле высококалиевой и две – в поле низкокалиевой серии.

Для детального рассмотрения показателей химического состава острогорского комплекса, на основе данных табл. 2, нами выстроены *вариационные диаграммы* (рис. 4). Для сравнения привлечены также данные таблиц 3 и 4.

Средние и повышенные концентрации TiO₂ у острогорских базальтов (от 1,5 до 2,4%) приближаются

к их значениям в аякитских базальтах – 1,8–2,4% (см. табл. 3). Удурчуканских андезибазальты менее титанистые (TiO, 1,4–1,9%) (см. табл. 4).

Острогорские вулканиты – это породы с повышенной глинозёмистостью, характерной для щелочных базальтов. По содержанию Al₂O₃ (13,2–15,5%) они близки как к аякитским базальтам (13,4–15,4%), так и к более глинозёмистым удурчуканским андезибазальтам (13,9–15,6%).

По суммарному железу (9,9–11,3%) острогорские базальтоиды ближе к железистым аякитским базальтам (FeO_{общ} 12,5%) – оба комплекса насыщены железо-магниевым оливином. Коэффициент окисленности железа (Fe₂O₃/FeO) для острогорских и аякитских пород варьирует от 0,25 до 1,0. В удурчуканских породах сумма оксидов железа значительно меньше (7,7–9,0%), а отношение Fe₂O₃/FeO варьирует от 0,5 до 1,1.

По степени магнезиальности пород (7,0–9,6%) острогорские базальтоиды на 1–2% уступают высокомагнезиальным оливиновым базальтам аякитского комплекса (8,4–10,3%), что объясняется более высокой насыщенностью аякитских пород оливином



Рис. 3. Классификационные диаграммы для пород острогорского комплекса:

A – TAS-диаграмма Na₂O + K₂O–SiO₂ для вулканических пород [18]; Б – разделение вулканитов по содержанию K₂O–SiO₂, границы, по [35]; В – разделение вулканитов по соотношениям K₂O/Na₂O, границы, по [36]

и кальций-магниевыми пироксенами (титан-авгит, эгирин-авгит, диопсид). Удурчуканские андезибазальты по сравнению с ними гораздо менее магнезиальны, содержания в них MgO варьируют от 2,0 до 5,4% (см. табл. 4).

Острогорские вулканиты по концентрации CaO (до 9,1%) близки к аякитским (7,3–8,5%), так как в составе обоих комплексов доминируют вкрапленники основных кальциевых плагиоклазов (лабрадор и битовнит). Удурчуканские андезибазальты с преобладанием среднего плагиоклаза (андезина) содержат гораздо меньшее количество CaO (5,5–6,5%).

В острогорском комплексе отмечается большой контраст содержаний оксидов натрия и калия – Na₂O больше K₂O в 3 раза. В аякитских базальтах отношения их составляют 2:1. Исключение составили высококалиевые аякитские щелочные базальты оз. Болонь, в которых Na₂O:K₂O = 4:3 (см. табл. 3). В удурчуканских андезибазальтах также отмечается преобладание оксида натрия над оксидом калия, но в 1,5 раза (см. таблицы 2, 3, 4).

По концентрации $P_2O_50,28-0,85\%$ (см. табл. 2) острогорские породы уступают аякитским – 0,28–1,18%.



Рис. 4. Вариационные диаграммы для пород острогорского комплекса, по [23]



Рис. 5. Спектры распределения РЗЭ, нормированных по хондриту (А), и редких элементов по отношению к примитивной мантии (Б) в породах острогорского комплекса. Состав РЗЭ и примитивной мантии, по [33]

Спайдер-диаграммы. Спектры распределения РЗЭ по отношению к хондриту в базальтоидах острогорского (рис. 5, А) и аякитского комплексов (рис. 6, А) имеют схожие тренды, они характеризуются плавным понижением значений от лёгких РЗЭ к средним и тяжёлым и отсутствием европиевого минимума, что свойственно для базальтов континентальных рифтовых зон. При этом аякитские породы характеризуются более дифференцированными соотношениями лёгких, средних и тяжёлых РЗЭ из-за значительных различий их концентраций (см. рис. 6, А).

Спектры распределения редких элементов по отношению к примитивной мантии для острогорского (см. рис. 5, Б) и аякитского комплексов (см. рис. 6, Б) также имеют схожие тренды. Наблюдаются общие для обоих комплексов максимумы литофильных элементов – U, Th, Nb, Ta, Rb, Ba, Sr, а также минимумы – для Yb, Lu (HREE).

Геодинамические обстановки. Диаграмма FeO_{общ}– MgO, по [27], (рис. 7, А) показывает, что фигуративные точки острогорских базальтоидов располагаются в области внутриплитных базальтов MORB. На диаграмме Th/La–La/Yb, по [31], (см. рис. 7, Б) фигуративные точки комплекса приближены к району Гавайских островов. Во всех типах рассматриваемых базальтоидов отмечаются низкие соотношения



Рис. 6. Спектры распределения РЗЭ, нормированных по хондриту (А) и редких элементов по отношению к примитивной мантии (Б) в породах аякитского комплекса:

1 – Аякитское плато; 2 – пос. Солнечный; 3 – оз. Болонь; состав РЗЭ и примитивной мантии, по [33]

Zr/Nb и Nb/Th, по [32], по составу они близки к составам океанических островов OIB и рециклированного компонента REC (см. рис. 7, В), что позволяет предположить их смешанный мантийно-коровый источник. На диаграмме, по [34], Zr/Y–Zr (см. рис. 7, Г) основная часть фигуративных точек острогорского комплекса размещается в области внутриплитных рифтогенных базальтов WPB. Аякитские щелочные базальты востока Буреинского массива и части САСС также относятся к внутриплитным рифтогенным базальтам, обязанным своим происхождением окраинно-континентальному рифтогенезу вдоль зон глубинных разломов, их состав также достаточно близок к составам базальтов океанических островов и рециклированного компонента.

В заключение отметим, что крупные ареалы базальтоидов острогорского комплекса, приуроченные к зонам глубинных разломов, свидетельствуют о продолжительном и мощном миоценовом вулканизме вдоль восточного борта Среднеамурской впадины. Острогорский магматизм проявился, вероятнее всего, в четыре этапа. Первый – раннемиоценовый (18–17 Ма), второй – среднемиоценовый (13–12 Ма), третий – позднемиоценовый (11,0–9,5; 8,6–7,4 Ма) и четвёртый – раннеплиоценовый (4,6– 4,1 Ма).



Рис. 7. Геодинамические обстановки формирования базальтоидов острогорского комплекса:

1 — острогорский комплекс; 2 — геодинамические обстановки; А — FeO_{общ} — MgO [27], Б — Th/Ta—La/Yb [31], В — Zr/Nb—Nb/Th [32], Г — Zr/Y—Zr [34]; IAB, ARC — базальты островных дуг, MORB, N-MORB — базальты срединно-океанических хребтов, OIB — базальты океанических островов, OPB — базальты океанических плато, DM — деплетированная мантия, PM — примитивная мантия, DEP — глубинная деплетированная мантия, REC — рециклированный компонент, EN — обогащённый компонент, WPB — внутриплитные базальты

К важным геохимическим особенностям базальтоидов острогорского комплекса относятся повышенные содержания Mg, Ti, Fe, Ca, Na. Это характерно и для базальтов аякитского комплекса. Оба комплекса имеют повышенные содержания литофильных элементов: крупноионных Ba, Sr, высокозарядных Ta, Nb, Zr, Hf, радиоактивных Th, U, лёгких P3Э. Значения Кк тантала в породах острогорского комплекса достигают 4,1–4,8 (у аякитского – 4,6–4,7), а ниобия – до 10,8–14,5 (у аякитского – 5,9–12,4). Спектры распределения P3Э по отношению к хондриту у острогорских и аякитских пород имеют большое сходство,

оба характеризуются наклонными слабоизвилистыми линиями и плавным понижением значений от лёгких РЗЭ к средним и тяжёлым. Спектры распределения редких элементов по отношению к примитивной мантии у острогорских и аякитских пород имеют слабодифференцированный характер и близкие тренды.

Базальтоиды острогорского комплекса Западного Сихотэ-Алиня, как и аякитские базальты востока Буреинского массива, относятся к внутриплитным базальтам, обязанным своим происхождением окраинно-континентальному рифтогенезу вдоль зон глубинных разломов. Состав базальтоидов острогорского комплекса, как и щелочных базальтов аякитского комплекса, близок к составам базальтов океанических островов и рециклированного компонента, что позволяет предположить их единый мантийно-коровый источник.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Анойкин В. И. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:200 000. Изд. 2-е. Серия Буреинская. Лист М-53-VIII (Чегдомын). Объяснительная записка. – СПб. : Картфабрика ВСЕГЕИ, 2002. – 123 с.
- Анойкин В. И., Заблоцкий Е. М. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:200 000. Изд. 2-е. Серия Буреинская. Лист М-53-XIV. Объяснительная записка. – СПб. : Картфабрика ВСЕГЕИ, 2004. – 102 с.
- Ахметьев М. А., Ботылева М. П. Неоген-четвертичные андезито-базальты Восточного Сихотэ-Алиня // Петрология неоген-четвертичных базальтоидов северозападного сектора Тихоокеанского подвижного пояса. – М. : Недра, 1971. – С. 13–47.
- 4. Варнавский В. Г., Седых А. К., Рыбалко В. И. Палеоген и неоген Приамурья и Приморья. Владивосток : ДВО АН СССР, 1988. 184 с.
- Васькин А. Ф., Дымович В. А., Атрашенко А. Ф. [и др.] Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Дальневосточная. Лист М-53. (Хабаровск). Объянительная записка. – СПб. : Картфабрика ВСЕГЕИ, 2009. – 376 с.
- Вулканогенное оруденение на Дальнем Востоке / Отв. ред. Б. И. Бурдэ, В. Н. Воеводин. – Владивосток : ДВНЦ, 1980. – 136 с.
- Голозубов В. В. Тектоника юрских и нижнемеловых комплексов северо-западного обрамления Тихого океана. – Владивосток : Дальнаука, 2006. – 239 с.
- Добкин С. Н. Государственная геологическая карта Российской Федерации (2-е издание). Масштаб 1:200 000. Лист М-53-XIII. Буреинская серия. Объяснительная записка. – СПб. : Картфабрика ВСЕГЕИ, 2015. – 384 с.
- Добкин С. Н., Новосёлов Б. А., Бородин А. М., Грачева В. Т. Государственная геологическая карта Российской Федерации (2-е изд.). Масштаб 1:200 000. Лист М-52-XXX. Буреинская серия. Объяснительная записка. – СПб. : Картфабрика ВСЕГЕИ, 2000. – 236 с.
- Дымович В. А. Государственная геологическая карта СССР масштаба 1:200 000. Лист М-53-XXX. Объяснительная записка. – М.: Союзгеолфонд, 1987. – 111 с.
- Есин С. В., Прусевич А. А., Кутолин В. А. Позднекайнозойский вулканизм и глубинное строение Восточного Сихотэ-Алиня. – Новосибирск : ВО «Наука», Сибирская издательская фирма, 1992. – 164 с.
- 12. Забродин В. Ю., Бородин А. М., Гурьянов В. А. [и др.] Государственная геологическая карта Российской Фе-

Автор выражает благодарность и искреннюю признательность рецензенту.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИТиГ ДВО РАН, при поддержке Федерального агентства по недропользованию.

дерации. Масштаб 1:1 000 000 (3-е поколение). Серия Дальневосточная. Лист N-53 (Шантарские о-ва). Объяснительная записка. – СПб. : Картфабрика ВСЕГЕИ, 2007. – 448 с.

- Кузьменко С. П. Государственная геологическая карта СССР масштаба 1:200 000. Серии Хингано-Буреинская и Сихотэ-Алинская. Листы: М-53-ХХІІ (Харпи), М-53-ХХІІІ (Болонь), М-53-ХХІV (Манома). Объяснительная записка. – М. : Союзгеолфонд, 1989. – 122 с.
- Мартынов Ю. А. Геохимия базальтов активных континентальных окраин и зрелых островных дуг (на примере Северо-Западной Пацифики). – Владивосток : Дальнаука, 1999. – 218 с.
- Мартынов Ю. А. Петрология эоцен-миоценовой контрастной формации Нижнего Приамурья. – Владивосток : ДВНЦ АН СССР, 1983. – 144 с.
- Нигай Е. В. Удурчуканская свита и аякитский комплекс: размещение, возраст, геохимия (Буреинский массив, Сихотэ-Алинская складчатая система) // Отечественная геология. – 2021. – № 6. – С. 85–99.
- 17. Опалихина Е. С. Миоцен-раннечетвертичные платобазальты и их положение среди вулканитов Восточно-Сихотэалинского вулканического пояса // Проблемы геологии и металлогении Северо-Востока Азии на рубеже тысячелетий: материалы XI сессии Северо-Восточного отделения ВМО «Региональная научно-практическая конференция, посвященная 100-летаю со дня рождения Ю. А. Билибина». – Магадан : СВКНИИ ДВО РАН, 2001. – С. 178–180.
- Петрографический кодекс России. Магматические, метаморфические, метасоматические, импактные образования / Отв. ред. Л. П. Шарпенок СПб. : ВСЕГЕИ, 2009. 200 с.
- Петрология неоген-четвертичных базальтоидов северо-западного сектора Тихоокеанского подвижного пояса / под ред. Г. М. Гапеевой М. : Недра, 1971. 148 с.
- Петрук Н. Н., Волкова Ю. Р., Шилова М. Н. [и др.] Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (3-е поколение). Серия Дальневосточная. Лист М-52 (Благовещенск). Объяснительная записка. – СПб. : Картфабрика ВСЕГЕИ, 2012. – 496 с.
- Рассказов С. В., Приходько В. С., Саранина Е. В., Масловская М. Н., Ясныгина Т. А., Семенова В. Г., Травин А. В. Пространственно-временные вариации мантийных и коровых компонентов в позднекайнозойских вулканических породах Среднеамурской впадины // Тихоокеанская геология. 2003. Т. 22, № 3. С. 3–27.

- Рыбалко В. И., Белянский Г. С., Рязанцева М. Д., Бажанов В. А. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (3-е поколение). Лист L-52, 53; К-52, 53. (оз. Ханка). Объяснительная записка. – СПб. : Картфабрика ВСЕГЕИ, 2011. – 684 с.
- Сасим С. А., Дриль С. И., Травин А. В. [и др.] Шошонитлатитовая серия Восточного Забайкалья: ⁴⁰Ar/³⁹Ar возраст, геохимия и Sm-Nd изотопный состав пород Акатуевской вулкано-плутонической ассоциации Александрово-Заводской впадины // Геология и геофизика. – 2016. – Т. 57, № 5. – С. 962–982.
- 24. *Сухов В. И.* Вулканогенные формации юга Дальнего Востока. М. : Недра, 1975. 112 с.
- Сухов В. И. Государственная геологическая карта СССР масштаба 1:200 000. Серия Хингано-Буреинская. Лист М-53-XXI. Объяснительная записка. – М. : Союзгеолфонд, 1970. – 84 с.
- Тектоника, глубинное строение, металлогения области сочленения Центрально-Азиатского и Тихоокеанского поясов. Объяснительная записка к тектонической карте масштаба 1:1 500 000 / Под ред. Л. П. Карсакова. – Хабаровск, Владивосток: ИТиГ ДВО РАН, 2005. – 264 с.
- Туркина О. М., Ножкин А. Д. Океанические и рифтогенные метавулканические ассоциации зеленокаменных поясов северо-западной части Шарыжалгайского выступа (Прибайкалье) // Петрология. – 2008. – Т. 16, № 5. – С. 501–526.
- Требования к геохимической основе госгеолкарты РФ масштаба 1:1 000 000. – М., 2001.

- Харитонычев Г. И. Геологическая карта СССР масштаба 1:200 000. Серия Сихотэ-Алинская. Лист М-53-XXIX. Объяснительная записка. – М.: Союзгеолфонд, 1970. – 58 с.
- 30. Шаруева Л. И., Саутченкова Р. А., Макар В. И., Роганов Г. В. [и др.] Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (3-е поколение). Серия Дальневосточная. Лист N-54 (Николаевск-на-Амуре). Объяснительная записка. – СПб. : Картфабрика ВСЕГЕИ, 2014. – 496 с.
- Condie K. C. High field strength element ratios in Archean basalts: a window to evolving sources of mantle plumes? // Lithosphere. – 2005. – V. 79. – P. 491–504.
- 32. *Condie K. C.* Sources of Proterozoic mafic dyce swarms: constraints from Th/Ta and La/Yb ratios // Precambrian Research. 1997. V. 81. P. 3–14.
- McDonough W., Sun S. S. The composition of the Earth // Chemical Geology. – 1995. – V. 120, Is. 3–4. – P. 223–253.
- Pearse J. A., Norry M. J. Petrogenetic implications of Ti, Zr, Y, and Nb variations in volcanic rochs // Contributions to Mineralogy and Petrology. – 1979. – V. 69. – P 33–47.
- Peccerillo A., Taylor S. R. Geochemistry of Eocene calcalkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey // Contributions to Mineralogy and Petrology. 1976. V. 58, № 1. P. 63–81.
- Turner S., Arnaud N., Liu J., Rogers N., Hawkesworth C., Harris N., Kelley S., Van Calsteren P., Deng W. Post-collision, shoshonitic volcanism on the Tibetan Plateau: Implications for convective thinning of the lithosphere and the source of ocean island basalts // Journal of Petrology. – 1996. – V. 37. – P. 45–71.

REFERENCES

- Anoykin V. I. Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoy Federatsii masshtaba 1:200 000. Izd. 2-ye. Seriya Bureinskaya. List M-53-VIII (Chegdomyn). Obyasnitel'naya zapiska [State Geological Map of the Russian Federation, scale 1:200,000, 2nd ed. Series Bureinskaya. Sheet M-53-VIII (Chegdomyn). Explanatory note]. St. Petersburg, Kartfabrika VSEGEI publ., 2002, 123 p. (In Russ.)
- Anoykin V. I., Zablotskiy Ye. M. Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoy Federatsii masshtaba 1:200 000. Izd. 2-ye. Seriya Bureinskaya. List M-53-XIV. Obyasnitel'naya zapiska [State geological map of the Russian Federation, scale 1:200 000. 2nd ed. Series Bureinskaya. Sheet M-53-XIV. Explanatory note]. St. Petersburg, Kartfabrika VSEGEI publ., 2004, 102 p. (In Russ.)
- Akhmet'yev M. A., Botyleva M. P. Neogen-chetvertichnyye andezito-bazal'ty Vostochnogo Sikhote-Alinya [Neogene-Quaternary andesite-basalts of the Eastern Sikhote-Alin]. Petrologiya neogen-chetvertichnykh bazal'toidov severozapadnogo sektora Tikhookeanskogo podvizhnogo poyasa, Moscow, Nedra publ., 1971, P. 13–47. (In Russ.)

- Varnavskiy V. G., Sedykh A. K., Rybalko V. I. Paleogen i neogen Priamur'ya i Primor'ya [Paleogene and Neogene of the Amur Region and Primorye]. Vladivostok, DVO AN SSSR publ., 1988, 184 p. (In Russ.)
- Vas'kin A. F., Dymovich V. A., Atrashenko A. F. et al. Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoy Federatsii. Masshtab 1:1 000 000 (tret'ye pokoleniye). Seriya Dal'nevostochnaya. List M-53. (Khabarovsk). Obyasnitel'naya zapiska [State Geological Map of the Russian Federation. Scale 1:1,000,000 (third generation). Far Eastern series. Sheet M-53. (Khabarovsk). Explanatory note]. St. Petersburg, Kartfabrika VSEGEI publ., 2009, 376 p. (In Russ.)
- 6. *Vulkanogennoye* orudeneniye na Dal'nem Vostoke [Volcanic mineralization in the Far East]. B. I. Burde, V. N. Voyevodin, Vladivostok, DVNTS publ., 1980, 136 p. (In Russ.)
- Golozubov V. V. Tektonika yurskikh i nizhnemelovykh kompleksov severo-zapadnogo obramleniya Tikhogo okeana [Tectonics of the Jurassic and Lower Cretaceous complexes of the northwestern framing of the Pacific Ocean]. Vladivostok, Dal'nauka publ., 2006, 239 p. (In Russ.)
- Dobkin S. N. Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoy Federatsii (2-ye izdaniye). Masshtab 1:200 000. List M-53-XIII. Bureinskaya seriya. Obyasnitel'naya

zapiska [State Geological Map of the Russian Federation (2nd edition). Scale 1:200,000. Sheet M-53-XIII. Bureinsky series. Explanatory note]. St. Petersburg, Kartfabrika VSEGEI publ., 2015, 384 p. (In Russ.)

- Dobkin S. N., Novosolov B. A., Borodin A. M., Gracheva V. T. Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoy Federatsii (2-ye izd.). Masshtab 1:200 000. List M-52-XKHKH. Bureinskaya seriya. Obyasnitel'naya zapiska [State Geological Map of the Russian Federation (2nd ed.). Scale 1:200,000. Sheet M-52-XXX. Bureinsky series. Explanatory note]. St. Petersburg, Kartfabrika VSEGEI publ.. 2000, 236 p. (In Russ.)
- Dymovich V. A. Gosudarstvennaya geologicheskaya karta SSSR masshtaba 1:200 000. List M-53-XXX. Obyasnitel'naya zapiska [State geological map of the USSR, scale 1:200,000. Sheet M-53-XXX. Explanatory note]. Moscow, Soyuzgeolfond publ., 1987, 111 p. (In Russ.)
- Yesin S. V., Prusevich A. A., Kutolin V. A. Pozdnekaynozoyskiy vulkanizm i glubinnoye stroyeniye Vostochnogo Sikhote-Alinya [Late Cenozoic volcanism and deep structure of Eastern Sikhote-Alin]. Novosibirsk, Sibirskaya izdatel'skaya firma publ., 1992, 164 p. (In Russ.)
- Zabrodin V. Yu., Borodin A. M., Gur'yanov V. A. et al Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoy Federatsii. Masshtab 1:1000 000 (3-ye pokoleniye). Seriya Dal'nevostochnaya. List N-53 (Shantarskiye o-va). Obyasnitel'naya zapiska [State Geological Map of the Russian Federation. Scale 1:1000,000 (3rd generation). Far Eastern series. Sheet N-53 (Shantar Islands). Explanatory note]. St. Petersburg, Kartfabrika VSEGEI publ., 2007, 448 p. (In Russ.)
- Kuz'menko S. P. Gosudarstvennaya geologicheskaya karta SSSR masshtaba 1:200 000. Serii Khingano-Bureinskaya i Sikhote-Alinskaya. Listy: M-53-XXII (Kharpi), M-53-XXIII (Bolon'), M-53-XXIV (Manoma). Obyasnitel'naya zapiska [State geological map of the USSR at a scale of 1:200,000. Khingan-Bureinskaya and Sikhote-Alinskaya series. Sheets: M-53-XXII (Harpy), M-53-XXIII (Bologne), M-53-XXIV (Manoma). Explanatory note]. Moscow, Soyuzgeolfond publ., 1989, 122 p. (In Russ.)
- 14. *Martynov Yu. A.* Geokhimiya bazal'tov aktivnykh kontinental'nykh okrain i zrelykh ostrovnykh dug (na primere Severo-Zapadnoy Patsifiki) [Geochemistry of basalts of active continental margins and mature island arcs (on the example of the Northwestern Pacific)]. Vladivostok, Dal'nauka publ., 1999, 218 p. (In Russ.)
- 15. *Martynov Yu. A.* Petrologiya eotsen-miotsenovoy kontrastnoy formatsii Nizhnego Priamur'ya [Petrology of the Eocene-Miocene contrast formation of the Lower Amur region]. Vladivostok, DVNTS AN SSSR publ., 1983, 144 p. (In Russ.)
- Nigay Ye. V. Udurchukanskaya svita i ayakitskiy kompleks: razmeshcheniye, vozrast, geokhimiya (Bureinskiy massiv, Sikhote-Alinskaya skladchataya sistema) [Udurchukan Formation and Ayakit Complex: Location, Age, Geochemistry (Bureya massif, Sikhote-Alin fold system)]. Otechestvennaya geologiya [Domestic geology], 2021, No. 6, P. 85–99. (In Russ.)
- 17. *Opalikhina Ye. S.* Miotsen-rannechetvertichnyye platobazal'ty i ikh polozheniye sredi vulkanitov Vostochno-

Sikhotealinskogo vulkanicheskogo poyasa [Miocene-Early Quaternary plateau basalts and their position among the volcanic rocks of the East Sikhotealinsky volcanic belt]. Magadan, SVKNII DVO RAN, 2001, P. 178–180. (In Russ.)

- Petrograficheskiy kodeks Rossii. Magmaticheskiye, metamorficheskiye, metasomaticheskiye, impaktnyye obrazovaniya [Petrographic Code of Russia. Magmatic, metamorphic, metasomatic, impact formations]. Sharpenok L. P. St. Petersburg, VSEGEI publ., 2009, 200 p. (In Russ.)
- Petrologiya neogen-chetvertichnykh bazal'toidov severozapadnogo sektora Tikhookeanskogo podvizhnogo poyasa [Petrology of Neogene-Quaternary basaltoids in the northwestern sector of the Pacific Mobile Belt]. Gapeyeva G. M., Moscow, Nedra publ., 1971, 148 p. (In Russ.)
- Petruk N. N., Volkova Yu. R., Shilova M. N. et al. Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoy Federatsii. Masshtab 1:1000 000 (3-ye pokoleniye). Seriya Dal'nevostochnaya. List M-52 (Blagoveshchensk). Obyasnitel'naya zapiska [State geological map of the Russian Federation. Scale 1:1000,000 (3rd generation). Far Eastern series. Sheet M-52 (Blagoveshchensk). Explanatory note]. St. Petersburg, Kartfabrika VSEGEI publ., 2012, 496 p. (In Russ.)
- 21. Rasskazov S. V., Prikhod'ko V. S., Saranina Ye. V., Maslovskaya M. N., Yasnygina T. A., Semenova V. G., Travin A. V. Prostranstvenno-vremennyye variatsii mantiynykh i korovykh komponentov v pozdnekaynozoyskikh vulkanicheskikh porodakh Sredneamurskoy vpadiny [Spatio-temporal variations of mantle and crustal components in Late Cenozoic volcanic rocks of the Middle Amur depression]. Tikhookeanskaya geologiya, 2003, V. 22, No. 3, P. 3–27. (In Russ.)
- Rybalko V. I., Belyanskiy G. S., Ryazantseva M. D., Bazhanov V. A. Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoy Federatsii. Masshtab 1:1000 000 (3-ye pokoleniye). List L-52, 53; K-52, 53. (Oz. Khanka). Obyasnitel'naya zapiska [State Geological Map of the Russian Federation. Scale 1:1000,000 (3rd generation). Sheet L-52, 53; K-52, 53. (Oz. Khanka). Explanatory note]. St. Petersburg, Kartfabrika VSEGEI publ., 2011, 684 p. (In Russ.)
- 23. Sasim S. A., Dril' S. I., Travin A. V. et al., Shoshonitlatitovaya seriya Vostochnogo Zabaykal'ya: ⁴⁰Ar/³⁹Ar vozrast, geokhimiya i Sm-Nd izotopnyy sostav porod Akatuyevskoy vulkano-plutonicheskoy assotsiatsii Aleksandrovo-Zavodskoy vpadiny [Shoshonite-latite series of Eastern Transbaikalia: ⁴⁰Ar/³⁹Ar age, geochemistry, and Sm-Nd isotope composition of rocks of the Akatuevka volcano-plutonic association of the Alexander-Zavodsk depression]. Geologiya i geofizika [Geology and geophysics], 2016, V. 57, No. 5, P. 962–982. (In Russ.)
- 24. *Sukhov V. I.* Vulkanogennyye formatsii yuga Dal'nego Vostoka [Volcanogenic formations in the south of the Far East]. Moscow, Nedra publ., 1975, 112 p. (In Russ.)
- Sukhov V. I. Gosudarstvennaya geologicheskaya karta SSSR masshtaba 1:200 000. Seriya Khingano-Bureinskaya. List M-53-XXI. Obyasnitel'naya zapiska [State geological map of the USSR, scale 1:200,000. Khingan-Bureinskaya series. Sheet M-53-XXI. Explanatory note]. Moscow, Soyuzgeolfond publ., 1970, 84 p. (In Russ.)

- 26. Tektonika, glubinnoye stroyeniye, metallogeniya oblasti sochleneniya Tsentral'no-Aziatskogo i Tikhookeanskogo poyasov. Obyasnitel'naya zapiska k tektonicheskoy karte masshtaba 1:1 500 000 [Tectonics, deep structure, metallogeny of the junction area of the Central Asian and Pacific belts. Explanatory note to the tectonic map in scale 1:1 500 000]. Ed. L. P. Karsakova, Khabarovsk, Vladivostok, ITiG DVO RAN publ., 2005, 264 p. (In Russ.)
- Turkina O. M., Nozhkin A. D. Okeanicheskiye i riftogennyye metavulkanicheskiye assotsiatsii zelenokamennykh poyasov severo-zapadnoy chasti Sharyzhalgayskogo vystupa (Pribaykal'ye) [Oceanic and riftogenic metavolcanic associations of greenstone belts in the northwestern part of the Sharyzhalgai salient (CiBaikal region)]. Petrologiya [Petrology], 2008, V. 16, No. 5, P. 501–526. (In Russ.)
- 28. *Trebovaniya* k geokhimicheskoy osnove gosgeolkarty RF masshtaba 1:1 000 000 [Requirements for the geochemical basis of the State Geological Map of the Russian Federation at a scale of 1:1,000,000]. Moscow, 2001. (In Russ.)
- Kharitonychev G. I. Geologicheskaya karta SSSR masshtaba 1:200 000. Seriya Sikhote-Alinskaya. List M-53-XXIX. Obyasnitel'naya zapiska [Geological map of the USSR at a scale of 1:200,000. Sikhote-Alinskaya series. Sheet M-53-XXIX. Explanatory note]. Moscow, Soyuz-geolfond publ., 1970, 58 p. (In Russ.)
- 30. Sharuyeva L. I., Sautchenkova R. A., Makar V. I., Roganov G. V. et al. Gosudarstvennaya geologicheskaya karta

Rossiyskoy Federatsii. Masshtab 1:1 000 000 (3-ye pokoleniye). Seriya Dal'nevostochnaya. List N-54 (Nikolayevsk-na-Amure). Ob''yasnitel'naya zapiska [State geological map of the Russian Federation. Scale 1:1,000,000 (3rd generation). Far Eastern series. Sheet N-54 (Nikolaevsk-on-Amur). Explanatory note]. St. Petersburg, Kartfabrika VSEGEI publ., 2014, 496 p. (In Russ.)

- 31. *Condie K. C.* High field strength element ratios in Archean basalts: a window to evolving sources of mantle plumes? Lithosphere, 2005, V. 79, P. 491–504.
- 32. *Condie K. C.* Sources of Proterozoic mafic dyce swarms: constraints from Th/Ta and La/Yb ratios. Precambrian Research, 1997, V. 81, P. 3–14.
- 33. *McDonough W., Sun S. S.* The composition of the Earth. Chemical Geology, 1995, V. 120, Is. 3–4, P. 223–253.
- Pearse J. A., Norry M. J. Petrogenetic implications of Ti, Zr, Y, and Nb variations in volcanic rochs. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1979, V. 69, P 33–47.
- 35. *Peccerillo A., Taylor S. R.* Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1976, V. 58, № 1, P. 63–81.
- Turner S., Arnaud N., Liu J., Rogers N., Hawkesworth C., Harris N., Kelley S., Van Calsteren P., Deng W. Post-collision, shoshonitic volcanism on the Tibetan Plateau: Implications for convective thinning of the lithosphere and the source of ocean island basalts. Journal of Petrology, 1996, V. 37, P. 45–71.

Статья поступила в редакцию 17.06.22; одобрена после рецензирования 18.10.22; принята к публикации 18.10.22. The article was submitted 17.06.22; approved after reviewing18.10.22; accepted for publication 18.10.22.

DOI:10.47765/0869-7175-2022-10033

УДК 552.323.6:553.81 © Н. Н. Зинчук, 2022

Особенности петрографического изучения кимберлитовых пород

На основании анализа конкретного фактического и аналитического материала показаны возможности и перспективы петрографических исследований кимберлитовых пород, являющихся вулканическими изверженными, недосыщенными кремнезёмом, богатыми летучими компонентами ультраосновных гибридных образований с повышенной щёлочностью, содержащих мантийный и коровый материал в варьирующих количествах и соотношениях. Мантийный материал в кимберлитах представлен ксенолитами ультраосновных, щелочноультраосновных, основных пород и ксенозёрнами минералов из них.

Ключевые слова: петрография, петрология, кимберлиты, глубинные ксенолиты, мантийные разрезы, Сибирская платформа.

ЗИНЧУК НИКОЛАЙ НИКОЛАЕВИЧ, доктор геолого-минералогических наук, nnzinchuk@rambler.ru

Западно-Якутский научный центр (ЗЯНЦ) Академии наук Республики Саха (Якутия), г. Мирный

Specific features of petrographic study of kimberlite

N. N. ZINCHUK

West Yakutsk Scientific Center (WYSC) of the Academy of Sciences of the Republic of Sakha (Yakutia), Mirny

Based on the analysis of specific actual and analytical material capabilities and perspectives of petrographic and petrological investigations of kimberlite rocks are indicated. Kimberlite is a volcanic igneous rock, undersaturated by silica, enriched in volatiles of peralkaline ultramafic hybrid formations, containing mantle and crust material in varying quantities and ratios. Mantle material in kimberlite is represented by xenoliths of ultramafic, alkali-rich mafic-ultramafic rocks and xeno-minerals from them.

Key words: petrography, petrology, kimberlite, deep xenoliths, mantle sections, Siberian platform.

Алмаз – полигенный минерал, образующийся не только в условиях земных недр, но и при сверхскоростном соударении космических тел с Землёй. В настоящее время в мире известны три основных геолого-генетических типа коренных месторождений алмаза: магматический (кимберлитовый и лампроитовый), метаморфогенный и импактный. Из них главным коренным типом являются кимберлиты [1-8, 10, 11, 14, 16, 18, 23-28], установленные на всех древних платформах Земли, из которых добываются около 80% природного алмазного сырья. Несмотря на широкое распространение кимберлитов (только на Сибирской (СП), Африканской (ЮАП) и Северо-Американской (САП) платформах их больше 2500 проявлений) и наличие в десятой части из них признаков алмазоносности, промышленное значение имеют (то есть являются месторождениями) менее 3% тел [11, 13, 15, 19-22]. По запасам алмазов и размерам месторождения разделяются на уникальные, крупные, средние и мелкие, а по содержаниям - на уникально-, высоко-, средне- и низкоалмазоносные. Естественно, наиболее рентабельной является отработка верхних горизонтов выходящих на дневную поверхность уникальных и крупных месторождений. Коренные месторождения алмазов, связанные с кимберлитовыми трубками взрыва (диатремами), успешно эксплуатируются около 150 лет. Из них и связанных с ними россыпей за всю историю добычи извлечено более 700 т алмазов. Большинством исследователей признано, что алмаз из кимберлитов кристаллизовался на большой глубине (порядка 150-200 км) в мантии Земли в области его стабильности $(P > 45 \ \Gamma \Pi a, T = 950-1400 \ ^{\circ}C)$ намного раньше образования диатрем, то есть алмаз в кимберлитах – ксеногенный минерал. Его источником являются дезинтегрированные мантийные породы - перидотиты и эклогиты, фрагменты которых вынесены кимберлитовой магмой в верхние слои литосферы [9, 12, 28-36]. Форма залегания алмазоносных кимберлитов – трубки и дайки, реже отмечаются силлы.

Характерными особенностями кимберлитовых проявлений являются групповое расположение тел и приуроченность промышленно алмазоносных тел к участкам древних платформ с кратонным основанием [11, 17, 27]. Несмотря на длительный период системного изучения кимберлитов, многие аспекты геологии, генезиса и состава этих пород остаются недостаточно изученными или дискуссионными.

Ведущие зарубежные исследователи [36-41 и др.] предлагают использовать генетические термины не при первичном описании кимберлитов, а добавлять их уже при дальнейших детальных изучениях пород (эксплозивные процессы, флюидизация, брекчирование и др.). Сравнивая зарубежные и отечественные геологические построения и классификации, следует отметить, что первые обычно отличаются более сложным описанием разных зон и фаций, в отличие от отечественных, где исследователи выделяют только интрузивные (дайки и штоки) и эксплозивные (трубки) кимберлиты. Последние обычно делятся на массивные и автолитовые брекчии. Традиционная (африканская) модель кимберлитовой трубки представляет собой [37-39] диатрему, состоящую из глубокой корневой зоны, средней диатремовой и верхней (если она сохранилась) кратерной зон. Сами кимберлиты здесь обычно делятся на три фации по глубинности: гипабиссальные (массивные, макрокристные и афировые разности), кратерные породы (лавовые, пирокластические) и переотложенные кимберлиты. Причина такого разделения кимберлитов на глубине в ЮАП многие исследователи связывают с морфологией и особенностями заполнения трубчатых тел. На СП перечисленные текстурно-структурные типы кимберлитов могут встречаться (или отсутствовать) на разных глубинах и фациях. Так, например, порфировый кимберлит (ПК) может встречаться как в дотрубочных жилах или дайках во вмещающих породах, так и на более поздних стадиях в пределах диатремовой фации.

Кимберлиты представляют собой вулканические изверженные, недосыщенные кремнезёмом, богатые летучими компонентами ультраосновные гибридные породы с повышенной щёлочностью, содержащие мантийный и коровый материал в варьирующих количествах и соотношениях [2–4, 12, 13, 15, 17, 19]. Основной формой проявления кимберлитов являются воронкообразные брекчиевые диатремы (трубки взрыва), верхние части которых венчаются кратерными постройками; на глубине (от 1000 до 2500 м от поверхности) эти тела переходят в дайки. Сохранность кратерных частей зависит от величины «посткимберлитового» эрозионного среза территории, а корневые части вскрыты только в отдельных трубках в силу большой глубины залегания и небольшой мощности даек (жил). Как наблюдается практически во всех провинциях, кимберлиты пространственно локализованы в пределах архейских и архейсконижнепротерозойских ядер-кратонов, обладающих консолидированной корой, мощной и относительно жёсткой литосферой и низкоградиентными тепловыми потоками. В пределах таких площадей положение проявлений контролируется коровыми структурами, многие кимберлитовые поля связаны с разноранговыми дизъюнктивными нарушениями иструктурными зонами. Мантийный материал представлен ксенолитами ультраосновных, щёлочно-ультраосновных и основных пород и ксенозёрнами минералов из них - алмазом, гранатом-пиропом, пикроильменитом, хромшпинелидом, оливином, клинопироксеном, ортопироксеном, флогопитом, редко цирконом, апатитом и титаноклиногумитом. Перечисленные минералы устойчивы в широком диапазоне РТ-условий: от стабильной кристаллизации алмаза до метастабильного состояния пиропа. Расплавленный мантийный материал раскристаллизован в условиях земной коры в виде мезостазиса, в состав которого входят выделения минералов второй генерации – оливин II, хромшпинелид II, ильменит II, флогопит II, а также монтичеллит, клинопироксен, рутил, перовскит и кальцит. Коровой составляющей кимберлитов является: а) ксеногенный материал пород, вмещающих кимберлиты; б) материал, перенесённый в кимберлиты из окружающей среды постмагматическими растворами. С минералогической точки зрения кимберлиты отвечают порфировым щелочным перидотитам [4, 13], содержащим избыточный фенокристовый оливин (обычно замещённый серпентином или карбонатом) и флогопит в мелкозернистой основной массе, сложенной кальцитом, оливином (псевдоморфозами по нему) и флогопитом, иногда другими минералами. Особенно представительный материал получен в последнее тридцатилетие в связи с детальной разведкой и отработкой ряда важнейших коренных месторождений алмазов. В этот же период изучение вещественного состава кимберлитовых пород перешло от «стандартного» петрографо-минералогического и петрохимического изучения на новый качественный уровень в связи с появлением новых прецизионных методов исследования вещества (микрорентгено-спектральный, высокоразрешающие электронная микроскопия и рентгенография, изотопия, оптико-спектроскопический и рентген-флуоресцентный анализы, ИК-спектроскопия и др.). Заметным вкладом в изучение минерального состава кимберлитов региона стало внедрение в практику регулярных лабораторно-аналитических работ рентгенофазового анализа [9, 15, 25, 29, 30, 32, 33],

использование которого в течение 30 лет позволяет вести успешную диагностику всего многообразия вторичных минералов, составляющих более 90% объёма пород. Исследования приобрели более разносторонний и углублённый характер, что, заметно повысило интерес к изучению коренных источников алмазов. Открытие трубок Накынского кимберлитового поля (НКП) на СП, проявивших признаки аномальности в минералого-геохимическом отношении, разведка глубоких горизонтов коренных месторождений алмазов и эксплуатация ряда уникальных диатрем обусловили появление большого массива разнообразных первичных данных, которые были получены и проанализированы в рамках проводимых тематических исследовательских работ.

Диатремы кимберлитов характеризуются обычно специфическими физико-механическими [8, 11], петрофизическими свойствами, многофазным строением с распространением пород не менее двух фаз внедрения: первой - гипабиссальной, представленной порфировыми кимберлитами (ПК), и второй вулканической, сложенной разнообразными кимберлитовыми брекчиями (КБ), различающимися по алмазоносности. Важное значение имеет выявление различий между фазами внедрения по составу минералов основной массы и минералов-спутников алмаза (пиропа, хромшпинелидов, пикроильменита), глубинных ксенолитов и петрогенных оксидов (SiO₂, ТіО₂, FeO, MgO, CaO, K₂O, Cr₂O₂). Актуальной составной частью научных исследований коренных месторождений алмазов является изучение парагенезисов индикаторных минералов кимберлитов (ИМК) и ксенолитов мантийных пород, а также широкого спектра вторичных минералов, количество которых составляет семь десятков, что в итоге способствует решению ряда теоретических и практических вопрсов. К главным особенностям кимберлитовых диатрем относятся: отсутствие больших объёмов вытесненных пород и плутонических комплексов; специфика петрографо-минералогических и петрогеохимических признаков (относительно других ультраосновных пород); преимущественно морковкообразная форма (форма перевёрнутого конуса); спектр вулканических образований, характеризующих трёхфациальный разрез (кратер, диатрему и корневую гипабиссальную зону) и отличающихся между собой; насыщенность летучими при высокой доле СО,; относительно низкотемпературный характер доминирующей части кимберлитовых минералов; присутствие слабораскристаллизованных участков и другие признаки быстрого внедрения; наличие ксенолитов мантийных, коровых и вмещающих пород, при наиболее угловатой форме последних; присутствие алмазов; примеры перехода диатрем в дайки; признаки взрывного генезиса; наличие до-, син- и посттрубочных даек; отсутствие термометаморфизма; широкие качественно-количественные вариации минерального состава между сообществами тел и отдельно взятыми проявлениями.

Петрографическая классификация кимберлитов была и остаётся одним из наиболее дискуссионных разделов в проблеме изучения этих своеобразных пород. Не ставя своей целью проводить в данной работе критический анализ этого направления, следует всё же отметить, что основным недостатком существующих принципов классификации, по нашему мнению, является использование генетического подхода во многих из них, что само по себе включает много спорных элементов с учётом различной трактовки происхождения. Наиболее аргументированными с петрографических позиций и приемлемыми для отечественных коренных алмазных месторождений являются классификации кимберлитов, разработанные отечественными учёными [6, 12, 24 и др.]. К общепризнанным позициям следует отнести выделение основных текстурных типов пород - массивных (порфировых) и брекчиевых или брекчированных (эруптивные брекчии) кимберлитов.

В порфировых кимберлитах гипабиссальной или субвулканической фации (рис. 1, А-Г) порфировое строение определяется вкрапленниками оливина или псевдоморфозами по ним, а основной массой служит микрозернистая или скрытокристаллическая серпентин-карбонатная смесь с микролитами оливина, монтичеллита, перовскита, флогопита, апатита, ильменита и магнетита, при обычном присутствии акцессорных вкрапленников пиропов, хромитов, пикроильменитов и пироксенов. В основу выделения структурных разновидностей этого типа кимберлитов положены особенности строения (форма, величина, содержание, характер распределения породообразующих вкрапленников) и количественные соотношения микролитов и серпентин-карбонатных образований в основной массе. Примечательно выделение двух (а иногда и трёх) генераций оливина и флогопита, а в основной массе пород фиксируется варьирующее количество мелких (до пылевидных) выделений магнетита, кристалликов перовскита, апатита, вторичной слюды, кальцита и сульфидов. Для разделения породообразующих минералов-вкрапленников по стадиям (генерациям) кристаллизации используются размеры и морфологические особенности: собственно кимберлитовому этапу кристаллизации отвечают относительно мелкие (до 1-2 мм) кристаллы второй генерации с отчётливо выраженной кристаллографической огранкой, а первая (протокимберлитовая) генерация представлена обломочными выделениями крупнее указанных размеров.


Рис. 1. Крупно- (А и Б), средне- (В) и микропорфировый (Г) кимберлит:

А — кимберлитовая дайка трубки Нюрбинская, штуф 4/150; Б — кимберлитовая дайка трубки Нюрбинская, шлиф 4/150, ув. ×25, николи П; В — западный штрек трубки Юбилейная, шлиф 3/154, ув. ×25, без анализатора; Г — кимберлитовая дайка трубки Ботуобинская, шлиф 24/8-399, ув. ×25, николи П

Необходимо отметить, что ПК свойственно относительно равномерное распределение минераловвкрапленников, а также рудных минералов и перовскита на фоне карбонат-серпентиновой основной массы. Иногда в дайках или в корневых зонах диатрем проявляется сегрегационная структура (шаровидные сегрегационные кимберлиты корневых зон), которая описана в литературе [5, 11, 24, 34–35, 39, 41] при характеристике вскрытых шахтами корневых зон кимберлитовых трубок (Премьер и др.). В этих породах кристаллизация силикатов и оксидов происходила как сегрегация различных по величине капель, что могло происходить в гипабиссальной среде.

Проявление брекчиевой текстуры и наличие заметного (более 7–10 об. %) количества обломков пород рамы (чехла и фундамента) и макрокристов мантийных минералов служит признаком эруптивнообломочных пород и является основанием для выделения эруптивных кимберлитовых брекчий (ЭКБ) или просто КБ (брекчий с массивной текстурой цемента). Наличие в последних макро- или микровключений «кимберлит в кимберлите» (автолитов) позволяет выделять группу автолитовых кимберлитовых брекчий (АКБ) (рис. 2, А-В). Кроме автолитов, примечательны спорадически встречающиеся такситовые текстурные неоднородности в кимберлитах (атакситы и эвтакситы), которые могли возникать [10, 21] в расплаве вследствие неравномерного распределения в нём воды. Следовательно, в порфировых кимберлитах неоднородного строения можно наблюдать эвтакситовую и атакситовую текстуры (см. рис. 2, Г и рис. 3, А), а среди ЭКБ, наряду с автолитовой, можно выделить атакситовую (см. рис. 3, Б) и эвтакситовую (см. рис. 3, В, Г) текстурные разновидности. В отдельных диатремах СП диагностирован также в незначительном количестве [21, 23-25,



Рис. 2. Автолитовая (А и Б) и мелкообломочная автолитовая (В) кимберлитовая брекчия, а также эвтакситовый порфировый кимберлит (Г):

А – трубка Ботуобинская, штуф 12/2-159; Б – трубка Ботуобинская, шлиф 12/2-159, ув. ×25, николи П; В – восточный штрек трубки Краснопресненская, шлиф В-130/2, ув. ×25, николи П; Г – квершлаг дайки Ботуобинская, штуф ПКВ 1-118

32, 35] монтичеллитовый кимберлит (рис. 4, А-В). По размеру обломков кимберлитовые брекчии разделяются на крупно-, средне- и мелкообломочные, а по характеру кимберлита-цемента выделяются порфировая, кластопорфировая, автолитовая (или лавокластическая) и литокристаллокластическая (лавокристаллокластическая) структуры. Упомянутые выше петрографические типы кимберлитов двух фациальных групп являются общепризнанными. Они лежат в основе геолого-технологической типизации разведуемых блоков месторождений и особых возражений, кроме применения или неприменения вулканологической терминологии, не вызывают. Гораздо больше дискуссионных вопросов связано с диагностикой и классификацией кимберлитовых пород кратерной части (трубки Юбилейная, Краснопресненская, имени Одинцова на СП). Примечательно, что выделение самих кратеров как морфологических элементов признаётся как несомненный факт, а наименование заполняющих кратеры отмеченных трубок пород нашло несколько вариантов, среди которых основными являются флюидизаты [21, 28]. К кратерным образованиям целесообразно применять терминологию и классификацию вулканических пород [5–7] с выделением эксплозивно-обломочной, осадочно-вулканокластической, вулканогенно-осадочной и осадочно-кластической групп пород.

Правомочность этого была подтверждена при изучении кимберлитовых диатрем северо-востока Анголы [11, 21, 25]. Группа эксплозивно-обломочных пород представлена: а) *туфами и туфобрекчиями*, состоящими из кластического материала кимберлитов без существенных примесей (см. рис. 4, Г); б) *ксенотуфами и ксенотуфобрекчиями*, содержащими примесь обломков чуждых пород разной размерности в количестве менее 50%. Туфобрекчии – брекчиевые кимберлитовые породы, образованные



Рис. 3. Атакситовый кимберлит (А), атакситовая автолитовая кимберлитовая брекчия (Б), эвтакситовая автолитовая кимберлитовая брекчия (В и Г):

А – трубка Юбилейная, шлиф 235/120, ув. ×25, николи П; Б – трубка Юбилейная, штуф 11/118,5; В – западный штрек трубки Юбилейная, штуф 3/154; Г – трубка Краснопресненская, штуф 21/180

в результате уплотнения и цементации неотсортированного грубообломочного рыхлого угловатого или слабоокатанного вулканокластического материала, погружённого в более мелкозернистый туфовый цемент. Туфы образуются из твёрдых продуктов кимберлитовых извержений и фрагментов вмещающей среды, впоследствии уплотнённых и сцементированных. Породы разделяются по размеру доминирующих обломков на: грубообломочные (агломератовые), крупнообломочные (псефитовые), среднеобломочные (псаммитовые), тонкообломочные (алевритовые), а по характеру обломков - на литокластические (из обломков пород), кристаллокластические (из кристаллов и их обломков), встречающиеся редко, и смешанные кристаллолитокластические, наиболее распространённые. Диагностика и, как следствие, выделе-

ние кимберлитовых туфов (и туффизитов) не всегда просты - наиболее надёжным признаком их распознавания являются наличие горизонтальной слоистости и геологическое положение. Туфы обычно имеют ограниченное распространение, но в слабоэродированных полях, характерных для провинции Лунда Норте в северо-восточной части Анголы, они входят в виде отдельных слоёв в состав горизонтально залегающих вулканогенно-осадочных толщ кимберлитового состава или фрагментов туфовых воротников по обрамлению кратеров, и, по нашему мнению, их принадлежность к кимберлитовым туфам несомненна. В ряде случаев, при наблюдении резких контактов с другими породами, их правильней было бы назвать туффизитами – интрузивными туфами. Иногда интенсивная гидротермальная цементация



Рис. 4. Монтичеллитовый кимберлит (А–В) и псефито-псаммитовый кимберлитовый туффит (Г):

А – трубка Дальная, шлиф 1/15, ув. ×30, николи П; Б – трубка Новинка, шлиф Н-125, ув. ×30, николи П; В – трубка Удачная, шлиф У/99, ув. ×30, николи П; Г – трубка Камитонго 1 (Ангола), штуф 1/4

пород придаёт породам облик кимберлитовых брекчий и на принадлежность к туфам могут указывать слоистые текстуры и хлорит-гидрослюдистый характер цемента. В отдельных образцах эксплозивнообломочных пород, в отличие от автолитов, содержащих то или иное количество фенокристаллов и микролитов оливина и флогопита, отмечаются округлые кимберлитовые включения афировых и спорадофировых кимберлитов с серпентин-карбонатным базисом, которые схожи с бомбами и лапиллями (гипобомбами), так как состоят в основном из аповитрофирового материала. Подобные породы отмечены в разрезах верхних частей трубок Анголы и отнесены к кимберлитовым туфобрекчиям. При нахождении данной разновидности кимберлитов в диатремовой фации или в составе пластических инъекционных даек их следует относить к туффизитам. Здесь следует согласиться с имеющимися мнениями [6], что данные породы образовались в процессе

взрывов магмы в подводящем канале ниже дневной поверхности. Очевидно, что такие разновидности являются полигенными. Осадочно-вулканокластические породы наименее распространены в кимберлитовых постройках и представлены туффитами. Последние наряду с выброшенным при извержении пирокластическим кимберлитовым материалом, в отличие от ксенотуфов и ксенотуфобрекчий, содержат [7, 24] примесь не гетерогенных обломков, а только осадочных (вмещающих) пород в количестве менее 50% (пирокластического материала 50-90%). Эта разновидность кимберлитовых пород по текстурно-структурным и другим особенностям ничем не отличается от туффитов других вулканических формаций: по размеру пирокластического материала выделяются псефитовые, псаммитовые, алевритовые и пелитовые разновидности. Цемент может быть карбонатным, монтмориллонитовым, хлоритовым, хлорит-гидрослюдистым и др.

В группу вулканогенно-осадочных пород входят вулканокласто-осадочные, тефроидные и вулканотерригенные образования с содержанием осадочного материала более 50%. Из этих трёх типов среди кимберлитовых пород пока реально можно выделить только вулканокласто-осадочные, в которых кимберлитовый материал (40-20% и менее) присутствует в виде обломков брекчий, автолитов, зёрен минералов-спутников и др., а также труднодиагностируемые вулкано-терригенные породы. Среди первых по размерам и характеру обломочного материала выделяются туфоконгломераты, туфогравелиты, туфопесчаники, туфоалевролиты. Вулкано-терригенные породы состоят из окатанных и отсортированных обломков вулканических пород, образующихся за счёт разрушения вулканитов. Они не синхронны извержению и накапливаются после нивелировки вулканической постройки при разрушении вулканических пород жерла (кратера) или тефроидов, с их перекрытием. Тефроидные породы кимберлитовой природы пока не обнаружены, но они предусмотрены в классификации, так как их выбросы, сцементированные гидрохимическим веществом, могут служить прототипом кимберлитовых туфов и туфобрекчий, сохранившихся в отрицательных формах рельефа на различном расстоянии от диатрем. Вулкано-терригенные породы, по существу, являются одной из генетических разновидностей россыпей ближнего сноса с характерными для них признаками. Среди таковых особое значение имеет прямая и обратная микроцикличность, где наиболее продуктивными будут грубообломочные образования в первом случае. В связи с очень быстрой дезинтеграцией кимберлитов в экзогенных условиях и обычной эродированностью наземных и верхних частей кимберлитовых вулканов в большинстве известных кимберлитовых провинций вулкано-терригенные отложения перемыты или подвергнуты глубоким изменениям в КВ и поэтому трудно распознаваемы. Представляется целесообразным к этой группе пород относить и туфобрекчии со слоистыми текстурами. Последнюю группу (осадочно-кластических образований) представляют синхронные и несинхронные вулканизму образования, сформировавшиеся преимущественно после предыдущих пяти групп и включают спектр разнофациальных осадочных отложений с различной гранулометрией частиц. Большинство из них выделяются под названием «эпикластические отложения», которые включают спектр осадочных образований с содержанием кимберлитового материала менее 1-2% (например, песчаники с примесью кимберлитового материала), гетеролитовые брекчии с содержанием кимберлитового материала менее 1-2%, состоящие из обломков пород геологического разреза района. Следует отметить также типизацию на основании роли слюды, по количеству которой кимберлитовые породы разделяются на два минералогических типа: базальтоидный и слюдяной (лампрофировый) с последующим выделением в каждом типе отмеченных выше текстурных разновидностей – массивных (порфировых) кимберлитов, КБ, туфов и туфобрекчий. Указанным двум типам кимберлитов отвечают, в принципе, две группы кимберлитов, выделяемых на ЮАП – I и II соответственно. Анализируя распределение отмеченного спектра кимберлитовых пород в объёме диатрем СП можно констатировать, что пирокластические кимберлитовые туфы и туфобрекчии слагают верхние части кратеров, образуя тела мощностью от 30-35 (трубка Одинцова) до 230-250 м (трубка Юбилейная). В последнем случае толща пирокластических образований была нарушена более поздней фазой внедрения автолитовой кимберлитовой брекчии. Эпикластический туфогенный кимберлитовый материал достоверно установлен в кровле кратера трубки Краснопресненская в виде прослоев и линз в терригенных породах тегерюкской свиты нижнего карбона.

В промышленных месторождениях алмазов автолитовая кимберлитовая брекчия характеризуется наибольшей продуктивностью (трубки Мир, Интернациональная, Ботуобинская, Нюрбинская, Айхал, Юбилейная, Удачная и др.) по сравнению с порфировыми кимберлитами гипабиссальной фазы, а в средне- и низкоалмазоносных трубках наблюдается обратная закономерность (трубки Заполярная, Комсомольская-Магнитная, Дальняя, Искорка и др.). По характеру взаимоотношений субвулканической (гипабиссальной) и вулканической фаз заполнения диатрем в пределах кимберлитовых полей СП можно выделить три группы трубок: 1) кимберлитовые тела, где ПК субвулканической фазы образуют самостоятельные рудные столбы, при примерных объёмных соотношениях с автолитовой КБ вулканической фазы 1:1 (трубки Заполярная, Байтахская и др.), 1:2 (Дальняя, Сытыканская, Молодость и др.), 1:4 (Юбилейная, Ботуобинская, Удачная), 1:10 (Комсомольская, Геофизическая и др.); 2) трубки, в которых порфировый кимберлит присутствует в АКБ в виде многочисленных обломков и отдельных крупных (десятки метров) блоков, не образуя рудных столбов (трубки Краснопресненская, Кылахская, Восток, Мир, Нюрбинская и др.), а объёмная доля порфирового кимберлита относительно автолитовой кимберлитовой брекчии варьирует от 1:30 до 1:100; 3) кимберлитовые тела, где ПК присутствуют в КБ в виде многочисленных мелких обломков (трубки им. 325 лет Якутии, Мархинская, Заря, Маршрутная, Ленинградская,

Зарница, Якутская, Долгожданная и др.). Промышленные содержания алмазов фиксируются в трубках первой и второй групп, а третья группа представляет низкоалмазоносные кимберлитовые трубки. Необходимо отметить важность оптико-микроскопического изучения основной массы кимберлитовых пород, что позволяет детализировать минералогические особенности и показатели эволюции выделяемых типов и разновидностей кимберлитов. В процессе таких исследований выделены монтичеллитсодержащие кимберлиты (см. фото 4, А-В) центральных районов провинции (трубки Удачная Восточная, Дальняя, трубки Верхне-Мунского поля и др.), которые являются алмазоносными, в том числе промышленно значимыми. Монтичеллит – характерный минерал для многих среднепалеозойских кимберлитовых тел СП, и его распространённость в них, прежде всего, определяется степенью вторичного преобразования пород. Монтичеллиты из кимберлитовых тел северных и южных полей широко перекрываются по составу. С другой стороны, в пределах одной сложнопостроенной диатремы (например, Удачная-Восточная) монтичеллиты в кимберлитах отдельных фаз внедрения могут резко отличаться по геохимии микроэлементов и составу. Высокомагнезиальные монтичеллиты (Mg/(Mg + Fe) = 92–97%) из кимберлитов (трубки Дальняя, Новинка и др.) имеют метасоматический генезис. Среди достаточно широкого спектра кимберлитовых и комагматичных им пород СП слюдяные кимберлиты с диопсидом в основной массе встречаются реже, чем монтичеллитовые разновидности пород. Отдельные тела, сложенные подобными породами, наиболее распространены в северной части СП, а в южной части подобные образования встречаются в виде отдельных обломков в диатремах (Удачная, Сытыканская, Юбилейная, Таёжная) и слагают небольшие по размеру трубки или отдельные фазы в них (трубки Загадочная, Буковинская).

Типизация кимберлитов промышленно алмазоносных полей по петрографо-минералогическим признакам с выделением монтичеллитовых и диопсид-флогопит-оливиновых разновидностей позволила проследить в общем виде эволюцию родоначальных кимберлитовых расплавов от периода, предшествовавшего образованию диатрем, до заключительного этапа, связанного с образованием внутритрубочных жил и инъекций. На начальном субвулканическом этапе формирования южных кимберлитовых полей происходило внедрение даек, затем штоков, реже образование отдельных трубочных тел, выполненных породами, которые мы обычно наблюдаем в виде обломков слюдяных кимберлитов. Исходя из состава этих кимберлитов и минералов, их слагающих, видно, что первые порции расплава

были обогащены [4, 16, 25, 32] кремнием, титаном, алюминием, щелочами, железом и обеднены магнием. В соответствии с этим образованные породы по ряду особенностей (в частности, присутствию в них высокотитанистых флогопитов и титанистых диопсидов) конвергентны лампрофирам или оливиновым лампроитам. Присутствие в расплаве достаточного количества щелочей, воды и кремнезёма способствовало массовой кристаллизации флогопита, в результате чего кристаллизующиеся на заключительных стадиях рудные минералы обеднены алюминием, содержание глинозёма в них не превышает 0,6%. Дальнейшая эволюция расплава связана с накоплением летучих и кальция и формированием кимберлитов дотрубочных жил, штоков и разновидностей кимберлитовых брекчий. Крупнейшая трубка СП – Юбилейная – является уникальным кимберлитовым телом и в геологическом отношении она характеризуется полным набором морфологических элементов - подводящей дайковой корневой системой, диатремой и кратерным чашеобразным расширением. В пределах её восточной части выделены три самостоятельные фазы внедрения кимберлитов (крупнопорфировый, дейтеропорфировый кимберлит и брекчия расщепления), отличающиеся между собой по текстурно-структурным, минералого-геохимическим признакам и алмазоносности. По контактовым взаимоотношениям между выделенными фазами кимберлитов установлена их последовательность формирования. На начальном субвулканическом этапе, предшествующем образованию трубки, происходило внедрение дайковых кимберлитовых тел, сложенных слюдистым крупнопорфировым кимберлитом, конвергентным по ряду вещественных признаков лампрофирам или оливиновым лампроитам. Дальнейшая эволюция кимберлитового расплава, связанная с процессами фракционной кристаллизации, флюидно-магматической дифференциации, а также захватом расплавом коровых и осадочных пород, привела к образованию различных брекчиевых кимберлитовых пород.

Выявлено своеобразие вещественного состава кимберлитов трубки Загадочная Далдынского поля (ДКП), которое заключается [4, 9, 25, 32] в следующих особенностях: а) значительном количестве гроспидитов, дистеновых эклогитов и практически полном отсутствии ультраосновных включений в породе; б) резком преобладании граната (главным образом эклогитового парагенезиса) и хромита над пикроильменитом, который характеризуется повышенными концентрациями Cr_2O_3 и MgO; в) высоком содержании в породе клинопироксена, образующего по составу широкий ряд от хромдиопсидов до кальциевых диопсидов; г) прямой зональности вкрапленников флогопита, по характеру аналогичной с зональностью таковых из лампроитов; д) ярко выраженной индивидуальности по содержанию микроэлементов (особенно некогерентных и радиоактивных). По минералого-петрографическим особенностям кимберлит трубки Загадочная проявляет сходство с оливинфлогопитовыми лампроитами, а также слюдяными кимберлитами, встречающимися в виде обломков в ряде других трубок (Удачная, Сытыканская и др.).

Сопоставление химических составов кимберлитов Накынского поля (НКП) с петрохимическими типами кимберлитов СП по данным факторного анализа показывает, что кимберлиты НКП в целом относятся к магнезиальным и кальцит-магнезиальным типам. При этом наиболее карбонатизированными являются кимберлиты трубки Нюрбинская. Следует отметить, что, несмотря на присутствие в переменных количествах флогопита в кимберлитовых брекчиях и порфировых кимберлитах НКП, они не попадают в поле типичных слюдяных петрохимических типов кимберлитов трубок Загадочная, Юбилейная, Удачная. Для кимберлитов этого поля характерны низкие содержания оксидно-рудных минералов и редкая встречаемость перовскита.

С ранним этапом проявления кимберлитового магматизма в ДКП связано формирование жильных тел, выполненных слюдяным кимберлитом с пироксеновой основной массой и кальцитовым кимберлитом, содержащим переменное количество флогопита. Вслед за кимберлитовыми жилами, часто наблюдаемыми в трубках, внедрялись штокообразные тела, сложенные монтичеллитовым массивным кимберлитом и слюдистой разновидностью, близкой по вещественному составу кальцитовому кимберлиту жил. Особенности внутреннего строения многофазных трубок свидетельствуют о том, что многие кимберлитовые жилы и дайки являлись «слепыми» и образовались на значительных глубинах от дневной поверхности. Принимая во внимание вышеуказанные данные, а также последовательность формирования разнообразных по вещественному составу кимберлитов во многих многофазных трубках ДКП, можно уверенно предполагать проявление не менее двух этапов кимберлитового магматизма в пределах рассматриваемого района. Проявление основного объёма кимберлитового материала в виде образования отдельных трубок, жил или самостоятельных фаз кимберлитов в уже сформировавшихся диатремах происходило во второй этап кимберлитового магматизма. Разница по возрасту отдельных фаз внедрения внутри одной трубки, по геологическим наблюдениям и радиологическим данным, может достигать 15-20 млн лет. Установленные типы кимберлитов и комагматичные им породы многофазных трубок отличаются между собой по количеству, соотношению и типохимизму протоминералов, а также по алмазоносности (содержанию, типоморфизму крупных и мелких кристаллов).

Весьма важным составным компонентом кимберлитов являются ксенолиты мантийных пород, которые являются главнейшим источником информации о составе глубинных зон Земли и играют определяющую роль для расшифровки процессов кимберлитои алмазообразования. К настоящему времени усилиями многих исследователей наработан обширный фактический материал по вещественному составу распространённых мантийных парагенезисов, выносимых кимберлитами к поверхности в виде глубинных ксенолитов, прежде всего, по их геохимии и составу породообразующих минералов. В значительно меньшей степени проводились изотопно-геохимические исследования, которые тем не менее дали важнейшие результаты относительно возраста мантийных пород и особенностей двух главных процессов в глубинах Земли - мантийного метасоматоза и частичного плавления мантийных субстратов, приводящих к появлению проторасплавов, кристаллизующихся затем в виде широкого спектра алмазоносных кимберлитов и родственных пород. Глубинные ксенолиты в кимберлитах представляют три семейства пород: ультраосновные, основные и промежуточные при заметном преобладании в большинстве трубок первых, включающих дуниты (гранат + оливин + шпинель ± алмаз), верлиты (гранат + оливин + + клинопироксен + шпинель), гарцбургиты (гранат + + оливин + ортопироксен ± алмаз), лерцолиты (гранат + оливин + клинопироксен + ортопироксен + + шпинель), ильменитовые перидотиты (гранат + оливин + ильменит + ортопироксен ± клинопироксен ± флогопит), вебстериты (гранат + клинопироксен + ортопироксен). По текстурно-структурным признакам они подразделяются на равномернозернистые (крупно- и среднезернистые гранобластовые или пойкилобластовые [6, 10, 24]) и порфировые (порфировидные). На основании всестороннего изучения ультраосновных нодулей разделяют их на две группы [8, 25]: магнезиальные и магнезиальножелезистые. Последняя группа объединяет ильменитсодержащие разновидности. Основные породы в ксенолитах представлены магнезиально-железистыми, магнезиальными (нередко с энстатитом), дистеновыми и корундовыми эклогитами, гроспидитами. Иногда внимание акцентируется на особой роли гранатов и пироксенов при анализе особенностей состава минералов перидотитов, что вызвано равновесием между ними в зависимости от температуры и давления. Среди гранатсодержащих ксенолитов ультраосновного состава этим исследователем

выделяются следующие ассоциации: 1) пироп + оливин, 2) пироп + оливин + энстатит, 3) пироп + оливин + + энстатит + диопсид, 4) пироп + оливин + диопсид, 5) пироп + энстатит + диопсид, 6) пироп + диопсид при наличии акцессорных шпинелидов в большинстве ассоциаций и наиболее широком распространении третьей ассоциации с вариациями компонентов, а также пятой ассоциации. Перечисленные ассоциации устойчивы в широком диапазоне температур и давлений и охватывают графит-пироповую и алмаз-пироповую фации глубинности в соответствии с фазовой границей графит-алмаз [22-25, 28]. Алмазпироповая фация включает алмазсодержащие и потенциально алмазоносные (по составу минералов идентичные алмазоносным) минеральные ассоциации: дуниты, верлиты, гарцбургиты и лерцолиты, а также гранатовые пироксениты и ильменитовые перидотиты. Примечательно, что, несмотря на меньшую распространённость эклогитовых ксенолитов, их находки с алмазами более часты, чем перидотитовые. Данные по предельному содержанию хромовой компоненты и примеси натрия в гранатах, а калия в пироксенах – из парагенезисов алмаз-пироповой фации глубинности, указывают [24-26] на их кристаллизацию при давлениях от 45-50 до 60-70 кбар, что отвечает глубинам 150-230 км.

Анализ распределения мантийных нодулей в кимберлитах СП показывает, что для южной части региона примечательны высокомагнезиальные гранатовые перидотиты и пироксениты, которые определяют специфику всей популяции мантийных ксенолитов в трубке Мир. Преобладающие здесь гранатовые перидотиты представлены типичными для кимберлитов двупироксеновыми парагенезисами, довольно сильно истощёнными магмофильными компонентами. В петрографическом смысле они относятся преимущественно к гарцбургитам [20, 24 и др.]. Среди пироксенитов также преобладают двупироксеновые парагенезисы, преимущественно вебстериты. Редкие гранатовые клинопироксениты сходны с эклогитами по минеральному составу, но отличаются от них высокой магнезиальностью и повышенной хромистостью силикатов наряду с низким содержанием жадеитовой молекулы в клинопироксенах. Наиболее глубинные породы в пределах Мирнинского кимберлитового поля (МКП) представлены катаклазированными гранатовыми перидотитами; к ним по глубинности, вероятно, близки ильменит-гранатовые верлиты с порфирокластическими структурами, а также дискретные нодули (мегакристы) низкохромистой серии (титановая ассоциация вкрапленников). Тенденция обогащения титаном и железом характеризует процессы мантийного Fe-Ti метасоматоза у нижней кромки литосферы. В поле стабильности

кристаллические алмазоносные дунит-гарцбургиты (в трубке Мир их находки пока редки), а также алмазоносные эклогиты и пироксениты. Над уровнем алмазосодержащих пород залегают недеформированные гранатовые перидотиты, переслаивающиеся с пёстрыми по составу гранатовыми пироксенитами. Эта наиболее широко распространённая в трубке группа пород была равновесна в поле устойчивости графита при относительно низких температурах. Наименее глубинный мантийный слой в трубке Мир представлен шпинелевыми и переходными гранатизированными шпинелевыми перидотитами и пироксенитами. В трубке Удачная мантийные нодули представлены широким спектром пород, наиболее глубинными среди которых являются деплетированные в архейское время мегакристаллические перидотиты, которые, вероятнее всего, являются материнскими для абсолютного большинства (более 90%) алмазов этого региона [8-10]. В целом в кимберлитах данной трубки, аналогично трубкам Мир и Сытыканская, отмечены практически все известные в кимберлитовых диатремах СП разновидности ультраосновных и основных пород, но преобладающими являются [22-25] гранатовые лерцолиты порфиробластовые деформированные (более 39% всех мантийных ксенолитов) и гранатовые лерцолиты (21%). В трубке Сытыканская (Алакит-Мархинское поле), как и в трубке Мир, доминируют гранатовые лерцолиты, при значительной доле (15,3%) шпинелевых лерцолитов. Здесь же несколько выше (более 5%) встречаемость эклогитов, ильменитовых перидотитов и ильменит-гранатовых перидотитов. Таким образом, кимберлиты установлены на всех

алмаза, вероятно, могут быть распространены мега-

древних платформах Земли, а основной формой их проявления являются воронкообразные брекчиевые вулканические трубки взрыва маар-диатремового типа, верхние части которых венчаются кратерными постройками, а на глубине (от 1000 до 2500 м) диатремы переходят в дайки. Сохранность кратерных частей зависит от величины «посткимберлитового» эрозионного среза территории, а корневые части вскрыты только в отдельных трубках (Мир и некоторые другие) в силу большой глубины залегания и небольшой мощности даек (жил). Петрографический спектр кимберлитовых образований характеризует трёхфациальный разрез (кратер, диатрему и корневую гипабиссальную зону) и обнаруживает соответствующие текстурно-структурные отличительные черты. Для кимберлитовых диатрем примечательны отсутствие больших объёмов вытесненных пород и плутонических комплексов, выраженное в минеральном и химическом составе насыщенность летучими, при высокой доле СО,, относительно

низкотемпературный характер доминирующей части кимберлитовых минералов, присутствие слабо раскристаллизованных участков и другие признаки быстрого внедрения, наличие ксенолитов мантийных, коровых и вмещающих пород, присутствие алмазов, примеры перехода диатрем в дайки, признаки взрывного генезиса, наличие до-, син- и посттрубочных даек, отсутствие термометаморфизма, широкие качественно-количественные вариации минерального состава между сообществами тел и отдельно взятыми проявлениями. Облик и состав разнофациальных кимберлитовых пород (порфировые кимберлиты, кимберлитовые и автолитовые кимберлитовые брекчии, туфобрекчии и туфы) во многом определяются качественно-количественным спектром вторичных минералов, главными из которых являются серпентин и карбонаты, а к второстепенным отнесены все остальные минералы, образовавшиеся на разных стадиях становления кимберлитовых трубок и представляющие различные минералогические классы - силикаты, карбонаты, оксиды и гидроксиды, сульфиды, сульфаты, галогениды, фосфаты, бораты и битумы. Установленные монтичеллитовые и диопсид-флогопит-оливиновыеразновидности кимберлитов позволяют проследить различные этапы эволюции родоначальных кимберлитовых расплавов.

Мантийный разрез северной части провинции можно охарактеризовать по ксенолитам в кимберлитовой трубке Обнаженная, которая является одной из наиболее богатых включениями глубинных пород,

содержание которых достигает 2,5 об. %. В трубке выделяются два небольших участка, насыщенные нодулями, причём в одном из них преобладают перидотиты, а в другом - эклогиты. Отмечаются повышенные содержания безгранатовых перидотитов и разнообразных гранат-пироксеновых пород. Встречаются также своеобразные гранатовые пироксениты, переходные по содержанию оливина от эклогита к перидотиту, часто отмечаются пироксениты и перидотиты с развитием граната вокруг зёрен хромшпинелида. Отличие мантийного материала трубки Обнаженная от такового большинства других трубок СП, в которых гранатовые перидотиты резко преобладают над всеми остальными разновидностями глубинных нодулей, состоит в весьма большом содержании гранатовых пироксенитов (38%) и эклогитов (26%). В трубке Обнаженная менее одной шестой глубинных нодулей приходится на породы, образовавшиеся при умеренных давлениях шпинелевой фации: дуниты, перидотиты (лерцолиты, гарцбургиты) - около 3 % и пироксениты (энстатититы и вебстериты) - около 4%, флогопитовые пироксениты и слюдиты, глиммериты, слюдистые перидотиты - около 8%. К породам, сформировавшимся при более высоких давлениях, в зоне устойчивости пиропового граната, относятся гранатовые лерцолиты (9%), пироксениты (40%), эклогиты (13%), ильменитсодержащие слюдиты, перидотиты и пироксениты (4%), а также гранатизированные перидотиты и пироксениты, количество которых достигает 10%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Афанасьев В. П., Елисеев А. П., Надолинный В. А., Зинчук Н. Н., Коптиль В. И., Рылов Г. М., Томиленко А. А., Горяйнов С. В., Юрьева О.П., Сонин В. М., Чепуров А. И. Минералогия и некоторые вопросы генезиса алмазов V и VII разновидностей (по классификации Ю. Л. Орлова) // Вестник Воронежского госуниверситета. Геология. 2000. № 5. С. 79–97.
- Афанасьев В. П., Зинчук Н. Н. Основные литодинамические типы ореолов индикаторных минералов кимберлитов и обстановки их формирования // Геология рудных месторождений. – 1999. – Т. 41, № 3. – С. 281–288.
- 3. *Афанасьев В.П., Зинчук Н.Н., Коптиль В.И.* Полигенез алмазов в связи с проблемой коренных россыпей северо-востока Сибирской платформы // Доклады Академии наук. 1998. Т. 361, № 3. С. 366–369.
- 4. Афанасьев В. П., Зинчук Н. Н., Логинова А. Н. Особенности распределения россыпных алмазов, связанных

с докембрийскими источниками // Записки Российского минералогического общества. – 2009. – Т. 138, № 2. – С. 1–13.

- Афанасьев В. П., Похиленко Н. П., Логвинова А. М., Зинчук Н. Н., Ефимова Э. С., Сафьянников В. И., Красавчиков В. О., Подгорных М. М., Пругов В. П. Особенности морфологии и состава некоторых хромшпинелидов алмазоносных площадей в связи с проблемой «ложных» индикаторов кимберлитов // Геология и геофизика. 2000. Т. 41. № 12. С. 1729–1741.
- Василенко В. Б., Зинчук Н. Н., Кузнецова Л. Г. Автолитовые кимберлиты как продукт вязкостной дифференциации кимберлитового расплава в диатремах // Петрология. – 2000. – Т. 8, № 3. – С. 549–560.
- Василенко В. Б., Зинчук Н. Н., Кузнецова Л. Г. Геодинамический контроль размещения кимберлитовых полей центральной и северной частей Якутской кимберлитовой провинции (петрохимический аспект) // Вестник Воронежского госуниверситета. Геология. – 2000. – № 3 (9). – С. 37–55.

- Василенко В. Б., Зинчук Н. Н., Кузнецова Л. Г. О сопряжённости составов глубинных включений в петрохимических разновидностях кимберлитов в диатремах Якутии // Петрология. – 2001. – Т. 9, № 1. – С. 1–12.
- Горшков А. И., Зинчук Н. Н., Котельников Д. Д., Шлыков В. Г., Жухлистов А. П., Мохов А. В., Сивцов А. В. Новый упорядоченный смешанослойный минерал – лизардит-сапонит из кимберлитов Южной Африки // Доклады РАН. – 2002. – Т. 382, № 3. – С. 374–378.
- 10. Егоров К.Н., Зинчук Н.Н., Мишенин С.Г., Серов В.П., Секерин А.П., Галенко В.П., Денисенко Е.П., Барышев А.С., Меньшагин Ю.В., Кошкарев Д.А. Перспективы коренной и россыпной алмазоносности Юго-Западной части Сибирской платформы // Геологические аспекты минерально-сырьевой базы Акционерной компании «АЛРОСА»: современное состояние, перспективы, решения. Дополнительные материалы по итогам региональной научно-практической конференции «Актуальные проблемы геологической отрасли АК «АЛРОСА» и научно-методическое обеспечение их решений», посвященной 35-летию ЯНИГП ЦНИГРИ АК «АЛРОСА».– Мирный: МГТ, 2003.– С. 50–84.
- 11. Зинчук Н. Н. Влияние вторичных минералов на облик и состав кимберлитовых пород // Геология и геофизика. 1998. Т. 39, № 12. С. 1704–1715.
- 12. Зинчук Н.Н. Геологические исследования при поисках алмазных месторождений // Вестник Воронежского университета. Геология. 2021. № 4. С. 35–52.
- 13. Зинчук Н.Н. Докембрийские источники алмазов в россыпях фанерозоя // Вестник Воронежского ун-та. Геология. 2021. № 3. С. 50–61.
- Зинчук Н. Н. Об основных источниках глинистых минералов в мезозойских континентальных алмазоносных отложениях Западной Якутии // Геология и геофизика. – 1982. – № 8. – С. 81–90.
- 15. Зинчук Н. Н. Особенности минералов слюд в кимберлитах // Вестник Воронежского университета. Геология. – 2018. – № 2. – С. 29–39.
- Зинчук Н. Н. Особенности состава и распределения слюдистых образований в кимберлитовых породах Якутии // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. – 1991. – № 7. – С. 58–66.
- 17. Зинчук Н. Н. Роль петролого-минералогических и геохимических исследований в оценке потенциальной алмазоносности кимберлитов // Отечественная геология. – 2022. – № 1. – С. 36–47.
- Зинчук Н. Н. Состав и генезис глинистых минералов в верхнепалеозойских осадочных толщах восточного борта Тунгусской синеклизы // Геология и геофизика. – 1981. – № 8. – С. 22–29.
- Зинчук Н. Н. Типоморфные свойства индикаторных минералов кимберлитов и их использование при прогнозировании месторождений алмаза на Сибирской платформе // Отечественная геология. – 2021. – № 2. – С. 41–56.
- Зинчук Н. Н., Афанасьев В. П. Генетические типы и основные закономерности формирования алмазоносных россыпей // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 1998. № 2. С. 66–71.

- Зинчук Н. Н., Бардухинов Л.Д. О специфике изучения алмаза при прогнозно-поисковых работах (на примере Сибирской платформы) // Руды и металлы. – 2021. – № 3. – С. 59–75.
- 22. Зинчук Н. Н., Борис Е. И. О концентрации продуктов переотложения кор выветривания в верхнепалеозойских осадочных толщах восточного борта Тунгусской синеклизы // Геология и геофизика. 1981. № 8. С. 22–29.
- Зинчук Н. Н., Борис Е. И., Стегницкий Ю. Б. Структурноформационное и минерагеническое районирование территорий развития погребенных кор выветривания и продуктов их переотложения в алмазоносных регионах (на примере Якутской кимберлитовой провинции) // Геология и геофизика. – 1998. – Т. 39, № 7. – С. 950–964.
- 24. Зинчук Н. Н., Зинчук М. Н., Котельников Д. Д., Шлыков В. Г., Жухлистов А. П. Структурно-кристаллохимические преобразования слоистых минералов на разных стадиях гипергенного изменения кимберлитов // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. – 2002. – № 1. – С. 47–60.
- Зинчук Н. Н., Зуев В. М., Коптиль В. И., Чёрный С. Д. Стратегия ведения и результаты алмазопоисковых работ // Горный вестник. – 1997. – № 3. – С. 53–57.
- 26. Зинчук Н. Н., Котельников Д. Д., Горшков А. И. Идентификация и генезис лизардит-сапонитового смешанослойного образования в кимберлитах одной из трубок Южной Африки // Литология и полезные ископаемые. – 2003. – № 1. – С. 87–96.
- Зинчук Н. Н., Котельников Д. Д., Соколов В. Н. Изменение минерального состава и структурных особенностей кимберлитов Якутии в процессе выветривания // Геология и геофизика. – 1982. – № 2. – С. 42–53.
- Зинчук Н. Н., Мельник Ю. М., Серенко В. П. Апокимберлитовые породы // Геология и геофизика. – 1987. – № 10. – С. 66–72.
- 29. Котельников Д.Д., Зинчук Н.Н. Об аномалии общей схемы преобразования разбухающих глинистых минералов при погружении содержащих их отложений в стратисферу // Вестник Воронежского госуниверситета. Серия геология. 2003. № 2. С. 57–68.
- Котельников Д.Д., Зинчук Н. Н. Особенности глинистых минералов в отложениях различных осадочных формаций // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 1997. № 2. С. 53–63.
- Котельников Д. Д., Зинчук Н. Н. Типоморфные особенности и палеогеографическое значение слюдистых минералов // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 1996. № 1. С. 53–61.
- Котельников Д. Д., Зинчук Н. Н. Условия накопления и постседиментационного преобразования глинистых минералов в осадочном чехле земной коры // Вестник Воронежского университета. Геология. – 2001. – № 12. – С. 45–51.
- Савко А.Д., Зинчук Н.Н., Шевырёв Л.Т., Ильяш В.В., Афанасьев Н.С. Алмазоносность Воронежской антеклизы. Труды НИИГ Воронежского ун-та. – 2003. – Т. 17. – 121 с.

- 34. Харькив А.Д., Зуенко В. В., Зинчук Н. Н., Крючков А. И., Уханов А. В., Богатых М. М. Петрохимия кимберлитов. – М. : Недра, 1991. – 304 с.
- 35. *Хитров В. Г., Зинчук Н. Н., Котельников Д. Д.* Применение кластер-анализа для выяснения закономерностей выветривания пород различного состава // Доклады АН СССР. 1987. Т. 296, № 5. С. 1228–1233.
- Grachanov S. A., Zinchuk N. N., Sobolev N. V. The age of Predictable primary diamond sources in the Northeastern Sibirian platform // Doklady Earth Sciences. - 2015. -V. 465, № 2. - P. 1297-1301.
- Hawthorne J. B. Model of a kimberlite pipe // Phys. Chem. Earth. – 1975. – № 9. – P. 1–15.

REFERENCES

- Afanas'yev V.P., Yeliseyev A.P., Nadolinnyy V.A., Zinchuk N.N., Koptil' V.I., Rylov G.M., Tomilenko A.A., Goryaynov S. V., Yur'yeva O. P., Sonin V. M., Chepurov A. I. Mineralogiya i nekotoryye voprosy genezisa almazov V i VII raznovidnostey (po klassifikatsii Yu. L. Orlova) [Mineralogy and some questions of the genesis of diamonds of V and VII varieties (according to the classification of Yu. L. Orlov)]. Vestnik Voronezhskogo gosuniversiteta. Geologiya, 2000, No. 5, P. 79–97. (In Russ.)
- Afanas'yev V.P., Zinchuk N.N. Osnovnyye litodinamicheskiye tipy oreolov indikatornykh mineralov kimberlitov i obstanovki ikh formirovaniya [The main lithodynamic types of aureoles of indicator minerals of kimberlites and their formation environment]. Geologiya rudnykh mestorozhdeniy, 1999, V. 41, No. 3, P. 281–288. (In Russ.)
- Afanas'yev V. P., Zinchuk N. N., Koptil' V. I. Poligenez almazov v svyazi s problemoy korennykh rossypey severovostoka Sibirskoy platformy [Diamond polygenesis in connection with the problem of bedrock placers in the northeast of the Siberian Platform]. Doklady Akademii nauk, 1998, V. 361, No. 3, P. 366–369. (In Russ.)
- Afanas'yev V.P., Zinchuk N.N., Loginova A.N. Osobennosti raspredeleniya rossypnykh almazov, svyazannykh s dokembriyskimi istochnikami [Features of the distribution of alluvial diamonds associated with Precambrian sources]. Zapiski Rossiyskogo mineralogicheskogo obshchestva, 2009, V. 138, No. 2, P. 1–13. (In Russ.)
- Afanas'yev V.P., Pokhilenko N.P., Logvinova A.M., Zinchuk N.N., Yefimova E.S., Saf'yannikov V.I., Krasavchikov V.O., Podgornykh M.M., Prugov V.P. Osobennosti morfologii i sostava nekotorykh khromshpinelidov almazonosnykh ploshchadey v svyazi s problemoy «lozhnykh» indikatorov kimberlitov [Features of the morphology and composition of some chrome-spinels of diamond-bearing areas in connection with the problem of «false» indicators of kimberlites]. Geologiya i geofizika, 2000, V. 41, No. 12, P. 1729–1741. (In Russ.)
- 6. Vasilenko V.B., Zinchuk N.N., Kuznetsova L. G. Avtolitovyye kimberlity kak produkt vyazkostnoy differentsiatsii

- Mitchell P. Kimberlites: mineralogy, geochemistry and petrology. – New York: Plenum Pub. Corp., 1986–1989.– 442 p.
- Scott Smith B. H. Lamproites and kimberlites in India // Weues Jahrbuch Miner. – 1989. – Abh. 161. – № 2. – P. 193–225.
- 40. Serov I. V., Garanin V. K., Zinchuk N. N., Rotman A. Ya. Mantle Sources of the kimberlite Vorcanism of the Sibirian Platform // Petrology. – 2001. – V. 9, № 6. – P. 576–588.
- Vasilenko V. B., Kuznetsova L. G., Volkova N. I. et al. Diamond potential estimation based on Kimberlite major element chemistry // Jornal of Geochecal Exploration. 2002. V. 76, № 2. P. 93–112.

kimberlitovogo rasplava v diatremakh [Autolithic kimberlites as a product of viscous differentiation of kimberlite melt in diatremes]. Petrologiya, 2000, V. 8, No. 3, P. 549–560. (In Russ.)

- Vasilenko V.B., Zinchuk N.N., Kuznetsova L.G. Geodinamicheskiy kontrol' razmeshcheniya kimberlitovykh poley tsentral'noy i severnoy chastey Yakutskoy kimberlitovoy provintsii (petrokhimicheskiy aspekt) [Geodynamic control of the location of kimberlite fields in the central and northern parts of the Yakut kimberlite province (petrochemical aspect)]. Vestnik Voronezhskogo gosuniversiteta. Geologiya, 2000, No. 3 (9), P. 37–55. (In Russ.)
- Vasilenko V. B., Zinchuk N. N., Kuznetsova L. G. O sopryazhonnosti sostavov glubinnykh vklyucheniy v petrokhimicheskikh raznovidnostyakh kimberlitov v diatremakh Yakutii [On the conjugation of compositions of deep-seated inclusions in petrochemical varieties of kimberlites in diatremes of Yakutia]. Petrologiya, 2001, V. 9, No. 1, P. 1–12. (In Russ.)
- Gorshkov A. I., Zinchuk N. N., Kotel'nikov D. D., Shlykov V.G., Zhukhlistov A. P., Mokhov A. V., Sivtsov A. V. Novyy uporyadochennyy smeshanosloynyy mineral lizarditsaponit iz kimberlitov Yuzhnoy Afriki [New ordered mixed-layer mineral lizardite-saponite from kimberlites South Africa]. Doklady RAN, 2002, V. 382, No. 3, P. 374– 378. (In Russ.)
- Yegorov K. N., Zinchuk N. N., Mishenin S. G., Serov V. P., Sekerin A. P., Galenko V. P., Denisenko Ye. P., Baryshev A.S., Men'shagin Yu. V., Koshkarev D.A. Perspektivy korennoy i rossypnoy almazonosnosti Yugo-Zapadnoy chasti Sibirskoy platformy [Prospects for bedrock and alluvial diamond content in the Southwestern part of the Siberian platform]. Additional materials based on the results of the regional scientific and practical conference "Actual problems of the geological industry of AK ALROSA and scientific and methodological suPort for their solutions", dedicated to the 35th anniversary of YANIGP TsNIGRI AK ALROSA, Mirnyy, MGT publ., 2003, P. 50–84. (In Russ.)
- 11. Zinchuk N. N. Vliyaniye vtorichnykh mineralov na oblik i sostav kimberlitovykh porod [Influence of secondary minerals on the aPearance and composition of kimberlite

rocks]. Geologiya i geofizika, 1998, V. 39, No. 12, P. 1704–1715. (In Russ.)

- Zinchuk N.N. Geologicheskiye issledovaniya pri poiskakh almaznykh mestorozhdeniy [Geological research in the search for diamond deposits]. Vestnik Voronezhskogo universiteta. Geologiya, 2021, No. 4, P. 35–52. (In Russ.)
- 13. Zinchuk N. N. Dokembriyskiye istochniki almazov v rossypyakh fanerozoya [Precambrian sources of diamonds in Phanerozoic placers]. Vestnik Voronezhskogo un-ta. Geologiya, 2021, No. 3, P. 50–61. (In Russ.)
- Zinchuk N. N. Ob osnovnykh istochnikakh glinistykh mineralov v mezozoyskikh kontinental'nykh almazonosnykh otlozheniyakh Zapadnoy Yakutii [On the main sources of clay minerals in the Mesozoic continental diamondiferous deposits of Western Yakutia]. Geologiya i geofizika, 1982, No. 8, P. 81–90. (In Russ.)
- 15. *Zinchuk N.N.* Osobennosti mineralov slyud v kimberlitakh [Features of micas minerals in kimberlites]. Vestnik Voronezhskogo universiteta. Geologiya, 2018, No. 2, P. 29–39. (In Russ.)
- 16. Zinchuk N. N. Osobennosti sostava i raspredeleniya slyudistykh obrazovaniy v kimberlitovykh porodakh Yakutii [Peculiarities of composition and distribution of micaceous formations in kimberlite rocks of Yakutia]. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geologiya i razvedka, 1991, No. 7, P. 58–66. (In Russ.)
- 17. Zinchuk N. N. Rol' petrologo-mineralogicheskikh i geokhimicheskikh issledovaniy v otsenke potentsial'noy almazonosnosti kimberlitov [The role of petrological, mineralogical and geochemical studies in assessing the potential diamond content of kimberlites]. Otechestvennaya geologiya, 2022, No. 1, P. 36–47. (In Russ.)
- Zinchuk N. N. Sostav i genezis glinistykh mineralov v verkhnepaleozoyskikh osadochnykh tolshchakh vostochnogo borta Tungusskoy sineklizy [The composition and genesis of clay minerals in the UPer Paleozoic sedimentary sequences of the eastern side of the Tunguska syneclise]. Geologiya i geofizika, 1981, No. 8, P. 22–29. (In Russ.)
- Zinchuk N.N. Tipomorfnyye svoystva indikatornykh mineralov kimberlitov i ikh ispol'zovaniye pri prognozirovanii mestorozhdeniy almaza na Sibirskoy platforme [Typomorphic properties of kimberlite indicator minerals and their use in predicting diamond deposits on the Siberian platform]. Otechestvennaya geologiya, 2021, No. 2, P. 41–56. (In Russ.)
- 20. Zinchuk N. N., Afanas'yev V. P. Geneticheskiye tipy i osnovnyye zakonomernosti formirovaniya almazonosnykh rossypey [Genetic types and main patterns of formation of diamond placers]. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geologiya i razvedka, 1998, No. 2, P. 66–71. (In Russ.)
- Zinchuk N. N., Bardukhinov L. D. O spetsifike izucheniya almaza pri prognozno-poiskovykh rabotakh (na primere Sibirskoy platformy) [On the specifics of the study of diamond during predictive and prospecting work (on the example of the Siberian platform)]. Rudy i metally, 2021, No. 3, P. 59–75. (In Russ.)
- 22. Zinchuk N.N., Boris Ye.I. O kontsentratsii produktov pereotlozheniya kor vyvetrivaniya v verkhnepaleozoyskikh osadochnykh tolshchakh vostochnogo borta Tungusskoy

sineklizy [On the concentration of weathering crust redeposition products in the UPer Paleozoic sedimentary strata of the eastern side of the Tunguska syneclise]. Geologiya i geofizika, 1981, No. 8, P. 22–29. (In Russ.)

- Zinchuk N. N., Boris Ye. I., Stegnitskiy Yu. B. Strukturnoformatsionnoye i mineragenicheskoye rayonirovaniye territoriy razvitiya pogrebennykh kor vyvetrivaniya i produktov ikh pereotlozheniya v almazonosnykh regionakh (na primere Yakutskoy kimberlitovoy provintsii) [Structural-formational and mineragenic zoning of the territories of development of buried weathering crusts and products of their redeposition in diamond-bearing regions (on the example of the Yakut kimberlite province)]. Geologiya i geofizika, 1998, V. 39, No. 7, P. 950– 964. (In Russ.)
- Zinchuk N. N., Zinchuk M. N., Kotel'nikov D. D., Shlykov V. G., Zhukhlistov A. P. Strukturno-kristallokhimicheskiye preobrazovaniya sloistykh mineralov na raznykh stadiyakh gipergennogo izmeneniya kimberlitov [Structural and crystallochemical transformations of layered minerals at different stages of hypergene alteration of kimberlites]. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geologiya i razvedka, 2002, No. 1, P. 47–60. (In Russ.)
- Zinchuk N. N., Zuyev V. M., Koptil' V. I., Chornyy S. D. Strategiya vedeniya i rezul'taty almazopoiskovykh rabot [The strategy of conducting and results of diamond prospecting]. Gornyy vestnik, 1997, No. 3, P. 53–57. (In Russ.)
- 26. Zinchuk N. N., Kotel'nikov D. D., Gorshkov A. I. Identifikatsiya i genezis lizardit-saponitovogo smeshanosloynogo obrazovaniya v kimberlitakh odnoy iz trubok Yuzhnoy Afriki [Identification and genesis of lizardite-saponite mixed-layer formation in kimberlites of one of the pipes of South Africa]. Litologiya i poleznyye iskopayemyye, 2003, No. 1, P. 87–96. (In Russ.)
- 27. Zinchuk N. N., Kotel'nikov D. D., Sokolov V. N. Izmeneniye mineral'nogo sostava i strukturnykh osobennostey kimberlitov Yakutii v protsesse vyvetrivaniya [Changes in the mineral composition and structural features of kimberlites of Yakutia during weathering]. Geologiya i geofizika, 1982, No. 2, P. 42–53. (In Russ.)
- 28. Zinchuk N. N., Mel'nik Yu. M., Serenko V. P. Apokimberlitovyye porody [Apokimberlite rocks]. Geologiya i geofizika, 1987, No. 10, P. 66–72. (In Russ.)
- 29. *Kotel'nikov D. D., Zinchuk N. N.* Ob anomalii obshchey skhemy preobrazovaniya razbukhayushchikh glinistykh mineralov pri pogruzhenii soderzhashchikh ikh otlozheniy v stratisferu [On the anomaly of the general scheme of transformation of swelling clay minerals during the immersion of sediments containing them into the stratisphere]. Vestnik Voronezhskogo gosuniversiteta. Seriya geologiya, 2003, No. 2, P. 57–68. (In Russ.)
- Kotel'nikov D. D., Zinchuk N. N. Osobennosti glinistykh mineralov v otlozheniyakh razlichnykh osadochnykh formatsiy [Peculiarities of clay minerals in deposits of various sedimentary formations]. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geologiya i razvedka, 1997, No. 2, P. 53–63. (In Russ.)
- 31. Kotel'nikov D. D., Zinchuk N. N. Tipomorfnyye osobennosti i paleogeograficheskoye znacheniye slyudistykh

mineralov [Typomorphic features and paleogeographical significance of micaceous minerals]. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geologiya i razvedka, 1996, No. 1, P. 53–61. (In Russ.)

- 32. *Kotel'nikov D. D., Zinchuk N. N.* Usloviya nakopleniya i postsedimentatsionnogo preobrazovaniya glinistykh mineralov v osadochnom chekhle zemnoy kory [Conditions of accumulation and post-sedimentary transformation of clay minerals in the sedimentary cover of the earth's crust]. Vestnik Voronezhskogo universiteta. Geologiya, 2001, No. 12, P. 45–51. (In Russ.)
- Savko A. D., Zinchuk N. N., Shevyrov L. T., Il'yash V. V., Afanas'yev N.S. Almazonosnost' Voronezhskoy anteklizy [Diamond potential of the Voronezh anteclise]. Trudy NIIG Voronezhskogo un-ta, 2003, V. 17, 121 p. (In Russ.)
- Khar'kiv A. D., Zuyenko V. V., Zinchuk N. N., Kryuchkov A. I., Ukhanov A. V., Bogatykh M. M. (In Russ.) Petrokhimiya kimberlitov [Petrochemistry of kimberlites]. Moscow, Nedra, 1991, 304 p.
- 35. *Khitrov V.G., Zinchuk N.N., Kotel'nikov D.D.* Primeneniye klaster-analiza dlya vyyasneniya zakonomernostey

vyvetrivaniya porod razlichnogo sostava [APlication of cluster analysis to elucidate the patterns of weathering of rocks of various compositions]. Doklady AN SSSR, 1987, V. 296, No. 5, P. 1228–1233. (In Russ.)

- Grachanov S. A., Zinchuk N. N., Sobolev N. V. The age of Predictable primary diamond sources in the Northeastern Sibirian platform. Doklady Eart Sciences, 2015, V. 465, No. 2, P. 1297–1301.
- 37. *Hawthorne J. B.* Model of a kimberlite pipe. Phys. Chem. Earth, 1975, No. 9, P. 1–15.
- Mitchell P. Kimberlites: mineralogy, geochemistry and petrology. New York, Plenum Pub. Corp., 1986–1989, 442 p.
- 39. *Scott Smith B. H.* Lamproites and kimberlites in India. Weues Jahrbuch Miner, 1989, Abh. 161, No. 2, P. 193–225.
- Serov I. V., Garanin V. K., Zinchuk N. N., Rotman A. Ya. Mantle Sources of the kimberlite Vorcanism of the Sibirian Platform. Petrology, 2001, V. 9, No. 6, P. 576–588.
- Vasilenko V. B., Kuznetsova L. G., Volkova N. I. et al. Diamond potential estimation based on Kimberlite major element chemistry. Jornal of Geochecal Exploration, 2002, V. 76, No. 2, P. 93–112.

Статья поступила в редакцию 30.07.22; одобрена после рецензирования 12.09.22; принята к публикации 26.10.22. The article was submitted 30.07.22; approved after reviewing 12.09.22; accepted for publication 26.10.22.

DOI:10.47765/0869-7175-2022-10034

УДК 550.4:551.2+544.731.15+549.21.211 © А. О. Серебрянников, А. М. Логвинова, Н. В. Соболев, 2022

Особенности микропримесного состава хромшпинелидоввключений в алмазах из кимберлитов Якутии

Выявлены особенности микропримесного состава хромшпинелидов-включений в 323 кристаллах алмаза из восьми кимберлитовых трубок двух алмазоносных районов Якутии методом микрозондового анализа. Приведены статистически обработанные данные по содержанию в них примеси Ni, Zn, V, Mn, Si. Показано, что хромшпинелиды в алмазах из кимберлитовых трубок разных регионов характеризуются различным содержанием микропримесных элементов. Выявленные различия в химическом составе хромшпинелидов-включений в алмазах, а также дефектно-примесном составе алмазов-матриц из разных, в том числе и близлежащих, кимберлитовых трубок Якутии свидетельствуют о наличии локальной неоднородности мантийного вещества в пределах одного кимберлитового поля. Эти данные подтверждают мнение большинства исследователей о гетерогенности состава мантийного вещества в разных регионах Якутской алмазоносной провинции.

Ключевые слова: мантия, хромшпинелид, алмаз, включение, микропримесные элементы, микрозондовый анализ, ИК-спектроскопия.

СЕРЕБРЯННИКОВ АЛЕКСЕЙ ОЛЕГОВИЧ, аспирант, инженер-исследователь, aos_97@ngs.ru

ЛОГВИНОВА АЛЛА МИХАЙЛОВНА, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, logv@igm.nsc.ru

СОБОЛЕВ НИКОЛАЙ ВЛАДИМИРОВИЧ, академик РАН

Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук (ИГМ СО РАН), г. Новосибирск

Specific features of the microimpurity composition of chrome-spinel inclusions in diamonds from kimberlites of Sakha-Yakutia

A. O. SEREBRIANNIKOV, A. M. LOGVINOVA, N. V. SOBOLEV

V. S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy Siberian Branch of Russian Academy of Sciences (IGM SB RAS), Novosibirsk

Specific features of the microimpurity composition of chrome-spinel inclusions in 323 diamond crystals from eight kimberlite pipes of two diamond-bearing regions of Yakutia were revealed by microprobe analysis. Processed data on their content of the Ni, Zn, V, Mn, and Si impurities are presented. It is shown that chrome-spinels in diamonds from the kimberlite pipes of the different regions are characterized by different contents of the impurity elements. The revealed differences in the composition of chrome spinel inclusions in the diamonds, as well as in the defect-impurity composition of the hosting diamonds, from the different, including neighboring, kimberlite pipes of Yakutia, are evidence of a local heterogeneity in the mantle composition within a certain kimberlite field. These data confirm the opinion of most researchers on heterogeneity of the mantle composition in different regions of the Yakutian diamondiferous province.

Key words: mantle, chrome-spinel, diamond, inclusion, impurity elements, microprobe analysis, IR spectroscopy.

Введение. Хромшпинелид является одним из наиболее важных минералов-индикаторов кимберлитов [1, 11]. Однако в поисковых целях он используется ограниченно в связи с невысокими содержаниями в коренных источниках и по причине его полигенности. В кимберлитовых концентратах хромшпинелиды характеризуются широкими вариациями состава (в мас.%): $Cr_2O_3 - 4-65$, $Al_2O_3 - 10-58$, $TiO_2 - 0,1-14$ [1, 10]. Опубликовано много работ, касающихся состава главных элементов хромшпинелидов, включённых в алмаз. Это, в первую очередь, высокая хромистость (Cr/Cr + A1 > 80%), пониженное содержание титана (TiO₂ $\leq 0,7$ мас.%), сравнительно узкий интервал железистости и незначительная роль окисного железа

Отечественная геология, № 6 / 2022

Fe³⁺ [19, 31]. Хромиты именно такого состава в повышенном количестве отмечаются в алмазоносных трубках [16, 17, 19, 27, 29, 31, 32]. На основе типоморфных особенностей, выявленных по содержанию главных элементов, хромшпинелидов в алмазах был разработан критерий алмазоносности кимберлитов, широко используемый для обнаружения алмазов в аллювиальных отложениях [1, 3, 4, 11, 15, 16, 22, 26]. В работе Н.В. Соболева [15] определена чёткая корреляция между содержащимися в кимберлитовых телах хромшпинелидами указанного состава с их алмазоносностью. Однако в россыпях одновременно с хромшпинелидами «алмазного типа», как правило, присутствуют аналогичные минералы из магматических пород другого генезиса. Например, высокохромистые хромшпинелиды с содержанием $Cr_2O_2 > 62$ мас.% установлены в ультрабазитах Полярного Урала (до 65,9 мас.%), Корякского нагорья (68,4 мас.%), Индии (66,3 мас.%), Новой Каледонии (68 мас.%) и др. [9]. В этом случае необходимо более детально изучать химический состав хромшпинелидов, генетически связанных с алмазом, и определить содержание элементов-примесей в их составе. Подобные исследования практически не проводились. В мировой литературе известно всего несколько публикаций, касающихся определения микропримесных элементов в хромитах из кимберлитов и лампроитов Австралии [28, 38]. Для хромшпинелидов из алмазов и кимберлитов Якутской алмазоносной провинции такие систематические исследования микропримесного состава не проводились.

В данной статье приводятся впервые полученные результаты по содержанию примесных элементов (Zn, V, Mn, Si, Ni) в хромшпинелидах, включённых в алмаз, из восьми кимберлитовых трубок двух территориально разобщённых алмазоносных районов Якутии – Далдыно-Алакитского и Мало-Ботуобинского, – а также из микроксенолитов нескольких кимберлитовых трубок этих же районов. Результаты таких исследований важны для выяснения генезиса глубинных пород.

Описание образцов. Из представительной коллекции алмазов восьми кимберлитовых трубок двух алмазоносных районов Якутии (Мало-Ботуобинский: трубки Интернациональная, Мир, XXIII съезда КПСС; Далдыно-Алакитский: трубки Удачная, Сытыканская, Комсомольская, Айхал, Юбилейная) (рис. 1) было отобрано 323 кристалла с видимыми включениями хромшпинелидов. Алмазы с включениями хромшпинелидов. Алмазы с включениями хромшпинелидов относятся к типичным кристаллам из кимберлитов Якутии и представлены в основном бесцветными и слабоокрашенными октаэдрами и резорбированными кристаллами переходной формы [13] (рис. 2).



Рис. 1. Схема расположения Мало-Ботуобинского (1) и Далдыно-Алакитского (2, 3) алмазоносных районов Якутской алмазоносной провинции:

1 – Мирнинское кимберлитовое поле (трубки Мир, Интернациональная и XXIII съезда КПСС); 2 – Алакит-Мархинское кимберлитовое поле (трубки Комсомольская, Юбилейная, Айхал, Сытыканская); 3 – Далдынское кимберлитовое поле (тр. Удачная); на врезке – расположение региона исследований, по [18], с дополнениями

В нескольких случаях включения хромшпинелидов встречены в алмазах жёлтого и коричневого цветов. Коричневая окраска природных алмазов вызвана процессами пластической деформации и не связана с составом минералообразующей среды [35].

Включения хромшпинелидов представляют собой зёрна со сложными контурами овальной и удлинённой формы, иногда довольно правильно образованные октаэдры смоляно-чёрного цвета с сильным металлическим блеском. Включения хромшпинелидов, как правило, встречаются группами, до 20 штук в одном кристалле-хозяине, иногда совместно с включениями оливина и граната (пиропа) (см. рис. 2).

Для сравнения были проанализированы микроксенолиты в виде отдельных зёрен хромшпинелидов с включениями пиропа, хромдиопсида и оливина из концентрата исследуемых кимберлитовых трубок.



Рис. 2. Кристаллы алмаза октаэдрического габитуса, содержащие включения хромшпинелидов в ассоциации с пиропом и оливином:

трубки: А – Интернациональная, Б – Айхал, В – Юбилейная, Г – Мир

Методы исследования. В процессе данной работы было проведено комплексное исследование алмазов, содержащих включения хромшпинелидов, методами аналитической электронной микроскопии, инфракрасной спектроскопии (ИК) и катодолюминесценции (КЛ).

Для исследования внутреннего строения алмазов, а также характера распределения примесей в них были подготовлены плоскопараллельные пластинки толщиной 90-170 мкм, вырезанные преимущественно по плоскости (110). С целью изучения распределения примесей азота и водорода на ИК-Фурье спектрометре (FTIR) VERTEX 70 (фирма Bruker), оснащённом микроскопом HYPERION 2000, были измерены спектры ИК-поглощения. Спектры с апертурой 50 мкм регистрировались для алмазов в диапазоне 7500-750 см⁻¹ при разрешении 2 см⁻¹. Отдельные зоны роста исследованных алмазов, а также зоны с преимущественным расположением включений выявлены с помощью метода КЛ с использованием сканирующего электронного микроскопа LEO-1430 VP с энергодисперсионным рентгеновским спектрометром. Особое внимание было уделено распределению примеси азота и определению степени агрегации азота в зоне локализации включений хромшпинелидов.

Для исследования минеральных включений кристаллы алмаза-матрицы были пришлифованы на специальном оборудовании с использованием шлифовального круга с порошковым алмаз-железным напылением до выведения включения в единую полировку с алмазом-матрицей. Обколотые кристаллы алмаза, в которых минеральные включения находились на сколе, подвергались дроблению в победитовой ступке с целью извлечения включений, которые затем монтировались в алюминиевые обоймы с использованием эпоксидной смолы для их фиксации, затем шлифовались и полировались до получения идеально гладкой поверхности. Химический состав минеральных включений определялся методом электронно-зондового микроанализа на прибоpax CAMECA Camebax-micro и JEOL JXA-8100. Пересчёт измеренных интенсивностей в содержании компонентов проведён методом ZAF-коррекции из программных обеспечений микроанализаторов. Особое внимание уделялось определению микропримесей, таких как ZnO, MnO, SiO, и V₂O₂. Для применяемой методики анализа предел примесей для одностороннего 1
 σ критерия (Р $\approx 84\%$) составил (в мас.%): MnO – 0,03, ZnO – 0,05, TiO₂ – 0,02, SiO₂ – 0,02, NiO – 0,025, V₂O₃ - 0,03, MgO - 0,03. Аналитические работы выполнялись в ЦКП многоэлементных и изотопных исследований СО РАН (Новосибирск, ИГМ CO PAH).

Месторождение (трубки)	№ образца	Зона	Α	В	\mathbf{N}_{tot}	%B
	ATC 12	Центр	452	272	724	38
	AIC-13	Край	363	149	512	29
		Центр	380	286	666	43
	ATC-15	Край	388	303	691	44
		Центр	0	0	0	0
Айуон	ATC-27	Край	0	0	0	0
Анлал	172.14	Центр	4	13	18	76
	AIC-16	Край	14	7	21	32
	ATC 17	Центр	380	86	465	18
	AIC-1/	Край	281	43	323	13
		Центр	59	9	68	13
	AIC-8	Край	50	9	58	15
Cumunouorog	CTC 1	Центр	23	8	30	25
Сытыканская	CIC-I	Край	26	6	32	18
	КТС 11	Центр	20	14	34	42
	KIC-II	Край	25	54	79	69
Комсомольская	KTC-12	Центр	17	9	25	34
Комсомольская	KIC-12	Край	7	9	15	57
	KTC-16	Центр	106	72	177	40
		Край	66	29	95	30
	MTC-14	Центр	106	14	120	12
		Край	119	14	133	11
	MTC-15	Центр	238	60	298	20
		Край	284	51	335	15
	MTC-17	Центр	624	152	775	20
		Край	868	215	1082	20
	MTC-18	Центр	54	3	57	5
		Край	51	0	51	0
	MTC-19	Центр	36	0	36	0
Мир		Край	30	0	30	0
1	MTC-20	Центр	76	51	127	40
		Край	149	143	292	49
	MTC-21	Центр	142	9	150	6
		Край	1056	329	1385	24
	MTS-24	Центр	281	37	318	12
		Краи	488	92	580	16
	MTS-31	Центр	/21	157	838	10
		Краи	842	154	990	10
	MTS-35	Центр	130	14	145	10
		Центр	228	14	276	10
	YUBC-2	Край	228	49	270	10
		Центр	297	100	2/2	22
Юбилейная	YUBC-23	Край	234	1/0	121	32
	YUBC-26	Центр	270	0	424 8	0
		Край	0	0	0	0
		тран	0	0	0	0

1. Дефектно-примесный состав алмазов, содержащих включения хромшпинелидов, из кимберлитовых трубок Якутии

Литология, петрология, минералогия, геохимия

Окончание табл. 1

Месторождение (трубки)	№ образца	Зона	Α	В	N _{tot}	%B
		Центр	102	6	108	5
	UDC-1	Край	96	6	101	6
		Центр	18	0	18	0
	UDC-3	Край	13	0	13	0
		Центр	10	0	10	0
	UDC-/	Край	8	0	8	0
	LIDE 79	Центр	160	200	360	56
	UDF-78	Край	69	9	78	11
		Центр	152	189	341	55
Удачная	005-15	Край	125	137	263	52
		Центр	12	0	12	0
	005-22	Край	12	0	12	0
		Центр	30	0	30	0
	005-55	Край	30	0	30	0
		Центр	63	34	97	35
	0D5-45	Край	23	0	23	0
		Центр	289	57	346	17
	0D5-44	Край	173	29	202	14
		Центр	109	0	109	0
	0D8-45	Край	111	0	111	0
	INC-104	Центр	531	80	611	13
		Край	-	-	-	-
	DIC 41	Центр	343	40	383	10
	INC-41	Край	190	17	207	8
	INC 12	Центр	7	169	175	96
	INC-15	Центр Край	10	3	13	22
	INC 28	Центр	23	0	23	0
	INC-28	Край	17	0	17	0
	INIC 70	Центр	35	2	36	5
	INC-70	Край	57	0	57	0
	Im 102	Центр	31	0	31	0
	1111-105	Край	30	0	30	0
	INIS 127	Центр	561	129	690	19
	11\0-157	Край	776	200	976	21
Интернациональная	INS 140	Центр	58	0	58	0
	1110-149	Край	61	0	61	0
	INS_154	Центр	129	14	143	10
	1110-134	Край	132	13	145	9
	INS-156	Центр	56	3	59	5
	1113-130	Край	53	14	67	21
	INS-161	Центр	53	0	53	0
	1110-101	Край	83	0	83	0
	INS-169	Центр	5	43	48	90
	1110-107	Край	8	7	15	46
	INS-172	Центр	271	57	328	17
	1110-172	Край	281	63	343	18
	INS-174	Центр	553	97	650	15
		Край Пентр	17	0	17	0
	INS-68	Край	330	29	359	8

Дефектно-примесный состав алмазов. Спектры ИК-поглощения были сняты в 50 кристаллах алмаза, содержащих включения хромшпинелидов, из пяти кимберлитовых трубок Якутии (трубки Мир, Интернациональная, Удачная, Комсомольская и Юбилейная). Получены количественные данные по общему содержанию азота в алмазах, количеству А и В1-дефектов, степени агрегации (процентное содержание В1-дефекта к общему содержанию азота). В изученных алмазах азот в основном находится в А и ВІформе. Соотношение между этими центрами может быть различно, однако резко преобладают кристаллы типа IaA (см. рис. 2). Приведённые в таблице 1 данные по содержанию в структуре алмаза примеси азота показывают широкие вариации состава в пределах одной кимберлитовой трубки.

Сравнение полученных результатов по алмазам с включениями из кимберлитов разных алмазоносных районов Якутии, а также на основе литературных данных выявило некоторые существенные различия [24]. Кристаллы из трубок Интернациональная (Мало-Ботуобинский алмазоносный район) и Юбилейная (Далдыно-Алакитский алмазоносный район) отличаются по распределению азота и степени его агрегации. Большинство алмазов из трубки Интернациональная относится к ІаА. Во всех исследованных в данной работе алмазах из трубки Юбилейная отмечено повышенное содержание азота только лишь в центральной зоне кристаллов, в то время как для алмазов из трубки Интернациональная зафиксировано равномерное распределение азота по всему кристаллу, варьирующее от 600 до 900 ррт. Для кристаллов алмаза из трубки Комсомольская, содержащих включения хромшпинелидов, характерно невысокое содержание азота, в среднем не превышающее 100 ррт. А алмазы из трубки Мир характеризуются гораздо большим диапазоном вариаций дефектно-примесного состава: общее содержание азота изменяется в пределах от 60 до 800 ррт, степень агрегации – от 5 до 40% (рис. 3). Это свидетельствует



Рис. 3. Типичные спектры поглощения алмазов, содержащих включения хромшпинелидов, из кимберлитовых трубок Якутии: А – обр. Мтс-24 (тр. Мир); Б – обр. Инс-68 (тр. Интернациональная); В – обр. Атс-17 (тр. Айхал); Г – обр. Удс-44 (тр. Удачная)



Рис. 4. Особенности распределения Cr₂O₃-Al₂O₃ (A) и Cr₂O₃-TiO₂ (Б) в изученных хромшпинелидах из кимберлитовых трубок Якутии:

1 – включения в алмазе; 2 – микроксенолиты: хромит + оливин; 3 – микроксенолиты: хромит + пироп и хромит + Cr-диопсид; линиями ограничено поле хромшпинелидов, ассоциирующих с алмазом [16]

о различиях в условиях их образования. Именно степень агрегации азота из А-формы в В1 в кристаллах алмаза свидетельствует о скорости процессов и условиях образования алмазов. Высокая степень агрегации азота свидетельствует о длительном периоде нахождения кристалла алмаза при высокой температуре [39].

Во всех изученных алмазах присутствуют линии 1405 и 3107 см⁻¹, связанные со структурными примесями водорода. Как правило, данные линии поглощения относятся к колебаниям С–Н, что доказывает вхождение водорода в структуру исследуемых алмазов.

Исследование алмазов, содержащих включения хромшпинелидов, методом катодолюминесценции показало, что практически все включения приурочены к одной ростовой зоне алмаза-матрицы. По литературным данным, такие включения имеют близкий химический состав в разных ростовых зонах в пределах алмаза-матрицы, отличие отмечается по содержанию Cr и Al. В содержании примесных элементов (V, Mn, Si, Zn, Ni) в пределах алмаза-матрицы вариаций не выявлено [12, 19].

Химический состав включений хромшпинелидов в алмазах. Минеральные включения в алмазах являются одним из наиболее достоверных источников

информации об условиях их образования, поскольку захватываются в процессе роста алмаза-матрицы из минералообразующей среды. Результаты исследований многочисленных включений в природных алмазах позволили выделить для них два основных типа парагенезиса: ультраосновной (У-тип) и эклогитовый (Э-тип) [15, 29]. Каждый тип характеризуется присутствием определённых минералов. Хромшпинелиды наряду с оливином пиропом и Cr-диопсидом относятся к У-типу, который резко преобладает в большинстве трубок Якутии [5]. В данной работе детально изучен химический состав включений хромшпинелидов из алмазов разных кимберлитовых трубок Якутии, включающий определение как главных (Cr₂O₂, Al₂O₂, MgO, FeO), так и микропримесных (ZnO, SiO₂, V₂O₃, MnO, NiO) элементов с целью выявления их особенностей.

На диаграммы Cr₂O₃ к Al₂O₃ и Cr₂O₃ к TiO₂ (рис. 4), отражающие особенности химического состава хромшпинелидов-включений в алмазах, помимо составов включений были также нанесены составы хромшпинелидов из микроксенолитов ультраосновных пород и концентратов из кимберлитовых трубок Якутии [17, 19]. Как уже было отмечено, включения хромшпинелидов характеризуются определёнными типоморфными особенностями по химическому составу,

Месторождение (трубки)	MnO	ZnO	SiO ₂	NiO	V_2O_3			
Далдыно-Алакитский алмазоносный район								
Комсомольская	$\frac{0,17}{0,01}$	$\frac{0,07}{0,01}$	$\frac{0,10}{0,02}$	$\frac{0,10}{0,01}$	$\frac{0,24}{0,03}$			
Сытыканская	$\frac{0,21}{0,01}$	$\frac{0,07}{0,01}$	$\frac{0,12}{0,01}$	$\frac{0,10}{0,00}$	$\frac{0,33}{0,01}$			
Удачная	$\frac{0,20}{0,01}$	$\frac{0,07}{0,01}$	$\frac{0,11}{0,01}$	$\frac{0,08}{0,01}$	$\frac{0,28}{0,02}$			
Айхал	$\frac{0,21}{0,01}$	$\frac{0,06}{0,01}$	$\frac{0,13}{0,02}$	$\frac{0,11}{0,01}$	$\frac{0,27}{0,03}$			
Юбилейная	$\frac{0,19}{0,05}$	$\frac{0,07}{0,02}$	$\frac{0,11}{0,03}$	$\frac{0,08}{0,01}$	$\frac{0,27}{0,08}$			
	Мало-Боту	обинский алм	азоносный ра	ЙОН				
Мир	$\frac{0,22}{0,01}$	$\frac{0,08}{0,01}$	$\frac{0,08}{0,01}$	$\frac{0,09}{0,00}$	$\frac{0,33}{0,02}$			
Интернациональная	$\frac{0,17}{0,02}$	$\frac{0,07}{0,01}$	$\frac{0,08}{0,01}$	$\frac{0,07}{0,01}$	$\frac{0,34}{0,02}$			
XXIII съезда КПСС	$\frac{0,24}{0,02}$	$\frac{0,08}{0,02}$	$\frac{0,27}{0,03}$	$\frac{0,09}{0,01}$	$\frac{0,35}{0,07}$			

2. Статистические данные по содержанию микропримесных элементов (мас.%) в составе включений хромшпинелидов в алмазе из кимберлитовых трубок Якутии

Примечание. Над чертой указано среднее содержание элемента, под чертой – доверительный интервал (х = 0,99).

основные из которых выражаются в повышенном содержании Cr_2O_3 (> 62 мас.%) и пониженном содержании TiO_2 , не превышающем 0,7 мас.% [16, 19, 32, 34].

Полученные нами результаты, приведённые на диаграмме (см. рис. 4), полностью соответствуют этим данным. Однако сопоставление содержания микропримесных элементов в изученных хромшпинелидах-включениях в алмазах из разных кимберлитовых трубок позволило выявить особенности состава минералообразующей среды в каждом конкретном случае. В пределах одной кимберлитовой трубки состав включений хромшпинелидов из алмазов может существенно варьировать (табл. 1). Например, в трубках Сытыканская и Комсомольская несколько включений характеризовались повышенным содержанием FeO (до 18 мас.%), а содержание V₂O₃ достигало 0,35 мас.%. Однако с помощью статистического анализа, проведённого с помощью ПО Microsoft Excel [20], были выявлены значимые различия в содержании микропримесных элементов в их составе в пределах каждого конкретного месторождения (табл. 2).

Результаты определения состава включений хромшпинелидов из серии алмазов представлены в таблице 2 и на рис. 5.

Предварительные результаты определения химического состава включений хромшпинелидов в алмазах из шести кимберлитовых трубок Якутии выявили некоторые их особенности по содержанию примесных элементов. Как показано на приведённых ниже гистограммах (см. рис. 5), хромшпинелиды из алмазов трубки Комсомольская характеризуются пониженным содержанием Si, V, Mn. В то время как в аналогичных включениях в алмазах из трубки Айхал наряду с пониженным содержанием ванадия отмечается повышенное содержание Ті (аналогично алмазам из трубок Мир и XXIII съезда КПСС). Необходимо отметить, что хромшпинелиды в алмазах практически из всех кимберлитовых трубок Мало-Ботуобинского района характеризуются существенно пониженным содержанием кремнезёма (трубки Мир, Интернациональная и XXIII съезда КПСС). Также выявлены некоторые вариации содержания магния в хромшпинелидах из алмазов изученных трубок. Например, существенное повышение состава отмечено в тр. Сытыканская, пониженная магнезиальность характерна для хромшпинелидов из тр. XXIII съезда КПСС.

Обсуждение и выводы. Хромшпинелиды являются постоянными минералами широкой серии ультраосновных пород, представленных дунитами,



Рис. 5. Гистограммы содержания MnO, V2O3, SiO2 (мас.%) в хромшпинелидах из алмазов кимберлитовых трубок Якутии:

Далдыно-Алакитский алмазоносный район: тр. Комсомольская (*n* = 36), тр. Удачная (*n* = 67); Мало-Ботуобинский алмазоносный район: тр. Мир (*n* = 76), тр. Интернациональная (*n* = 37)

гарцбургитами, лерцолитами в различных геологических обстановках и относящихся к различным фациям глубинности [17, 21, 23]. Особое разнообразие состава хромшпинелидов характерно для кимберлитов, где они представлены макро- и микрокристами в основной массе [34]. В ореолах рассеяния алмазов кроме кимберлитов источниками хромшпинелидов могут быть пикриты, альпинотипные ультрабазиты, щелочные базальтоиды, меймечиты, лампрофиры и другие породы [22].

Хромшпинелиды имеют важное значение для прогнозирования алмазоносных кимберлитов, так как некоторые из них кристаллизуются в поле термодинамической стабильности алмаза, что используется в качестве критерия алмазоносности кимберлитов [2, 3, 4, 11, 15, 16, 22, 26]. В кимберлитовых концентратах хромшпинелиды характеризуются широкими вариациями состава (в мас.%): Cr₂O₂ - 4-65, Al₂O₃ - 10-58, TiO₂ - 0,1-14 [1, 10]. Однако составы включений хромшпинелидов из алмазной матрицы фиксируются только в узкой области, по содержанию Cr₂O₃ > 62 мас.% и Al₂O₃ < 7,5 мас.%. Также они характеризуются низким содержанием титана (< 0,7 мас.%) и Fe₂O₃. Хромиты именно такого состава в повышенном количестве отмечаются в алмазоносных трубках [16, 17, 28, 29, 31, 32, 36]. Однако высокохромистые хромшпинелиды такого состава установлены и в других типах пород. Таким образом, необходимы дополнительные критерии определения хромшпинелидов, непосредственно связанных с алмазом.

В представленной работе основной акцент был сделан на включения хромшпинелидов в алмазе, поскольку они являются важными индикаторными минералами на алмаз в ореолах его рассеяния. Алмазы из разных кимберлитовых трубок имеют свои специфические черты. Это свидетельствует о том, что условия образования и состав минералообразующей среды несколько отличались. Так, например, для трубки Комсомольская (Алакит-Мархинское кимберлитовое поле) характерно повышенное содержание алмазов октаэдрического габитуса (около 95%), для которых выявлены специфические черты в дефектно-примесном составе, а именно: высокие концентрации азота в А-форме и плэйтелетс при невысоком содержании $N_{tot} = 242 \pm 103$ ppm [7, 25]. А в тр. Айхал, расположенной всего в 15 км от тр. Комсомольская, картина совершенно иная. Для этой трубки характерны резорбированные алмазы переходного (от октаэдрического к ромбододекаэдрическому) габитуса, дефектный состав которых отличается низким содержанием плэйтелетс при N_{tot} = 133 ± ± 44 ppm и значительным количеством водородных центров [24, 25].



Рис. 6. Зависимость содержания V₂O₃ и SiO₂ в хромшпинелидах-включениях в алмазах из Мало-Ботуобинского (1) и Далдыно-Алакитского (2) алмазоносных районов Якутии от содержания примеси азота в алмазах. По данным Г. К. Хачатрян [24]

В трубках Интернациональная, XXIII съезда КПСС и Мир, относящихся к Мало-Ботуобинскому району, отмечено повышенное содержание рудных минералов в виде включений в алмазах [8]. По данным Г.К. Хачатрян, алмазы данных трубок отличаются повышенным содержанием азота $N_{tot} = 743 \pm 114$ ppm, $N_{tot} = 752 \pm 118$ ppm, $N_{tot} = 413 \pm 75$ ppm соответственно [24].

Анализ данных исследования, приведённого в работе, позволил выявить корреляционные закономерности между концентрациями элементов-примесей во включениях хромшпинелидов из алмазов кимберлитовых трубок Мало-Ботуобинского и Далдыно-Алакитского районов Якутии и содержанием структурных дефектов в алмазах из тех же самых трубок [24]. Как видно из рисунка 6, содержание ванадия в хромшпинелидах включений возрастает с ростом его общего содержания (N_{tot}). Примесь кремния в хромшпинелидах включений обнаруживает противоположную тенденция по отношению к распределению азота в алмазах (рис. 6).

Основными факторами, отвечающими за состав хромшпинелидов, являются состав родоначального расплава и термодинамические параметры его кристаллизации. Анализ химического состава хромшпинелидов из алмазов кимберлитов Якутии показал, что все они относятся, в первую очередь, к магнезиохромитам с переменным количеством изоморфных микропримесей цинка, ванадия, титана, марганца. Такой состав примесей в хромшпинелидах, включённых в алмазах из разных кимберлитовых трубок, расположенных в двух территориально разделённых алмазоносных районах, указывает на особенности минералообразующего расплава, из которого эти хромшпинелиды кристаллизовались, и в более широком варианте отражает состав мантийного вещества под каждым конкретным кимберлитовым телом.

Особую роль играют парагенетические ассоциации минеральных включений – преимущественно клинопироксена, оливина и пиропа, – находящихся в одном алмазе-матрице [36, 37]. В данной работе одновременно с магнезиохромитом были зафиксированы оливин и пироп в одном алмазе из кимберлитовых трубок Юбилейная и Мир, по которым можно оценить *P-T* параметры. Однако эпизодичность таких находок на данном этапе работы не позволяет сделать какие-либо выводы и требует накопления в дальнейшем дополнительного материала.

Полученные нами предварительные результаты показали, что хромшпинелиды в алмазах из кимберлитовых трубок разных регионов характеризуются различным содержанием элементов-примесей в своём составе. Так, например, в алмазах из трубки Комсомольская присутствуют включения хромшпинелидов с более низким содержанием ванадия и марганца, а для хромшпинелидов из алмазов трубок Мало-Ботуобинского района (трубки Мир, Интернациональная и XXIII съезда КПСС) характерны очень низкая примесь кремнезёма и повышенное содержание ванадия. Выявленные в данной работе различия в составе хромшпинелидов-включений в алмазах свидетельствует о наличии локальной неоднородности мантийного вещества в пределах одного кимберлитового поля. Эти данные подтверждают мнение большинства исследователей о гетерогенности состава мантийного вещества в разных районах Якутской алмазоносной провинции.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 20–05–00293) и по государственному заданию ИГМ СО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Афанасьев В. П., Зинчук Н. Н., Похиленко Н. П. Морфология и морфогенез индикаторных минералов кимберлитов. – Новосибирск : Издательский дом Манускрипт, 2001. – 276 с.
- Афанасьев В. П., Похиленко Н. П., Логвинова А. М., Зинчук Н. Н., Ефимова Э. С., Сафьянников В. И., Красавчиков В. О., Подгорных Н. М., Пругов В. П. Особенности морфологии и состава некоторых хромшпинелидов алмазоносных площадей в связи с проблемой «ложных» индикаторов кимберлитов // Геология и геофизика. – 2000. – Т. 41 (12). – С. 1729–1741.
- 3. Богатиков О. А., Гаранин В. К., Кононова В. А., Кудрявцева Г. П., Васильева Е. Р., Вержак В. В.,

Веричев Е. М., Парсаданян К. С., Посухова Т. В. [и др.] Архангельская алмазоносная провинция (геология, петрография, геохимия и минералогия). – М. : Изд-во МГУ, 1999. – 524 с.

- Боткунов А. И., Гаранин В. К., Крот А. Н., Кудрявцева Г. П. Роль включений в минералах спутниках алмаза в познании генезиса глубинных пород // Проблема кимберлитового магматизма. – Новосибирск, 1989. – С. 111–119.
- Ефимова Э. С., Соболев Н. В. Распространенность кристаллических включений в алмазах Якутии // Доклады Академии наук СССР. – 1977. – Т. 227 (6). – С. 1475–1478.
- Ефимова Э. С., Соболев Н. В., Поспелова Л. Н. Включения сульфидов в алмазах и особенности их парагенезиса // Записки ВМО. – 1983. – Т. 112. – С. 300–310.

- Зинчук Н. Н., Коптиль В. И. Особенности алмазов из кимберлитовых тел Сибирской платформы // Геология алмазов – настоящее и будущее. – Воронеж : ВГУ, 2005. – С. 1000–1020.
- Зинчук Н. Н., Коптиль В. И. Типоморфизм алмазов Сибирской платформы. – М. : Недра-Бизнесцентр, 2003. – 603 с.
- 9. *Илупин И. П.* Высокохромистые хромиты из кимберлитов и ультрабазитов сходства и различия // Руды и металлы. 2002. № 4. С. 54–58.
- 10. *Илупин И. П., Каминский Ф. В., Францессон Е. В.* Геохимия кимберлитов. – М. : Недра, 1978. – 352 с.
- 11. Лазько Е. Е. Минералы-спутники алмаза и генезис кимберлитовых пород. М. : Недра, 1979. 192 с.
- Логвинова А. М., Серебрянников А. О., Соболев Н. В. Вариации химического состава и редкие парагенезисы множественных включений магнезиохромита в алмазах Якутии // Доклады РАН. 2021. Т. 501 (1). С. 26–33.
- Орлов Ю. Л. Минералогия алмаза. М. : Наука, 1973. 264 с.
- Ровша В. С., Илупин И. П. Хромшпинели в кимберлитах Якутии // Геология и геофизика. – 1970. – № 2. – С. 47–56.
- Соболев Н. В. Глубинные включения в кимберлитах и проблема состава верхней мантии. – Новосибирск : Наука, 1974. – 263 с.
- Соболев Н. В. О минералогических критериях алмазоносности // Геология и геофизика. – 1971. – № 3. – С. 70–80.
- Соболев Н. В., Логвинова А. М. Включения пиропа в хромшпинелидах из кимберлитов и лампроитов и их значение для оценки парагенезиса и глубинности формирования // Доклады Академии наук. – 2004. – Т. 398 (6). – С. 786–791.
- Соболев Н. В., Логвинова А. М., Николенко Е. И., Лобанов С. С. Минералогические критерии алмазоносности верхнетриасовых россыпей северо-восточной окраины Сибирской платформы // Геология и геофизика. – 2013. – Т. 54, № 8. – С. 1162–1178.
- Соболев Н. В., Похиленко Н. П., Лаврентьев Ю. Г., Усова Л. В. Особенности состава хромшпинелидов из алмазов и кимберлитов Якутии // Геология и геофизика. – 1975. – Т. 16 (11). – С. 7–24.
- Фадеева Л. Н. Теория вероятностей и математическая статистика: учебное пособие / Л. Н. Фадеева, А. В. Лебедев; под ред. Л. Н. Фадеевой. – М. : Рид Групп, 2011. – 496 с.
- 21. *Францессон Е. В.* Петрология кимберлитов // М. : Недра, 1968. – 199 с.
- Харькив А. Д., Зинчук Н. Н., Крючков А. И. Геологогенетические основы шлихоминералогического метода поисков алмазных месторождений. – М. : Недра, 1995. – 348 с.
- Харькив А. Д., Зинчук Н. Н., Крючков А. И. Коренные месторождения алмазов мира. – М. : Недра, 1998. – 556 с.
- Хачатрян Г. К. Азот и водород в кристаллах алмаза в аспекте геолого-генетических и прогнозно-поисковых проблем алмазных месторождений // Отечественная геология. – 2013. – № 2. – С. 29–42.

- 25. Хачатрян Г. К. Азотные и водородные центры в алмазе, их генетическая информативность и значение для решения прогнозно-поисковых задач // Руды и металлы. – 2009. – № 4. – С. 73–80.
- 26. Хмельков А. М. Некоторые особенности химизма минералов-спутников алмаза и использование их при сравнении и идентификации отдельных объектов // Проблемы алмазной геологии и некоторые пути их решения. – Воронеж: ВГУ, 2001. – С. 434–437.
- Boyd S. R., Mattey D. P., Pillinger C. T., Milledge H. J., Mendelssohn M., Seal M. Multiple growth events during diamond genesis: an integrated study of carbon and nitrogen isotopes and nitrogen aggregation state in coated stones // Earth and Planetary Science Letters. – 1987. – V. 86. – P. 341–353.
- Griffin W. L., Ryan C. G., Gurney J. J., Sobolev N. V. Chromite macrocrysts in kimberlites and lamproites: geochemistry and origin // Extended Abstracts of Fifth International Kimberlite Conference, Brazil. – 1994. – V. 2. – P. 366–377.
- Gurney J. J., Harris J. W., Rickard R. S. Silicate and oxide inclusions in diamonds from the Finsch kimberlite pipe // Extended Abstracts of Fifth International Kimberlite Conference, Brazil. – 1977. – V. 2. – P. 123–125.
- Harris J. W. Diamond geology // The properties of natural and synthetic diamond. London : Academic Press, 1992, P. 345–393.
- Meyer H. O. A. Inclusions in diamonds // Mantle xenoliths / Nixon P. H. (ed). – Chichester : J. Willey and Sons, 1987. – P. 501–522.
- Meyer H. O. A., Boyd F. R. Composition and origin of crystalline inclusions in natural diamonds // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 1972. – V. 36 (11). – P. 1255– 1273.
- Meyer H. O. A., McCallum M. E. Mineral inclusions in diamonds from the Sloan kimberlites, Colorado // Journal of Geology. – 1986. – V. 94. – P. 600–612.
- Mitchell R. H. Kimberlites: Mineralogy, geochemistry and petrology. – N.Y., London : Plenum Press, 1986. – 442 p.
- Smith E. M., Helmstaedt H. H., Flemming R. L. Survival of the brown color in diamonds during storage in the subcontinental lithospheric mantle // The Canadian Mineralogist. – 2010. – V. 48 – P. 571–582.
- Sobolev N. V., Kaminsky F. V., Griffin W. L., Yefimova E. S., Win T. T., Ryan C. G., Botkunov A. I. Mineral inclusions in diamonds from the Sputnik kimberlite pipe, Yakutia // Lithosphere. – 1997. – V. 39. – P. 135–157.
- Sobolev N. V., Lavrent'ev Yu. G., Pokhilenko N. P., Usova L. V. Chrome-rich garnets of Yakutia and their parageneses // Contributions to Mineralogy and Petrology. 1973. V. 40 (1). P. 39–52.
- Stachel T., Harris J. W. The origin of cratonic diamonds contraints from mineral inclusions // Ore Geology Reviews. – 2008. – V. 34. – P. 5–32.
- Taylor W. R., Jaques A. L., Ridd M. Nitrogen-defect aggregation characteristics of some Australasian diamonds: Time-temperature constraints on the source regions of pipe and alluvial diamonds // American Mineralogist. – 1990. – V. 75. – P. 1290–1310.

REFERENCES

- Afanas'yev V. P., Zinchuk N. N., Pokhilenko N. P. Morfologiya i morfogenez indikatornykh mineralov kimberlitov [Morphology and morphogenesis of kimberlite indicator minerals]. Novosibirsk, Manuskript publ., 2001, 276 p. (In Russ.)
- Afanas'yev V. P., Pokhilenko N. P., Logvinova A. M., Zinchuk N. N., Yefimova E. S., Saf'yannikov V. I., Krasavchikov V. O., Podgornykh N. M., Prugov V. P. Osobennosti morfologii i sostava nekotorykh khromshpinelidov almazonosnykh ploshchadey v svyazi s problemoy "lozhnykh" indikatorov kimberlitov [Features of the morphology and composition of some chrome-spinels of diamond-bearing areas in connection with the problem of "false" indicators of kimberlites]. Geologiya i geofizika, 2000, V. 41 (12), pp. 1729–1741. (In Russ.)
- Bogatikov O. A., Garanin V. K., Kononova V. A., Kudryavtseva G. P., Vasil'yeva Ye. R., Verzhak V. V., Verichev Ye. M., Parsadanyan K. S., Posukhova T. V. [et al.] Arkhangel'skaya almazonosnaya provintsiya (geologiya, petrografiya, geokhimiya i mineralogiya) [Arkhangelsk diamondiferous province (geology, petrography, geochemistry and mineralogy)], Moscow, MGU publ., 1999, 524 p. (In Russ.)
- Botkunov A. I., Garanin V. K., Krot A. N., Kudryavtseva G. P. Rol' vklyucheniy v mineralakh sputnikakh almaza v poznanii genezisa glubinnykh porod [The role of inclusions in minerals satellites of diamond in the knowledge of the genesis of deep rocks]. Problema kimberlitovogo magmatizma, Novosibirsk, 1989, pp. 111– 119. (In Russ.)
- Yefimova E. S., Sobolev N. V. Rasprostranennost' kristallicheskikh vklyucheniy v almazakh Yakutii [The prevalence of crystalline inclusions in diamonds of Yakutia]. Doklady Akademii nauk SSSR, 1977, V. 227 (6), pp. 1475– 1478. (In Russ.)
- Yefimova E. S., Sobolev N. V., Pospelova L. N. Vklyucheniya sul'fidov v almazakh i osobennosti ikh paragenezisa [Sulfide inclusions in diamonds and features of their paragenesis]. Zapiski VMO, 1983, V. 112, pp. 300– 310. (In Russ.)
- Zinchuk N. N., Koptil' V. I. Osobennosti almazov iz kimberlitovykh tel Sibirskoy platformy [Peculiarities of diamonds from kimberlite bodies of the Siberian Platform]. Geologiya almazov – nastoyashcheye i budushcheye, Voronezh, VGU publ., 2005, pp. 1000–1020. (In Russ.)
- Zinchuk N. N., Koptil' V. I. Tipomorfizm almazov Sibirskoy platformy [Typomorphism of diamonds of the Siberian platform]. Moscow, Nedra-Biznestsentr publ., 2003, 603 p. (In Russ.)
- Ilupin I. P. Vysokokhromistyye khromity iz kimberlitov i ul'trabazitov – skhodstva i razlichiya [High-chromium chromites from kimberlites and ultramafic rocks – similarities and differences]. Rudy i metally [Ores and metals], 2002, No. 4, pp. 54–58. (In Russ.)
- Ilupin I. P., Kaminskiy F. V., Frantsesson Ye. V. Geokhimiya kimberlitov [Geochemistry of kimberlites], Moscow, Nedra publ.,1978, 352 p. (In Russ.)

- Laz'ko Ye. Ye. Mineraly-sputniki almaza i genezis kimberlitovykh porod [Minerals-satellites of diamond and the genesis of kimberlite rocks]. Moscow, Nedra publ., 1979, 192 p. (In Russ.)
- Logvinova A. M., Serebryannikov A. O., Sobolev N. V. Variatsii khimicheskogo sostava i redkiye paragenezisy mnozhestvennykh vklyucheniy magneziokhromita v almazakh Yakutii [Variations in chemical composition and rare parageneses of multiple inclusions of magnesiochromite in diamonds of Yakutia]. Doklady RAN, 2021, V. 501 (1), pp. 26–33. (In Russ.)
- 13. Orlov Yu. L. Mineralogiya almaza [Mineralogy of diamond], Moscow, Nauka publ., 1973, 264 p. (In Russ.)
- Rovsha V. S., Ilupin I. P. Khromshpineli v kimberlitakh Yakutii [Chrome spinels in kimberlites of Yakutia]. Geologiya i geofizika, 1970, No. 2, pp. 47–56. (In Russ.)
- Sobolev N. V. Glubinnyye vklyucheniya v kimberlitakh i problema sostava verkhney mantii [Deep inclusions in kimberlites and the problem of the composition of the uPer mantle]. Novosibirsk, Nauka publ., 1974, 263 p. (In Russ.)
- Sobolev N. V. O mineralogicheskikh kriteriyakh almazonosnosti [On the mineralogical criteria of diamond content]. Geologiya i geofizika, 1971, No. 3, pp. 70–80. (In Russ.)
- Sobolev N. V., Logvinova A. M. Vklyucheniya piropa v khromshpinelidakh iz kimberlitov i lamproitov i ikh znacheniye dlya otsenki paragenezisa i glubinnosti formirovaniya [Pyrope inclusions in chrome spinels from kimberlites and lamproites and their significance for assessing the paragenesis and depth of formation]. Doklady Akademii nauk, 2004, V. 398 (6), pp. 786–791. (In Russ.)
- Sobolev N. V., Logvinova A. M., Nikolenko Ye. I., Lobanov S. S. Mineralogicheskiye kriterii almazonosnosti verkhnetriasovykh rossypey severo-vostochnoy okrainy Sibirskoy platformy [Mineralogical criteria for the diamond content of UPer Triassic placers in the northeastern margin of the Siberian Platform]. Geologiya i geofizika, 2013, V. 54, No. 8, pp. 1162–1178. (In Russ.)
- Sobolev N. V., Pokhilenko N. P., Lavrent'yev Yu. G., Usova L. V. Osobennosti sostava khromshpinelidov iz almazov i kimberlitov Yakutii [Features of the composition of chrome-spinels from diamonds and kimberlites of Yakutia]. Geologiya i geofizika, 1975, V. 16 (11), pp. 7– 24. (In Russ.)
- 20. *Fadeyeva L. N.* Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika: uchebnoye posobiye [Probability theory and mathematical statistics: textbook]. Moscow, Rid GruP publ., 2011, 496 p. (In Russ.)
- 21. *Frantsesson Ye. V.* Petrologiya kimberlitov [Petrology of kimberlites]. Moscow, Nedra publ., 1968, 199 p. (In Russ.)
- 22. *Khar'kiv A. D., Zinchuk N. N., Kryuchkov A. I.* Geologogeneticheskiye osnovy shlikhomineralogicheskogo metoda poiskov almaznykh mestorozhdeniy [Geological and genetic foundations of the schlichomineralogical method of prospecting for diamond deposits]. Moscow, Nedra publ., 1995, 348 p. (In Russ.)
- 23. Khar'kiv A. D., Zinchuk N. N., Kryuchkov A. I. Korennyye mestorozhdeniya almazov mira [Primary diamond

deposits of the world]. Moscow, Nedra publ., 1998, 556 p. (In Russ.)

- Khachatryan G. K. Azot i vodorod v kristallakh almaza v aspekte geologo-geneticheskikh i prognozno-poisko-vykh problem almaznykh mestorozhdeniy [Nitrogen and hydrogen in diamond crystals in the aspect of geological, genetic and forecasting problems of diamond deposits]. Otechestvennaya geologiya [Domestic Geology], 2013, No. 2, pp. 29–42. (In Russ.)
- 25. Khachatryan G. K. Azotnyye i vodorodnyye tsentry v almaze, ikh geneticheskaya informativnost' i znacheniye dlya resheniya prognozno-poiskovykh zadach [Nitrogen and hydrogen centers in diamond, their genetic information content and significance for solving predictive and search problems]. Rudy i metally [Ores and metals], 2009, No. 4, pp. 73–80. (In Russ.)
- 26. Khmel'kov A. M. Nekotoryye osobennosti khimizma mineralov-sputnikov almaza i ispol'zovaniye ikh pri sravnenii i identifikatsii otdel'nykh obwyektov [Some features of the chemistry of diamond satellite minerals and their use in comparing and identifying individual objects]. Problemy almaznoy geologii i nekotoryye puti ikh resheniya, Voronezh, VGU publ., 2001, pp. 434–437. (In Russ.)
- Boyd S. R., Mattey D. P., Pillinger C. T., Milledge H. J., Mendelssohn M., Seal M. Multiple growth events during diamond genesis: an integrated study of carbon and nitrogen isotopes and nitrogen aggregation state in coated stones, Earth and Planetary Science Letters, 1987, V. 86, pp. 341–353.
- Griffin W. L., Ryan C. G., Gurney J. J., Sobolev N. V. Chromite macrocrysts in kimberlites and lamproites: geochemistry and origin, Extended Abstracts of Fifth International Kimberlite Conference, Brazil, 1994, V. 2, pp. 366–377.
- 29. *Gurney J. J., Harris J. W., Rickard R. S.* Silicate and oxide inclusions in diamonds from the Finsch kimberlite

pipe, Extended Abstracts of Fifth International Kimberlite Conference, Brazil, 1977, V. 2, pp. 123–125.

- Harris J. W. Diamond geology, The properties of natural and synthetic diamond, London, Academic Press, 1992, pp. 345–393.
- Meyer H. O. A. Inclusions in diamonds, Mantle xenoliths, Nixon P. H. (ed), Chichester, J. Willey and Sons, 1987, pp. 501–522.
- 32. *Meyer H. O. A., Boyd F. R.* Composition and origin of crystalline inclusions in natural diamonds, Geochimica et Cosmochimica Acta, 1972, V. 36 (11), pp. 1255–1273.
- Meyer H. O. A., McCallum M. E. Mineral inclusions in diamonds from the Sloan kimberlites, Colorado, Journal of Geology, 1986, V. 94, pp. 600–612.
- 34. *Mitchell R. H.* Kimberlites: Mineralogy, geochemistry and petrology, N.Y., London, Plenum Press, 1986, 442 p.
- Smith E. M., Helmstaedt H. H, Flemming R. L. Survival of the brown color in diamonds during storage in the subcontinental lithospheric mantle, The Canadian Mineralogist, 2010, V. 48 – pp. 571–582.
- Sobolev N. V., Kaminsky F. V., Griffin W. L., Yefimova E. S., Win T. T., Ryan C. G., Botkunov A. I. Mineral inclusions in diamonds from the Sputnik kimberlite pipe, Yakutia, Lithosphere, 1997, V. 39, pp. 135–157.
- Sobolev N. V., Lavrent'ev Yu. G. Pokhilenko N. P. Usova L. V. Chrome-rich garnets of Yakutia and their parageneses, Contributions to Mineralogy and Petrology, 1973, V. 40 (1), pp. 39–52.
- Stachel T., Harris J. W. The origin of cratonic diamonds contraints from mineral inclusions, Ore Geology Reviews, 2008, V. 34, pp. 5–32.
- Taylor W. R., Jaques A. L., Ridd M. Nitrogen-defect aggregation characteristics of some Australasian diamonds: Time-temperature constraints on the source regions of pipe and alluvial diamonds, American Mineralogist, 1990, V. 75, pp. 1290–1310.

Статья поступила в редакцию 15.08.22; одобрена после рецензирования 18.10.22; принята к публикации 08.11.22. The article was submitted 15.08.22; approved after reviewing 18.10.22; accepted for publication 08.11.22.

DOI:10.47765/0869-7175-2022-10035

УДК УДК 550.8; 551.242.5 © Ф. В. Мясников, 2022

Алмазоносная литосфера Сибирской платформы (по геофизическим данным). Тектоническое районирование

В первой части статьи на основе использования потенциальных полей, применения структурного метода, фрактального анализа и многомерных статистических методов показаны естественные структурные соотношения потенциальных полей, выполнено тектоническое районирование Сибирской платформы (СП). Формальная классификация трендовых составляющих потенциальных полей СП на 7 таксонов позволила на количественной основе установить особый статус Анабарской провинции (АН), центральной в составе СП, как геологического пространства с признаками минимальной тектонической делимости литосферы, что существенно для сохранности алмазов в её составе и образования их промышленных месторождений.

Ключевые слова: алмазы, атрибут, делимость, литосфера, провинция, таксон.

МЯСНИКОВ ФЁДОР ВАСИЛЬЕВИЧ, кандидат геолого-минералогических наук, z_fedor49@mail.ru

Diamond-bearing lithosphere of the Siberian platform (based on geophysical data). Tectonic zonation

F. V. MYASNIKOV

In the first part of the article, we show structural relationships of prospective areas and perform tectonic zonation of the Siberian Platform (SP) using potential fields, application of the structural method, fractal analysis and multidimensional statistical methods. The formal classification of the trend components of the prospective areas of the SP into 7 taxa made it possible to establish on a quantitative basis the special status of the Anabar Province (AN), the central part of the SP, as a geological space with signs of minimal tectonic divisibility of the lithosphere. This is essential for the preservation of diamonds and the formation of deposits.

Key words: diamonds, attribute, divisibility, lithosphere, province, taxon.

Введение. Изучению кимберлитового магматизма СП, выяснению закономерностей размещения алмазоносных трубок в её пределах посвящено множество исследований и публикаций. Рассмотрение и анализ исходных геофизических данных и их трансформаций совместно с геологическими данными позволили выявить некоторые особенности глубинного строения литосферы СП, которые, по нашему мнению, недостаточно освещены в геологических материалах и могут оказаться полезными при прогнозировании и поисках промышленно-алмазоносных кимберлитовых полей (см. части 1 и 2 статьи).

Приведены результаты районирования СП на крупные тектонические провинции посредством изучения естественных структурных отношений потенциальных полей (когнитивный подход [7, 12]) и размежевания (разделения) её территории на основе формальной классификации трендовых составляющих гравитационного и магнитного полей.

Использованные материалы и методы. Ключевыми материалами при выполнении работы послужили матрицы наблюдений аномального гравитационного поля в редукции Буге и аномального магнитного поля по сети 2×2 км из базы «Гравимаг» (рис. 1). Исходная матрица приведена к сети 5×5 км (в координатах: по X от -760 до 1300 км, по Y от 5850 до 8500 км, 219303 пунктов), что обусловлено имеющимися вычислительными ресурсами. Выполнены расчёты и построения различных сочетаний локальных и региональных компонент гравитационного и магнитного полей на основе их предварительного разделения в «окнах» площадью от 100 до 10000 км² с интервалом по радиусу осреднения



Рис. 1. Обзорная схема Сибирской платформы:

1 – площадь гравиметрических и магнитометрических данных; кимберлитовые поля: 2 – среднепалеозойского, 3 – раннемезозойского, 4 – позднемезозойского и 5 – протерозойского возрастов; геофизические региональные профили: 6 – композиционный, 7 – сейсмические (ГСЗ) с использованием мирных ядерных взрывов, 8 – опорный Государственной сети профилей; 9 – наименование профилей (маркеры): 1 – «Алтай-Анабар», 2 – Кратон, 3 – Кимберлит, 4 – Батолит, 5 – 1СБ, 6 – Метеорит, 7 – Рифт; 10 – контур работ по объёмному ФГМ; на фото: Западная Якутия, гравиметрическая съёмка, оператор С. Субботенко, снимок С. Литкенса

5 км. Для анализа и геологического истолкования геофизических данных использовались картографические, табличные и текстовые материалы по глубинной геологии и геофизике, тектонике и истории геологического развития СП, которые доступны в Интернете, выполнялась оцифровка материалов, имеющихся на бумажных носителях.

В работе автор неоднократно обращался к результатам работ на сверхдлинных сейсмических профилях ГСЗ с применением мирных ядерных взрывов, к материалам площадных исследований ГСЗ в Якутской алмазоносной провинции, использовались материалы работ на опорных профилях и результаты их обобщения профильными организациями Роснедр [13], (Н. А. Горюнов и др., 2006; Е. Н. Черемисина и др., 2014).

Некоторые результаты и выводы, приведённые в статье (часть 2), получены благодаря работам по объёмному физико-геологическому моделированию (ФГМ) Вилюй-Мархинского междуречья (рис. 1), выполненному Чернышевской ГРЭ (экспедицией № 12 ВГО «Союзгеологоразведка» до 1986 г.) в 1988– 1996 гг. (Б. А. Калмыков и др., 1997).

Для корректного использования значительный объём внешних данных приведён к векторному виду в принятой для базы «Гравимаг» системе координат. Положение ключевых пространственных объектов – географических (реки, побережье СЛО и др.), геологических (кимберлитовые поля, краевые швы СП, структурно-формационные единицы и др.) – заимствованы, прежде всего, из работы ФБГУ «ВСЕГЕИ» [1]. Это позволило выполнить процедуры их совмещения с геофизическими данными, обработку, анализ и представление на основе применения доступных компьютерных технологий и программных средств (SURFER, STATISTICA и других).

Естественные структурные соотношения потенциальных полей СП. Приведённые на рис. 2, А, Б зависимости нормализованного размаха (R/S) от стандартного отклонения (S) иллюстрируют их изменчивость при каждом шаге осреднения (параметры матрицы трансформированных данных – разности между значениями поля после двух осреднений, например, в окне 100 и 400 км², 400 и 900 км² и др.). Зависимости являются эмпирическими структурными функциями, поскольку они характеризуют природные структурные соотношения потенциальных полей, свойственные всей платформе, и которые, в свою очередь, отражают разделение геологического пространства СП на крупные структурновещественные подразделения. Структурные функции (см. рис. 2, В) по своему смыслу идентичны приведённым на рис. 2, А и Б, но они подчёркивают соответствие радиусов осреднения (примерно 25 и 50 км, их положение показано пунктирными линиями), при которых происходит одновременное и скачкообразное изменение значений структурных функций гравитационного и магнитного полей. Оценка глубины залегания структурных уровней, при которых фиксируются скачки межкластерного расстояния, составляет 8-10 и 18-22 км. Это соответствует внутрикоровым границам «гранитно-гнейсовый слой (верхняя кора)-переходный слой (средняя кора)» и «переходный слой-базальтовый слой (нижняя кора)». Структурные уровни наряду с этим отражают, согласно тектоно-фациальному анализу, вертикальную геологическую зональность консолидированной



Рис. 2. Эмпирические зависимости нормализованного размаха от стандартного отклонения (структурные функции):

А - по гравиметрическим и Б - по магнитометрическим данным; В - то же (от радиуса осреднения потенциальных полей)

коры, как то: положение зон перехода от эпизоны к мезозоне и от неё к катазоне [3].

Эмпирические зависимости параметров гравитационного и магнитного полей представляют собой ломаные линии, они идентичны по форме, поведению, положению изломов, включают по три сравнительно однородных отрезка, в пределах которых не происходит скачкообразных изменений R/S. Ни один из отрезков не находится на одной прямой с другими, но происходит их смещение относительно друг друга. Особенно это свойственно зависимости R/S от S для гравитационного поля (см. рис. 2, A). Таким образом, по нашему мнению, отображается фрактальность геологической среды, когда с глубиной плотностные границы СВК утрачиваются и трансформируются, но сохраняются их общие контуры и единство. С уменьшением глубины (переходом в область высоких частот спектра полей) происходит усложнение и кажущаяся хаотизация (детализация) плотностных неоднородностей.

Схемы (рис. 3) с различными компонентами гравитационного поля (значения поля силы тяжести приведены в мГл) иллюстрируют, в соответствии с классической процедурой частотного (глубинного) зондирования геологической среды, вышеотмеченные особенности геологического строения и развития изучаемого пространства СП¹. Подобное разделение потенциальных полей позволяет установить положение и трёхмерное развитие структурных ансамблей иерархически-построенных (субфрактальных) разломных образований, которые формируются в граничных зонах СВК коры [6]. Разложение гравитационного поля на частотные уровни позволяет выявить самоафинность нелинейных структурных элементов изучаемых атрибутов среды и в двумерном пространстве, например, в пределах северозападной части СП (см. рис. 3, Б).

Анализ и сопоставление обобщённых оценок потенциальных полей, приведённое на рис. 2, показывают и значительные их отличия: диапазон изменения R/S магнитного поля в 3-4 раза превышает таковой гравитационного поля. При этом дифференцированность магнитного поля резко уменьшается с ростом радиуса осреднения, но более устойчива у гравитационного поля при меньших значениях параметра. Важные для интерпретации потенциальных полей корреляционные отношения фиксируются между компонентами гравитационного и магнитного полей (табл. 1). Первые строка таблицы (для гравитационного поля) и колонка (для магнитного) свидетельствуют о принципиально отличающемся распределении энергетического потенциала полей: для гравитационного он сосредоточен в области низких пространственных частот, а для магнитного поля в высокочастотной области. Приведённые особенности поведения полей указывают на высокую трендоустойчивость (эредитарность) гравитационного поля (см. рис. 2, А), относительно высокую трендоустойчивость магнитного поля (см. рис. 2, Б) в области высоких частот (малых окнах осреднения) с её полным распадом при больших окнах осреднения. Корреляционные параметры исходных гравитационного и магнитного полей, их высокочастотных и отчасти среднечастотных составляющих, при их оценке по регулярным сетям наблюдений, характеризуются низкими значениями. Вместе с тем линейные и нелинейные структурные элементы полей проявляют полную пространственную сопряжённость на всех частотах: положение, размеры, форма и размещение элементов магнитного поля, как правило, комплементарны границам разномасштабных гравитационных аномалий, которые, как известно, в том или ином объёме отвечают структурно-вещественным границам геологических тел [6].

Формальная пространственная корреляция полей начинает проявляться в низкочастотной области, когда их аномалообразующими объектами становятся не различные разномасштабные источники в верхней части коры (включая осадочный чехол), а мафит- и ультрамафитовые образования переходного и базальтового слоя, которые обладают высокой средней намагниченностью (2–4 А/м), превышающей среднюю намагниченность верхнего отдела коры на порядок [4]. Значения коэффициента парной линейной корреляции между трендовыми составляющими полей приближаются по абсолютной величине к 0,50 и значительно варьируют для различных регионов платформы.

Тектонические провинции СП. Тектоническому районированию и изучению фундамента СП посвящены работы академических и отраслевых институтов, производственных организаций, перечисление которых в данной публикации и нереально, и нецелесообразно [8, 10, 13]. Отметим, что все исследования являются вкладом в базу знаний и фактов, они остаются бесценным наследием советской и российской геологической науки и практики.

Изучение работ в области тектонического районирования фундамента платформы показывает, что системный и комплексный структурно-формационный подход, использованный ФГБУ «ВСЕГЕИ» для изучения геологии и полезных ископаемых данного региона, позволил получить результаты, которые трудно переоценить [1]. Важные исследования внутренней структуры кристаллического фундамента СП, его глубинного строения, геофизических характеристик верхней мантии и их связи с алмазоносностью выполнены Ю.М. Эринчеком с коллегами [13].

На рис. 4 представлена схема районирования СП с выделением наиболее крупных тектонических сегментов СП – тектонических провинций (мегаблоков, супертеррейнов): Тунгусской (Т), Оленёкской (О), Анабарской (АН) и Алданской (АЛ). Положение внутренних границ (тектонических швов) провинций СП не является оригинальным – они согласуются

¹ Принятая в статье цветовая шкала аналогична легендам, используемым при изображении рельефа на физико-географических картах. Повторные (неоднократные) описания условных обозначений не приводятся.



Рис. 3. Проявленность квазифрактальной организации геологической среды Сибирской платформы в различных компонентах гравитационного поля:

извлечения между радиусами осреднения (в км): А – 400 и 1200, Б – 100 и 400, В – 60 и 100, Г – 25 и 60; красный пунктир – краевые швы СП, по [9]

	Граничные радиусы окна осреднения, км								
Компоненты поля	Исходное поле (магнитное)	20-70	70–120	120-200	200–400	Тренд			
Исходное поле (гравитационное)	1,00	0,29	0,35	0,38	0,53	0,92			
20-70	0,77	1,00	0,67	0,35	0,12	0,01			
70–120	0,62	0,43	1,00	0,75	0,27	0,02			
120–200	0,53	0,15	0,56	1,00	0,53	0,05			
200–400	0,39	0,03	0,11	0,37	1,00	0,28			
тренд	0,27	0,01	0,02	0,06	0,33	1,00			

1. Коэффициенты парной линейной корреляции исходного поля, некоторых компонент и тренда гравитационного (фиолетовые числа) и магнитного (красные числа) полей

с ранее выделенными границами, но присутствует и ряд изменений, предложенных в контексте использованного к интерпретации данных подхода [1, 10, 13].

Субмеридиональная граница, разделяющая Тунгусскую провинцию от Анабарской, установлена давно и известна как Таймыро-Байкальский линеамент или Саяно-Таймырская сутура, по Розену [10] (коллизионная зона, тектонические шовные зоны, коровая складчатость). Она трассируется в геофизических полях и их трансформантах. Здесь (см. рис. 4, А) зона фиксируется сопряжённой последовательностью положительных и отрицательных аномалий компоненты гравитационного поля, из которой исключены высокочастотная составляющая и тренд. Компонента отображает структурно-вещественные особенности строения гранито-гнейсового слоя и средней коры и соответствует, согласно естественному разделению поля, двум правым отрезкам структурной функции, размах значений компоненты – 154 мГл, что составляет 0,5 предела изменчивости исходного поля в пределах изучаемой территории СП (см. рис. 4). Граница сочленения провинций маркируется ретроспективными структурами протоорогенного режима раннепротерозойского тектонического мегацикла [1] – линейными протовулканогенами трахибазальтового и трахидацитового состава, что согласуется с положением, морфологией, размерами и знаком как гравитационных, так и магнитных локальных аномалий (см. рис. 4, А). Предложенная граница провинций по отношению к положению Таймыр-Байкальского линеамента (Саяно-Таймырской сутуре, по [10]) с севера на юг смещается к западу, а в пределах 60 градуса с. ш. картируется на удалениях 200-300 км от него и отвечает границе Иркинеево-Чадобецкого авлакогена с Непско-Ботуобинской антеклизой, что подтверждается глубинными работами МОГТ на опорном профиле 1-СБ, II этап. Граница контролируется Заярским и Ангаро-Алымджинским глубинными разломами [2], а Таймыро-Байкальский линеамент тяготеет к субвертикальной зоне деструкции коры, обогащённой продуктами магматизма базитового состава и приурочена к погружению поверхности Мохо (Н. А. Горюнов и др., 2006).

В.С. Старосельцевым в работе [9] выделен Ангаро-Котуйский рифтогенный прогиб, к осевой части которого на всём его протяжении отчётливо тяготеет рассматриваемая граница Тунгусской и Анабарской провинций, практически совпадающая с 102 меридианом в.д. Предполагаемый прогиб по своему ограничению, морфологии и структурному образу непротиворечиво согласуется с гравиметрическими материалами, когда можно наблюдать его возможные границы и внутриблоковое строение (см. рисунки 3, В, 4, А и другие графические материалы статьи).

Субширотная граница Анабарской и Оленёкской провинций (Котуйканская сутура или разломная зона [10]) в геофизических полях и их трансформантах устанавливается с безусловной определённостью: она резко ограничивает субмеридиональные аномалии, широко представленные в первой из них (см. рисунки 2, Б и В, рис. 4). В пределах Оленёкской провинции отмечается низкий уровень регионального магнитного поля, среди структурных элементов геофизических аномалий разного знака и размерности преобладают нелинейные с гладкими очертаниями и незначительными градиентами. Отличительной особенностью потенциальных полей Оленёкской провинции является отрицательная их корреляция, которая в низкочастотной области пространственного



Рис. 4. Схема районирования территории Сибирской платформы на тектонические провинции по материалам обработки компонент (извлечений между радиусами осреднения 25 и 100 км) из гравитационного (А) и магнитного (Б) полей:

1 – промышленно-алмазоносные кимберлитовые поля; 2 – границы тектонических провинций; 3 – Анабарский щит [9]; 4 – маркеры, трассирующие устойчивые последовательности локальных аномалий; 5 – линейные протовулканогены; 6 – тектоногранитоидная шовная зона; 7 – тектоно-гетероформационная шовная зона (условные 6–8, по [9]); в голубых квадратиках – сокращённые наименования тектонических провинций

спектра достигает -0,53 отн. ед. (табл. 2), что не отмечается при одинаковых условиях формирования выборок в других регионах СП. В связи с изложенным геологическое истолкование границы раздела рассматриваемых провинций как структуры агорализитного режима в качестве тектоно-гетероформационной шовной зоны среди ретроспективных структур раннепротерозойского тектонического мегацикла СП представляется существенным и обоснованным [1, прил. 5]. Подтверждают такой вывод и противоположные доминирующие направления падения квазилинейных складчатых структур фундамента, что установлено как полевыми исследованиями в пределах Анабарского щита [1], так и при качественной оценке градиентных характеристик среднечастотных составляющих потенциальных полей: для Анабарской провинции характерны западные и югозападные, а для Оленёкской северо-восточные румбы. Результаты разработки плотностной и теплогенерационной модели строения литосферы вдоль профиля ГСЗ «Шпат» в пределах Анабарского щита с использованием сейсмических, гравитационных и тепловых характеристик земной коры региона, приведённые в работе [5], подтвердили указанные направления падения крупных структурно-вещественных комплексов. В работе [13] эта граница провинций выделяется, но рассматривается как раздел Маакского и Центрального макроблоков в пределах второго наряду с Тунгусским в составе платформы Анабаро-Алданского мегаблока.

Провинции	Количество	Среднее (мГл, нТл)	Стандарт (S)	ОТ	до	Размах (R)	R/S, отн. ед.	r (G-T), отн. ед.		
Гравитационное поле (G)										
СП	6230	-37,5	35,0	-127,3	28,0	155,3	4,44	-0,23		
СП без АН	5450	-36,8	37,0	-127,3	28,0	155,3	4,20	-0,30		
Анабарская	780	-42,7	12,4	-82,9	-13,0	69,9	5,64	0,17		
Алданская	1600	-70,7	27,9	-117,7	-12,9	104,8	3,76	-0,14		
Оленёкская	1180	-5,0	20,7	-59,9	28,0	87,9	4,25	-0,53		
Тунгусская	2670	-30,5	31,0	-127,3	22,2	149,5	4,82	-0,15		
			Магнитное	е поле (Т)						
СП	6230	13,8	35,9	-66,4	96,1	162,5	4,53	-0,23		
СП без АН	5450	19,3	33,7	-66,4	96,1	162,5	4,82	-0,30		
Анабарская	780	-24,8	25,7	-61,1	30,1	91,2	3,55	0,17		
Алданская	1600	23,8	24,3	-36,9	79,9	116,8	4,81	-0,14		
Оленёкская	1180	-6,0	27,1	-45,6	62,7	108,3	4,00	-0,53		
Тунгусская	2670	27,7	35,7	-66,4	96,1	162,5	4,55	-0,15		

2. Основные статистические характеристики трендовых составляющих потенциальных полей Сибирской платформы и её тектонических провинций

Северо-восточной (восточной) тектонической границей Анабарской провинции с Алданской является тектоническая шовная зона, известная как Акитканский орогенный пояс (см. рис. 4, Б). На рисунке тектонический шов (ороген) фиксируется последовательностью положительных магнитных аномалий различной интенсивности, с которыми сопряжены с обеих сторон от неё ряды отрицательных экстремальных значений компоненты магнитного поля. Приведённая трансформанта (среднечастотный фрагмент поля - разность его значений из матриц с окнами 50 и 200 км) наиболее уверенно фиксирует присутствие структурно-вещественных образований коллизионного шва (орогенного пояса), которые обрамляют северо-западную границу погребённой палеозойской Патомско-Вилюйской рифтогенной системы [13]. Граница разделяет субмеридиональноориентированные полосовые аномалии потенциальных полей Анабарской от совокупности менее упорядоченных аномалий Алданской провинции, преимущественно северо-восточной ориентировки (см. рис. 4).

Характеристика отображения внутренних тектонических границ провинций СП в геофизических полях как атрибутов изучаемого геологического пространства по их графической визуализации (см. рисунки 3, 4 и другие графические материалы публикации) показывает, что они подобны по протяжённости линейным формам, сочетанию положительных и отрицательных отклонений поля краевым швам платформы (орогенным поясам, коллизионным призмам, разломным зонам). Некоторые отличия проявленности орогенных поясов вызваны различной степенью их эродированности до перекрытия осадочным чехлом, составом и внутренним строением, уровнем эксгумации в настоящее время и в целом историей геологического развития платформы и её отдельных регионов.

Тектонические провинции контрастно отличаются друг от друга доминирующим простиранием линейных и нелинейных структурных элементов потенциальных полей: в Тунгусской - субширотное, Оленёкской - от запад-северо-западного до северо-западного, Анабарской - субмеридионального, Алданской – северо-восточного. Статистические характеристики потенциальных полей указывают на принципиальные отличия АН провинции по этим параметрам от других сегментов СП (см. табл. 2, сеть 30 × 30 км). Провинция характеризуется: низкой дифференцированностью гравитационного поля при его средних значениях, близких к среднему для платформы (см. рисунки 3, 4); существенно низкими значениями магнитного поля при пониженной его изменчивости; положительной, хотя и слабой, корреляцией потенциальных полей при устойчивых отрицательных значениях их соотношений для остальных провинций; существенно более низким уровнем фрагментации полей и менее значительной

Номера кластеров	Количество	Среднее (мГл, нТл)	Стандарт (S)	От	До	размах (R)	R/S, отн. ед.	r (G-T), отн. ед.	
Гравитационное поле (G)									
1	1197	-42,6	10,3	-69,6	-21,2	48,4	4,7	-0,04	
2	1093	-23,9	14,6	-62,3	8,2	70,5	4,8	0,18	
3	653	-96,0	14,9	-127,3	-59,8	67,5	4,5	0,36	
4	718	-81,6	13,2	-124,0	-55,9	68,1	5,2	-0,38	
5	899	-5,7	9,0	-27,1	18,0	45,1	5,0	0,21	
6 (аналог АН)	898	-44,5	9,6	-44,5	-18,0	26,5	2,8	-0,03	
7	772	12,7	9,2	-14,9	28,0	42,9	4,7	-0,53	
			Магнитное	поле (Т)					
1	1197	19,6	13,4	-5,8	50,9	56,7	4,2	-0,04	
2	1093	62,0	14,0	35,9	96,1	60,2	4,3	0,18	
3	653	48,5	14,5	15,9	83,1	67,2	4,6	0,36	
4	718	3,5	10,4	-21,7	29,9	51,6	5,0	-0,38	
5	899	13,6	14,7	-16,2	46,8	63,0	4,3	0,21	
6 (аналог АН)	898	-30,4	16,6	-61,1	-5,1	56,0	3,4	-0,03	
7	772	-31,9	13,2	-66,4	-5,6	60,8	4,6	-0,53	

3. Основные статистические характеристики семи пространственных кластеров трендовых составляющих потенциальных полей Сибирской платформы

их хаотизацией во всём спектре пространственных частот СП. В совокупности поименованные особенности геофизических полей как атрибуты геологического пространства СП отражают относительную тектоническую целостность АН провинции, стабильный и устойчивый режим её развития начиная с неогея, тогда как тектоническая делимость окружающих провинций существенно выше, что является известным постулированным положением [1].

Апробация приведённого когнитивного подхода к тектоническому районированию СП выполнена посредством формальной классификации её территории и ближайшего обрамления на 7 кластеров. Выбранное число кластеров позволяет максимально приблизить площади выделенных провинций и формально декларируемых процедурой классификации объёмов изучаемого пространства. Для классификации СП использованы трендовые значения гравитационного и магнитного полей (сеть 30 × 30 км, 6230 ф.т.), применён метод средних (мера дистанций – евклидовое расстояние). Результаты кластеризации приведены в табл. 3 и проиллюстрированы рисунком 5. В качестве растровой подложки на карте-схеме (см. рис. 5, Б) использованы образы низкочастотной составляющей магнитного поля.

Полученные результаты формального разделения СП на кластеры согласно трендовым значениям потенциальных полей показывают, что эти таксоны образуют ограниченное число пространственно-связанных сообществ. Выделенные кластеры локализованы в пространстве СП, они в целом хорошо согласуются с положением провинций и их границами. В совокупности это обстоятельство отражает тесную связь динамических (амплитудных) атрибутов и пространственно-частотных характеристик потенциальных полей (положение, ориентировка, размеры линейных и нелинейных разноранговых структурных элементов), которые составляют базовые основания для реализации когнитивного подхода при тектоническом районировании СП.

Совместное рассмотрение диаграмм на рис. 5, А и В показывает чёткую структуризацию по степени базификации (или гранитизации) консолидированной коры СП на её западную и северо-западную, с одной стороны, восточную июго-восточную части, сдругой стороны, по диагонали через пространство АН провинции, что отмечено также в работе [13]. Семикластерное разделение Сибирской платформы (см. рис. 5, А) в координатах трендовых значений потенциальных полей фиксирует принадлежность первых шести таксонов к единому «родовому» дереву изучаемого пространства.

Шестой кластер, отвечающий центральной части Анабарской провинции, представляет в структуре «родового» дерева его основание (или ствол), что не является ординарным событием (см. рис. 5, А). Это


Рис. 5. Результаты формальной классификации территории Сибирской платформы с использованием трендовых значений потенциальных полей:

А – диаграмма размещения кластеров с соответствующими им фигуративными точками в координатах трендовых значений потенциальных полей; Б – пространственное положение кластеров в пределах СП; В – диаграмма размещения кластеров в координатах нормализованных размахов трендовых значений потенциальных полей; 1 – границы кластеров; 2 – номера кластеров

указывает на значительный объём в составе современной консолидированной коры кластера и в целом АН провинции реликтов протолитосферы, которые и определяют высокую специфичность и достаточно простое (однородное) строение коры и литосферы данного таксона СП. Уникальность шестого кластера в составе платформы контрастно отображается в координатах нормализованных размахов потенциальных полей (см. рис. 5, В), низкие значения которых являются следствием компактного распределения значений потенциальных полей около их средних значений, что указывает на особое положение АН провинции, её относительную целостность, низкую энтропию и низкую тектоническую делимость. Кластер 7 (частично кластер 5) в пространстве СП (побережье Карского и моря Лаптевых) соответствует областям платформы, в пределах которых происходит смена типа коры от континентального к океаническому. На диаграммах (см. рис. 5, А) фиксируется обособленность (внесистемность) фигуративных точек этих кластеров, иллюстрирующая их принадлежность к другой общности данных, иначе – антидромность соответствующего им геологического пространства остальной части СП. Значения гравитационного поля в пределах таксонов являются максимальными для СП, что указывает на увеличение основности коры в направлении к Северному Ледовитому океану и возрастание в составе литосферы доли фемических минералов. Точечные оценки эмпирических функций распределения трендовых значений потенциальных полей и их соотношения в пределах Анабарской провинции в большей степени шестого кластера пространства СП при её формальной классификации свидетельствуют о высокой однородности и относительно сопредельных территорий о простом структурновещественном строении литосферы рассматриваемого пространства Сибирской платформы². Можно также допустить, что это маркирует области максимального соответствия состава и структуры литосферы СП параметрам геологической среды на время завершения пермобильного режима её развития [1].

Выводы. Обсуждаемый статус и положение тектонических провинций приводятся не впервые, они в близкой редакции известны. Рассматриваемые провинции (как супертеррейны) выделены и с плейттектонических позиций охарактеризованы в работах Розена [8], их изучению посвящены многочисленные исследования академических и отраслевых институтов Иркутска, Москвы, Новосибирска, Санкт-Петербурга [13] и Якутска [10]. Им отвечают в том или ином объёме Тунгусская, Уджинская и Мархинско-

Алданская археоплиты, которые появились в конце архейского мегацикла и явились впоследствии ядром платформы [1]. Принципиальным отличием предложенной схемы районирования СП на тектонические провинции является смещение к западу на 200– 300 км границы Тунгусской и Анабарской провинций (на широте 60° с.ш.). Такое положение границы соответствует положению Саяно-Таймырского желобового пояса, выделенному по материалам ГСЗ на геотраверсах [11], подтверждается материалами по опорному профилю 1-СБ (II) этап, что следует из материалов второй части статьи и в совокупности указывает на архейское (доархейское) размежевание провинций по субмеридиональным линеаментам.

Тектоническое районирование Сибирской платформы с использованием среднечастотного спектра гравитационного и магнитного полей и формального размежевания её территории по классификации их трендовых значений показало тесную связь динамических атрибутов и пространственно-частотных характеристик полей. Наблюдается единство формы и содержания крупнейших структурно-формационных подразделений коры и мантийной литосферы, а также их глубокое взаимодействие во времени и пространстве. Количественные соотношения ряда характеристик потенциальных полей подчёркивают особый относительно других территорий статус АН провинции как региона с минимальной тектонической делимостью литосферы, что существенно для сохранности алмазов в её составе и образования их промышленных месторождений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Геология и полезные ископаемые России. В 6 т. Т. 3 Восточная Сибирь / под ред. Малич Н. С., Миронюк Е. П., Орлов В. П., Туганова Е. В. – СПб. : Изд-во ВСЕГЕИ, 2002. – 396 с.
- Ефимов А. С., Мигурский А. В., Старосельцев В. С., Баранова М. И., Рудницкая Д. И., Вальчак В. И., Горюнов Н. А., Евграфов А. А. Блоковое деление земной коры Сибирской платформы по данным глубинного сейсмопрофилирования МОГТ // Материалы Всероссийского совещания (18–21 августа 2009 г.) «Разломообразование и сейсмичность в литосфере: тектонофизические концепции и следствия». – В 2 т. Т. 1. – Иркутск : Институт земной коры СО РАН, 2009. – С. 43–45.
- Кутейников Е. С., Кутейникова Н. С., Паталаха Е. И., Смирнов А. В. Структурный анализ при палеогеодинамических реконструкциях. – М.: Геокарт, 1994. – 256 с.
- Мартышко П. С., Ладовский И. В., Федорова Н. В., Бызов Д. Д., Цидаев А. Г. Теория и методы комплексной интерпретации геофизических данных. – Екатерингбург: УрО РАН, 2001. – 94 с.

- Милановский С. Ю., Кабан М. К., Розен О. М., Егоркин А. В. Геофизические особенности строения коры Анабарского щита // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. – 2017. – № 4, Вып. 36. – С. 56–71.
- Мясников Ф. В. Глубинные критерии кимберлитового магматизма Якутской алмазоносной провинции с позиции нелинейной геологии // Разведка и охрана недр. – 2020. – № 7. – С. 8–20.
- Овсов М. К. Структурный анализ геоданных: методические рекомендации по применению. – СПб. : ГП «Невскгеология», 2003. – 107 с.
- *Розен О. М.* Сибирский кратон: тектоническое районирование, вопросы эволюции // Геотектоника. 2003. № 3. С. 1–19.
- 9. Старосельцев В. С. Проблема выделения рифтогенных прогибов перспективных тектонических элементов активного нефтегазообразования // Геология и геофизика. 2009. Т. 50, № 4. С. 475–483.
- Тектоника, геодинамика и металлогения территории Республики Саха (Якутия) / отв. ред. Л. М. Парфенов, М. И. Кузьмин. – М. : Наука/Интерпериодика, 2001. – 571 с.

² Шестой кластер – единственный из семи таксонов имеет положительные значения асимметрии (A = 0,40) и эксцесса (E = 0,23) трендовой составляющей гравитационного поля и отрицательные значения этих параметров магнитного поля (A = -0,27 и E = -1,23). На третьей части площади кластера (275 тыс. км²) значения трендовой составляющей гравитационного поля варьируют в чрезвычайно узком диапазоне – от -50 до -45 мГл.

- Чернышев Н. М., Бокая Л. И. Морфоструктурные элементы консолидированной коры Сибирской платформы // Структурные элементы земной коры и их эволюция. – Новосибирск : Наука, 1983. – С. 144–151.
- 12. *Чумак О. В.* Энтропии и фракталы в анализе данных. М.–Ижевск : НИЦ «Регулярная и хаотическая ди-

REFERENCES

- Geologiya i poleznyye iskopayemyye Rossii. Vostochnaya Sibir' [Geology and minerals of Russia. V. 3 Eastern Siberia]. ed. Malich N. S., Mironyuk Ye. P., Orlov V. P., Tuganova Ye. V., St. Petersburg, VSEGEI publ., 2002, 396 p. (In Russ.)
- Yefimov A. S., Migurskiy A. V., Starosel'tsev V. S., Baranova M. I., Rudnitskaya D. I., Val'chak V. I., Goryunov N. A., Yevgrafov A. A. Blokovoye deleniye zemnoy kory Sibirskoy platformy po dannym glubinnogo seysmoprofilirovaniya MOGT [Block division of the Earth crust of the Siberian platform according to deep seismic profiling of CDP]. Materialy Vserossiyskogo soveshchaniya (18–21 avgusta 2009 g.) "Razlomoobrazovaniye i seysmichnost' v litosfere: tektonofizicheskiye kontseptsii i sledstviya" [Proceedings of the All-Russian meeting (August 18–21, 2009) "Faulting and seismicity in the lithosphere: tectonophysical concepts and consequences."], V. 1, Irkutsk, Institut zemnoy kory SO RAN publ., 2009, pp. 43–45. (In Russ.)
- Kuteynikov Ye. S., Kuteynikova N. S., Patalakha Ye. I., Smirnov A. V. Strukturnyy analiz pri paleogeodinamicheskikh rekonstruktsiyakh [Structural analysis in paleogeodynamic reconstructions]. Moscow, Geokart publ., 1994, 256 p. (In Russ.)
- Martyshko P. S., Ladovskiy I. V., Fedorova N. V., Byzov D. D., Tsidayev A. G. Teoriya i metody kompleksnoy interpretatsii geofizicheskikh dannykh [Theory and methods of complex interpretation of geophysical data]. Yekateringburg, UrO RAN publ., 2001, 94 p. (In Russ.)
- Milanovskiy S. Yu., Kaban M. K., Rozen O. M., Yegorkin A. V. Geofizicheskiye osobennosti stroyeniya kory Anabarskogo shchita [Geophysical features of the structure of the crust of the Anabar Shield]. Vestnik KRAUNTS. Nauki o Zemle [Vestnik KRAUNTS. Earth Sciences], 2017, No. 4, Is. 36, pp. 56–71. (In Russ.)
- Myasnikov F. V. Glubinnyye kriterii kimberlitovogo magmatizma Yakutskoy almazonosnoy provintsii s pozitsii nelineynoy geologii [Depth criteria of kimberlite magma-

намика», Институт компьютерных исследований, 2011. – 164 с.

 Эринчек Ю. М., Мильштейн Е. Д., Колесник Н. Н. Глубинное строение и геодинамика районов проявления кимберлитового магматизма на Сибирской платформе // Региональная геология и металлогения. – 2000. – № 10. – С. 209–228.

tism of the Yakutsk diamondiferous province from the standpoint of nonlinear geology]. Razvedka i okhrana nedr, 2020, No. 7, pp. 8–20. (In Russ.)

- Ovsov M. K. Strukturnyy analiz geodannykh: metodicheskiye rekomendatsii po primeneniyu [Structural analysis of geodata: guidelines for application]. St. Petersburg, Nevskgeologiya publ., 2003, 107 p. (In Russ.)
- Rozen O. M. Sibirskiy kraton: tektonicheskoye rayonirovaniye, voprosy evolyutsii [Siberian craton: tectonic zoning, questions of evolution, Geotectonics]. Geotektonika, 2003, No. 3, pp. 1–19. (In Russ.)
- Starosel'tsev V. S. Problema vydeleniya riftogennykh progibov – perspektivnykh tektonicheskikh elementov aktivnogo neftegazoobrazovaniya [The problem of identifying rift troughs as promising tectonic elements of active oil and gas formation]. Geologiya i geofizika, 2009, V. 50, No. 4, pp. 475–483. (In Russ.)
- Tektonika, geodinamika i metallogeniya territorii Respubliki Sakha (Yakutiya) [Tectonics, geodynamics and metallogeny of the territory of the Republic of Sakha (Yakutia)]. ed. L. M. Parfenov, M. I. Kuz'min, Mpscow, Nauka/Interperiodika publ., 2001, 571 p. (In Russ.)
- Chernyshev N. M., Bokaya L. I. Morfostrukturnyye elementy konsolidirovannoy kory Sibirskoy platformy [Morphostructural elements of the consolidated crust of the Siberian platform]. Strukturnyye elementy zemnoy kory i ikh evolyutsiya, Novosibirsk, Nauka publ., 1983, pp. 144– 151. (In Russ.)
- 12. *Chumak O. V.* Entropii i fraktaly v analize dannykh [Entropies and fractals in data analysis]. Moscow–Izhevsk, Regulyarnaya i khaoticheskaya dinamika publ., Institut komp'yuternykh issledovaniy publ., 2011, 164 p. (In Russ.)
- Erinchek Yu. M., Mil'shteyn Ye. D., Kolesnik N. N. Glubinnoye stroyeniye i geodinamika rayonov proyavleniya kimberlitovogo magmatizma na Sibirskoy platforme [Deep structure and geodynamics of areas of manifestation of kimberlite magmatism on the Siberian platform]. Regional'naya geologiya i metallogeniya, 2000, No. 10, pp. 209– 228. (In Russ.)

Статья поступила в редакцию 30.05.22; одобрена после рецензирования 13.09.22; принята к публикации 26.09.22. The article was submitted 30.05.22; approved after reviewing 13.09.22; accepted for publication 26.09.22.

DOI:10.47765/0869-7175-2022-10036

УДК 669.334 © Коллектив авторов, 2022

Исследование технологии бактериального выщелачивания меди из бедных медьсодержащих отвалов

В работе приведены результаты экспериментов по кучному выщелачиванию меди из рудного сырья с предварительным бактериальным окислением; в качестве биоокислителя также использовалась культура A.ferrooxidans. Проведены исследования по адаптации и культивированию технологически эффективного штамма A.ferrooxidans. Также в качестве альтернативного химического окислителя был рассмотрен вариант применения трихлоризоциануровой кислоты (ТХЦК). Данные по извлечению меди приведены в сравнении со стандартным сернокислотным выщелачиванием в качестве контрольного варианта. В результате применения химического метода окисления с использованием ТХЦК рост извлечения меди в раствор по сравнению с другими вариантами наблюдался только в течение первых 10 дней. В результате за 30 дней выщелачивания показатель извлечения меди составил 52,83 %. За аналогичный период стандартным сернокислотным меди составил 52,87 %. Наибольшая результативность наблюдалась в варианте предварительного бактериального окисления за 30 дней выщелачивания, в продуктивный раствор было извлечено 76,08 % меди. На стадии электролиза из наработанных растворов электролитов было проведено катодное осаждение меди с выходом металла по току 94,6 %.

Ключевые слова: бактериальное окисление, A.ferrooxidans, трихлоризоциануровая кислота, электролиз, электролит, экстракция, реэкстракция продуктивный раствор.

КОЙЖАНОВА АЙГУЛЬ КАЙРГЕЛЬДЫЕВНА, кандидат технических наук, заведующая лабораторией спецметодов гидрометаллургии, a.koizhanova@satbayev.university, aigul_koizhan@mail.ru

МАГОМЕДОВ ДАВИД РАСИМОВИЧ, магистр, младший научный сотрудник, d.magomedov@stud.satbayev.university

ЕРДЕНОВА МАРИЯ БЕЙСЕНБЕКОВНА, магистр, m.erdenova@satbayev.university

АБДЫЛДАЕВ НУРГАЛИ НУРЛАНОВИЧ, бакалавр, ведущий инженер, nur.ab.kz@mail.ru, n.abdyldaev@satbayev.university

БАКРАЕВА АКБОТА НУРЛАНОВНА, магистр

Казахский национальный технический университет имени Сатбаева, АО «Институт металлургии и обогащения», г. Алматы, Казахстан

Investigation of the process of leaching copper from copper-containing dumps using bio-oxidants

A. K. KOIZHANOVA, D. R. MAGOMEDOV, M. B. ERDENOVA, N. N. ABDYLDAEV, A. N. BAKRAEVA

Satbayev University, The Institute of Metallurgy and Ore Beneficiation, Almaty, Kazakhstan

The paper presents the results of experiments on bulk copper leaching with preliminary bacterial oxidation of initial ore. As a culture of bio-oxidant, we used A.ferrooxidans. Studies on the adaptation and cultivation of a technologically efficient strain of A.ferrooxidans have been carried out. As an alternative chemical oxidizer, the use of trichloroisocy-anuric acid (THCC) was considered. Standard sulfuric acid leaching served as a control option. As a result of the application of the chemical oxidation method using THCC, an increase in the extraction of copper into solution compared to other options was observed only during the first 10 days. As a result, over 30 days of leaching, the copper recovery rate was 52,83%. During the same period, 62,17% of copper was extracted by standard sulfuric acid leaching. The greatest efficiency was observed in the variant of preliminary bacterial oxidation. During 30 days of leaching, 76,08% of copper was extracted into the productive solution. At the electrolysis stage, 30,8 g of copper was deposited on the cathode from the accumulated electrolyte solutions, which gives a current recovery equal to 94,6%.

Key words: bacterial oxidation, A.ferrooxidans, trichloroisocyanuric acid, electrolysis, electrolyte, extraction, re-extraction, productive solution.

Введение. Характерной особенностью большинства медных месторождений Казахстана являются уменьшение запасов богатого сырья, а также накопление значительных объёмов забалансовых отвалов с низким содержание меди 0,1-0,5%, что делает процесс пирометаллургической плавки подобного сырья нерентабельным. Для переработки руд и отвалов с низким содержанием меди, преимущественно находящейся в сульфидной форме, успешно применяется практика флотационного обогащения. Для переработки забалансового медного сырья, представленного в основном окисленной формой медьсодержащих минералов, используется стандартная гидрометаллургическая технология, включающая сернокислотное выщелачивание, с последующей жидкостной экстракцией и электролизом. Однако, помимо забалансовых руд и отвалов, имеющих явно выраженную сульфидную или окисленную форму нахождения меди в минералах, встречаются многочисленные месторождения со сложным минеральным составом. В большинстве случаев для сложного состава таких месторождений характерно нахождение меди в окисленной минеральной форме при одновременно достаточно высоком содержании различных примесей сульфидных и железосодержащих минералов, таких как пирит, арсенопирит и прочие. Отсутствие же сульфидных медных минералов исключает возможность флотационного обогащения. В то же время присутствие в минеральном составе сырья сульфидов других металлов, в частности железа, способно вызывать затруднения при стандартной гидрометаллургической переработке. Несмотря на то, что окисленные формы меди легко переходят в раствор при сернокислотном выщелачивании, присутствующие в минералогическом составе руды (отвала) сульфиды двухвалентного железа и других элементов будут в значительной степени повышать расход серной кислоты в процессе гидрометаллургической переработки. Кроме того, присутствие минералов, имеющих в своём составе различные комбинации железа, кальция, карбонатов и силикатов (тремолит, клинохлор, кальцит и др.) способно также оказать негативное влияние на процесс выщелачивания серной кислотой.

Современная стандартная технология кучного выщелачивания и жидкостной экстракции меди подробно раскрыта в ряде работ отечественных и зарубежных исследователей [3–5, 7, 9, 10]. В большинстве случаев стандартная гидрометаллургическая технология получения меди ограничивается возможностью применения лишь на окисленном сырье простого состава, с низким содержанием соединений двухвалентного железа. Присутствие железа в двухвалентной форме, в виде минералов пирита, пирротина и других соединений, значительно затрудняет процесс выщелачивания, также повышая расход основного выщелачивающего реагента - серной кислоты. Это приводит к необходимости предварительной обработки сырья окисляющими реагентами и перевода железа в окисленную трёхвалентную форму. Использование химических окислителей, например, таких как пероксид натрия, гипохлорит калия, применяемых в процессе выщелачивания благородных металлов, в случае с медным сырьём нерентабельно. В настоящее время большое значение придаётся применению бактерий при извлечении меди из руды. Под термином «бактериальное выщелачивание» подразумевается предварительная биообработка руд микроорганизмами. Показано, что адаптация бактерий перед биовыщелачиванием повышает эффективность процесса.

Широко известна роль бактерий Thiobacillus ferrooxidans в процессах выщелачивания сульфидных руд. При биогеотехнологическом процессе металлы из нерастворимых в воде сульфидов переходят в растворимые сульфаты. Тионовые бактерии Thiobacillus ferrooxidans окисляют все сульфиды металлов. Необходимый для роста бактерий углерод они получают из углекислого газа. Эти бактерии развиваются в кислой среде (pH в диапазоне 1,0-4,8) при температурах от 3 до 40 °C. Оптимальные параметры развития бактерий – величина рН лежит в пределах 2-3, температура 28 °С. Тионовые бактерии встречаются в месторождениях серных и сульфидных руд. Но свою активность они проявляют в присутствии кислорода [11, 20, 22]. В качестве главных преимуществ бактериального окисления можно отметить высокую эффективность перевода двухвалентного железа в трёхвалентное, а также недорогую стоимость данной технологии.

В процессе разработки технологии биовыщелачивания, необходимо учитывать резко континентальный климат месторождений Казахстана. Несмотря на то, что наибольшее распространение данная технология приобрела в ЮАР, Австралии, странах Южной Америки, показательным будет также пример финской компании Talvivaara, которая в условиях северных широт в 2009–2010 гг. при внедрении биохимической технологии на месторождении Колмисоппи добилась увеличения производства меди в 2,7 раз [12]. Другие современные методы бактериального разложения минеральных составляющих медьсодержащих руд описаны в работах [14, 15, 18, 21].

Экспериментальные методы и результаты. Объекты исследования – медьсодержащая руда отвала, бактерии классов Acidithiobacillus ferrooxidans и Thiobacillus ferrooxidans. Работа заключается в разработке технологии применения бактерий в качестве

катализирующего окислительные процессы фактора позволит в значительной степени повысить степень извлечения меди в продуктивный раствор.

Адаптация и рост бактериальной культуры A.ferrooxidans, как правило, сопровождается определёнными изменениями в параметрах раствора [1, 6, 13, 16, 17, 19], в частности, наблюдается активное снижение концентрации Fe²⁺ и увеличение ионов Fe³⁺. Зачастую соединения меди являются токсичными для стандартного штамма A.ferrooxidans, что требует дополнительной микробиологической селекции с выращиванием адаптированной культуры. Штаммы A.ferrooxidans, адаптированные к условиям медного сырья, позволяют производить биовыщелачивание сульфидов с упором на сульфиды меди. Известен образец штамма Acidithiobacillus ferrooxidans-1333, выведенный в Korean Centre for Culture Collection, показавший высокие результаты окисления Fe²⁺ в составе халькопирита за счёт высокой иммобилизации бактерий к специфике данного минерала [2, 8].

Обсуждение результатов. При наработке раствора для биохимического окисления рудного материала осуществлялась предварительная селекция бактериального штамма A.ferrooxidans, адаптированного к особенностям химического и минералогического состава медного сырья. В процессе адаптации штаммов к минеральному сырью, после 10 дней анализировалось количество выживших бактериальных клеток, а также увеличение концентрации железа в степени окисления 3⁺, указывающей на активный метаболизм микроорганизмов (рис. 1).

По результатам селекции, было отобрано три основных адаптированных штамма, из которых наибольшую активность продемонстрировал штамм 3 (рис. 2).



Рис. 1. Селекция адаптированного штамма A.ferrooxidans к химическому составу медного минерального сырья



Рис. 2. Селекция и адаптация штаммов A.ferrooxidans к медному минеральному сырью:

A – наращивание штаммов A.ferrooxidans в пульпе медного минерального сырья; Б – увеличение концентрации Fe³⁺ при окислении пульпы бактериальными штаммами *1, 2, 3; 4* – только кислород (O₂) воздуха

Элемент	Малахит	Конгломерат	Алевролит	Песчаник	Смешанная проба, фактическое	Смешанная проба, теоретическое
0	53,64	50,979	54,209	52,471	50,339	52,777
Na	1,119	1,318	1,802	1,079	1,567	1,4419
Mg	1,246	0,642	1,368	1,331	1,103	1,13485
Al	5,806	3,485	6,789	6,975	4,867	5,79515
Si	22,022	27,846	27,843	25,795	25,708	27,041
Р	0,054	0,048	0,062	0,068	0,053	0,0589
S	0,269	0,031	0,116	0,026	0,479	0,07565
Cl	0,012	0,015	0,013	0,015	0,026	0,01405
К	1,147	0,579	1,199	1,662	0,834	1,126
Ca	5,953	5,162	0,855	2,12	3,044	2,718
Ti	0,435	0,239	0,476	0,522	0,312	0,414
V	0,006	0,006	0,007	0,01	0	0,0074
Mn	0,178	0,132	0,066	0,163	0,123	0,116
Fe	2,921	1,38	2,676	3,797	2,289	2,579
Cu	0,448	0,103	0,178	0,028	0,15	0,1315
Zn	0,014	0,007	0,013	0,015	0,024	0,0117
Rb	0,009	0,003	0,007	0,012	0,005	0,00715
Sr	0,011	0,007	0,007	0,014	0,01	0,00895
Zr	0,01	0,006	0,011	0,013	0,01	0,00995
Pb	0,006	0	0	0,016	0,01	0,0043

1. Элементный состав образцов проб отвала и смешанной пробы образцов с заданными массовыми соотношениями, %

Таким образом, для дальнейшего эксперимента по бактериальному окислению медной руды был выбран адаптированный штамм 3 A.ferrooxidans. В большинстве случаев химический состав медных руд оказывается в некоторой степени губительным для бактериальных клеток. В частности, негативно сказываются на росте и метаболизме бактерий ионы меди Cu²⁺ и ряд соединений мышьяка, получаемых также при разложении арсенопирита.

Проведение экспериментов по перколяционному выщелачиванию предполагает лабораторную имитацию кучного выщелачивания. С этой целью с отвала месторождения г. Сатпаев был произведён дополнительный отбор проб минерального сырья. Всего было отобрано 4 варианта технологических проб, представляющих различные составные фрагменты отвала: 1) порода со значительными включениями малахита; 2) проба, представленная в основном конгломератом; 3) проба, представленная алевролитом; 4) проба песчаника, сосредоточенная по большей части у основания отвала.

Перед началом перколяционного метода были подобраны базовые параметры процесса выщелачивания: концентрация серной кислоты в выщелачивающем растворе – 2,5 %, плотность орошения – 10 л/м² в час. Также перед основным орошением серной кислотой производилось влагонасыщение пробы и расчёт влагоёмкости. Объём перколятора – 30 л, масса выщелачиваемого материала – 20 кг и крупность – 25–30 мм.

В целях равномерного распределения и впитывания раствора на поверхность пробы кладётся фильтрткань или фильтровальная бумага с диаметром, соответствующим диаметру колонны. Подача раствора в колонну может осуществляться перистальтическим насосом либо другой системой капельной подачи. Шланг подачи раствора фиксируется по центру фильтровальной бумаги или фильтр-ткани. Интенсивность подачи и необходимый объём раствора устанавливаются в зависимости от заданной плотности орошения. Для дальнейших расчётов необходимо знать площадь орошения в колонне. Площадь орошения вычисляется по формуле: $S = \pi R^2$. Вычислив площадь орошаемой поверхности и зная заданную плотность орошения л/м² в час, рассчитываем объём.

Название компонента	Формула	Содержание, %		
Кварц (syn)	SiO2	73,9		
Альбит	NaAl _{0,91} Si ₃ O ₈	10,2		
Малахит (syn)	Cu ₂ (OH) ₂ CO ₃	9,1		
Клинохлор-1MIIb, (ferroan)	(Mg, Fe) ₆ (Si, Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₈	4,0		
Мусковит	$H_4K_2(Al, Fe)_6Si_6O_{24}$	2,7		

2. Результаты фазового состава отвала

Загрузка проб рудного материала отвала в перколяторы осуществлялась в следующих массовых соотношениях (в%): малахит – 5, конгломерат – 30, алевролит - 40, песчаник - 25. Все породы перед загрузкой предварительно перемащивались и усреднялись, за исключением песчаника: 10% загружались на дно перколятора в качестве имитации основания отвала, остальные 15% равномерно перемешивались с остальной рудной массой. Пробы каждого образца породы по отдельности и смешанная рудная масса для загрузки предварительно подвергалась рентгенофлуоресцентному анализу. По результатам анализов, представленных в таблице 1, были получены составы каждого отдельного образца и смешанной усреднённой пробы, проведены расчёты теоретического состава смешанной пробы в зависимости от массовых соотношений образцов.

После определения элементного состава в пробах медного отвала рентгенофазовым анализом определялись основные фазовые компоненты, представленные различными минеральными включениями. Анализ проводился на дифрактометре D8 Advance (BRUKER), излучение Cu-Ka. Результаты рентгенофазового анализа представлены в таблице 2.

По данным рентгенофазового анализа установлено, что основная масса породообразующего материала представлена кварцем. В заметных количествах присутствуют также альбит, малахит, клинохлор и мусковит.

Детальный минералогический анализ пробы позволил обнаружить присутствие в образце сульфидных соединений, таких как пирит, халькозин, а также фрагменты самородной меди. Образцы пробы изучались минералогическим методом в отражённом свете с использованием микроскопа OLIMPUS-BX 51. Вся основная масса нерудная, имеет относительно большие размеры по сравнению с рудным материалом. В образце из сульфидных соединений встречается пирит и халькозин (рис. 3). В итоге смешанная руда медного отвала была загружена в три перколятора для отработки трёх вариантов перколяционного выщелачивания (рис. 4): 1) стандартное сернокислотное выщелачивание без дополнительного окисления; 2) выщелачивание с предварительным бактериальным окислением; 3) выщелачивание с предварительным химическим окислением.

Окисление минерального сырья производилось на стадии влагонасыщения: так, в перколятор с вариантом бактериального окисления был залит раствор с культурой A.ferrooxidans в питательной среде, адаптированный к соединениям меди, в перколяторе с химическим окислением использовался 0,5% раствор трихлоризоциануровой кислоты. Главным действующим веществом в ТХЦК является хлор, составляющий более 90% от общего удельного веса готового продукта. При использовании в качестве выщелачивающего или окисляющего агента он способствует переводу меди в продуктивный раствор.



Рис. 3. Фотографии минералогического анализа пробы:

А – обзорный снимок пробы. Увеличение ×40; Б – пирит в прожилках нерудной массы; В – халькозин в сростке нерудного минерала. Увеличение ×200



Рис. 4. Загруженные перколяторы для трёх вариантов выщелачивания

В перколятор с вариантом без предварительного окисления в качестве влагонасыщения был залит слабый 0,5% раствор серной кислоты.

Влагонасыщение во всех трёх вариантах составило 10%. После влагонасыщения и окислительной обработки был запущен процесс выщелачивания. Подача раствора серной кислоты с концентрацией 25 г/л осуществлялась перистальтическими насосами, в соответствии с заданной базовой плотностью орошения – 10 л/м² в час. Объёмы оборотных растворов составляли 2 л. После прохождения через рудный материал в перколяторе производился замер объёмов получаемых продуктивных растворов, анализировалось остаточное содержание серной кислоты и концентрация ионов меди. Продуктивные растворы доукреплялись до концентрации серной кислоты 25 г/л и доводились до объёма 2 л, после чего использовались в новом оборотном цикле выщелачивания.

Первое экстракционное извлечение меди из продуктивных растворов было произведено после 15 дней выщелачивания. К тому моменту в растворах были накоплены достаточно высокие концентрации меди (> 3 г/л), что замедляло дальнейшее извлечение меди в раствор. После экстракции выщелачивание продолжалось рафинатом, полученным в процессе извлечения меди органикой из продуктивного раствора. Последующая экстракция была произведена на завершающем этапе перколяционного выщелачивания после 30 дней выщелачивания. Результаты перколяционного выщелачивания и динамика извлечения меди в продуктивный раствор, простым и окислительными методами выщелачивания приведены в таблице 3 и на рисунке 5.

Из данных таблицы и графика видно, что на начальном этапе выщелачивания, первые 5 дней, извлечение меди находится примерно на одинаковом уровне. Затем в течение нескольких дней наблюдалось увеличение извлекаемой меди в раствор в перколяторе с химическим окислением. Применение катализирующей бактериальной культуры A.ferrooxidans ускоряет окислительные процессы и повышает степень извлечения меди в среднем на 8–10%. В то время в перколяторе с бактериальным окислением на поверхности фрагментов руды фиксировалось образование налёта, характерного для продуктов жизнедеятельности железоокисляющих бактерий. Это также свидетельствовало об образовании

M	Продолжительность, дней						
метод выщелачивания	5	10	15	20	25	30	
Без окисления, только $\rm H_2SO_4$ 25 г/л	13,35	22,83	36,33	50,92	58,08	62,17	
A.ferrooxidans + $H_2SO_4 25 \Gamma/\pi$	13,84	32,78	37,41	68,17	72,17	76,08	
ТХЦК + H ₂ SO ₄ 25 г/л	14,0	25,56	24,15	40,67	46,75	52,83	

3. Извлечение меди разными методами выщелачивания, %



Рис. 5. Динамика извлечения меди в раствор:

1 — без окисления, только H₂SO₄ 25 г/л; 2 — A.ferrooxidans + + H₂SO₄ 25 г/л; 3 — ТХЦК + H₂SO₄ 25 г/л

на рудных частицах бактериальных колоний адаптированного штамма A.ferrooxidans, которые продолжали оказывать окисляющее воздействие на минералы даже в процессе сернокислотного выщелачивания.

По достижению в растворах концентраций меди в диапазоне 3–4 г/л интенсивность извлечения в оборотные продуктивные растворы временно начала снижаться. Для восстановления динамики извлечения меди в раствор была поставлена серия экспериментов по экстракции и реэкстракции, что позволило осуществить перенос органической фазой части



Рис. 6. Процессы экстракции и реэкстракции, отстаивание и разделение в воронках:

 А – разделение водной и органической фаз в делительных воронках: 1 – экстракция, 2 – реэкстракция; Б – изменение цвета продуктивного раствора растворённой меди из продуктивных растворов в электролиты. Экстракция производилась селективным на медь экстрагентом Lix 984, растворённым в соотношении 10 % в органическом растворителе Escaid. Соотношение водной и органической фаз на стадии экстракции составляло B:O = 1:1, на стадии реэкстракции B:O = 3:5. Разделение и отстаивание фаз осуществлялось в делительных воронках (рис. 6).

Концентрация меди в полученных при реэкстракции электролитах соответствовала требуемым параметрам (не менее 30 г/л и не более 60 г/л), все полученные электролиты использовались для следующей технологической стадии – электроосаждения меди в электролизной ванне. Сила тока составляла 2,5 А. Для осаждения использовался медный катод с изначальной массой 94,2 г, в качестве анодов служили нерастворимые свинцовые пластинки. Установка для проведения электролиза представлена на рисунке 7.



Рис. 7. Установка для проведения эксперимента по электролизу

 $A = 0,329 \text{ мг/A} \times \text{сек.} - электрохимический экви$ валент меди. Процесс электролиза длился 11 часов.Теоретический выход металла при электролизе расчитывается по формуле:

 $G = A \times I \times t$,

где G – количество выделенного вещества, I – сила электрического тока, A, t – время, сек.

 $G = 0,329 \text{ Mr/A} \text{ cek} \times 2,5 \text{ A} \times 11 \times 60 \times 60 =$ = 32571 Mr = 32,571

По завершению процесса электролиза масса катода составила 125 г (рис. 8).



Рис. 8. Увеличение массы медного катода при электролизе с 94,2 до 125 г

Таким образом, на катоде было получено 30,8 г меди. Извлечение меди по току при этом составляет: $E_{Cu} = G_{npakr.} / G_{reop.} \times 100\% = 30,8 / 32,571 \times 100\% = 94,6\%.$ Ввыводы. Эксперименты по перколяционному выщелачиванию меди показали высокую эффективность при применении предварительного бактериального окисления, в качестве биоокислителя исполь-

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Абубакриев А. Т., Магад Е., Игнатьев М. М., Койжанова А. К., Есимова Д. М. Отработка оптимальных параметров и режимов выщелачивания медьсодержащих руд Байского месторождения // Ресурсосберегающие технологии в обогащении руд и металлургии цветных металлов: материалы Международной конференции, Алматы, 14–17 сентября 2015 г. – Астана : TOO «Арко», 2015. – С. 172–175.
- Бакаева М. Д., Столярова Е. А., Логинов О. Н. Извлечение металлов из отвалов Медногорского медносерного комбината с помощью биотехнологии // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2009. – № 10. – С. 533–535.
- Бейсембаев Б. Б., Кенжалиев Б. К. Теория и практика использования методов геотехнологии для переработки забалансовых и некондиционных медных руд // Комплексное использование минерального сырья. – 1999. – № 4. – С. 93–98.
- Водолазов Л. И., Дробаденко В. П., Лобанов Д. П., Малухин Н. Г. Геотехнология. Кучное выщелачивание бедного минерального сырья. – М.: МГГА, 2000. – 300 с.
- 5. Гиганов Г. П., Яринова. Т. И. Использование экстракции в гидрометаллургии меди за рубежом // Цветная металлургия. – 1998. – № 6. – С. 45–47.
- 6. Заявка 5207996 США, МКИ С01G 3/00. Кислотное кучное выщелачивание медных руд с добавкой фто-

зовалась адаптированная культура A.ferrooxidans. В качестве альтернативного химического окислителя был рассмотрен вариант применения трихлоризоциануровой кислоты (ТХЦК), в качестве биоокислителя также использовалась адаптированная культура A.ferrooxidans. Стандартное сернокислотное выщелачивание служило в качестве контрольного варианта. В результате применения химического метода окисления с использованием ТХЦК рост извлечения меди в раствор по сравнению с другими вариантами наблюдался только в течение первых 10 дней. В результате за 30 дней выщелачивания показатель извлечения составил 52,83%. За аналогичный период стандартным сернокислотным выщелачиванием было извлечено 62,17% меди. Наибольшая результативность наблюдалась в варианте предварительного бактериального окисления, за 30 дней выщелачивания в продуктивный раствор было извлечено 76,08% меди. На стадии электролиза из наработанных растворов электролитов было осаждено на катоде 30,8 г меди, что даёт извлечение по току, равное 94,6%.

Министерство образования и Науки Республики Казахстан оказало финансовую поддержку данной работе в рамках грантового финансирования AP09258789.

ралифатических поверхностноактивных веществ / заявитель Minnesota Mining and Manufacturing Comрапу. – заявл. 10.10.91; опубл. 15.01.95.

- Игнатьев М. М. Разработка экстракционной технологии получения меди из растворов выщелачивания руд месторождения Актогай: диссертация на соискание учебной степени канд. техн. наук. – Алма-Ата, 1989. – 173 с.
- Патент на изобретение КZ № 32300. Способ извлечения меди из техногенных продуктов / З. С. Абишева, М. М. Игнатьев, А. Куанбай, А. К. Койжанова, Г. А. Арыстанова, Д. Р. Магомедов. – заявл. 09.02.2016; опубл. 15.08.2017. – бюл. 15.
- 9. Санакулов К. С. Перспективы переработки окисленных медных руд месторождения Кальмакыр // Горный вестник Узбекистана. – 2009. – № 3. – С. 47–49.
- Халезов Б. Д. Исследования и разработка технологии кучного выщелачивания медных и медно-цинковых руд: Специальность 05.16.02 «Металлургия черных, цветных и редких металлов»: диссертация на соискание учебной степени докт. техн. наук. – Екатеринбург : ГУ «Институт металлургии Уральского отделения РАН», 2008. – 548 с.
- Gentina J. C., Acevedo F. Application of bioleaching to copper mining in Chile // Electronic Journal of Biotechnology. – 2013. – V. 16, № 3. DOI: 10.2225/voL16issue3-fuLLtext-12.
- Hayes A. Top of the heap // Mining Magazine. June 2011. P. 62–68.

- Koizhanova A. K., Magomedov D. R., Tastanov E. A., Kenzhaliyev B. K., Sedelnikova G. V., Berkinbayeva A. N. Intensification of copper leaching from heaps using biological oxidation // Metalurgija. – 2022. – V. 61, № 3–4. – P. 789–792.
- Lin M., Yang B., Lin H., Liu S., Wang J. Catalytic Effects of Red Mud and Acidithiobacillus ferrooxidans on Biodissolution of Pyrite // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2021. – V. 768 (1). – 012019.
- Lyu X., Zhao H., Zhang Y., Yan Z., Zhao Y., Zheng H., Liu W., Xie J., Qiu G. Active destruction of pyrite passivation by ozone oxidation of a biotic leaching system // Chemosphere. –2021. – V. 277. – 130335.
- Magomedov D. R., Magad E., Ignatiev M. M., Koizhanova A. K., Zhanabay Zh. Extraction of copper and precious metals from waste copper dumps of the Sayak deposit // Complex Use of Mineral Resources. – 2016. – № 4. – P. 30–34.
- Mukhanova A., Tussupbayev N., Turysbekov D., Yessengaziyev A. Improvement of the selection technology of coppermolybdenum concentrate with the use of modified flotoragents // Metalurgija. – 2022. – V. 61, № 1. – P. 221–224.

REFERENCES

- Abubakriyev A. T., Magad Ye., Ignat'yev M. M., Koyzhanova A. K., Yesimova D. M. Otrabotka optimal'nykh parametrov i rezhimov vyshchelachivaniya med'soderzhashchikh rud Bayskogo mestorozhdeniya [Development of optimal parameters and modes of leaching of copper-bearing ores of the Baiskoye deposit]. Resursosberegayushchiye tekhnologii v obogashchenii rud i metallurgii tsvetnykh metallov: materialy Mezhdunarodnoy konferentsii, Arko publ., 2015, pp. 172–175. (In Russ.)
- Bakayeva M. D., Stolyarova Ye. A., Loginov O. N. Izvlecheniye metallov iz otvalov Mednogorskogo mednosernogo kombinata s pomoshch'yu biotekhnologii [Extraction of metals from the dumps of the Mednogorsk copper-sulfur plant using biotechnology]. Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta [Bulletin of the Orenburg State University], 2009, No. 10, pp. 533– 535. (In Russ.)
- Beysembayev B. B., Kenzhaliyev B. K. Teoriya i praktika ispol'zovaniya metodov geotekhnologii dlya pererabotki zabalansovykh i nekonditsionnykh mednykh rud [Theory and practice of using geotechnology methods for processing out-of-balance and sub-standard copper ores]. Kompleksnoye ispol'zovaniye mineral'nogo syr'ya [Complex use of mineral raw materials], 1999, No. 4, pp. 93– 98. (In Russ.)
- Vodolazov L. I., Drobadenko V. P., Lobanov D. P., Malukhin N. G. Geotekhnologiya. Kuchnoye vyshchelachivaniye bednogo mineral'nogo syr'ya [Geotechnology. Heap leaching of poor minerals]. Moscow, MGGA publ., 2000, 300 p. (In Russ.)
- 5. *Giganov* G. P., *Yarinova. T. I.* Ispol'zovaniye ekstraktsii v gidrometallurgii medi za rubezhom [The use of ex-

- Santaolalla A., Gutierrez J., Gallastegui G., Barona A., Rojo N. Immobilization of Acidithiobacillus ferrooxidans in bacterial cellulose for a more sustainable bioleaching process // Journal of Environmental Chemical Engineering. – 2021. – V. 9, № 4. – 105283.
- Song C.-I., Jo C.-M., Ri H.-G. Immobilization of Acidithiobacillus ferrooxidans-1333 on the waste ore particles for the continuous oxidation of ferrous iron // Iranian Journal of Biotechnology. – 2020. – V. 18 (3). – P. 55–61.
- Yin S., Wang L., Chen X., Yan R., Wu A., Kabwe E., An K., Zhang L. Copper Bioleaching in China: Review and Prospect // Minerals. – 2018. – V. 8, № 2. – P. 32.
- Zhou Z., Ma W., Liu Y., Ge S., Hu S., Zhang R., Ma Y., Du K., Syed A., Chen P. Potential application of a knowledgebase of iron metabolism of Acidithiobacillus ferrooxidans as an alternative platform // Electronic Journal of Biotechnology. – 2021. – 52. – P. 45–51.
- Dresher W. H. Producing Copper Nature's Way: Bioleaching. Innovations [Электронный ресурс]. – URL: https://www.copper.org/publications/newsletters/ innovations/2004/05/producing_copper_natures_way_ bioleaching.html (дата обращения 17.11.2022)

traction in copper hydrometallurgy abroad]. Tsvetnaya metallurgiya [Non-ferrous metallurgy], 1998, No. 6, pp. 45–47. (In Russ.)

- Zayavka 5207996 SSHA, MKI C01G 3/00. Kislotnoye kuchnoye vyshchelachivaniye mednykh rud s dobavkoy ftoralifaticheskikh poverkhnostnoaktivnykh veshchestv [Application 5207996 USA, MKI C01G 3/00. Acid heap leaching of copper ores with the addition of fluoroaliphatic surfactants]. Zayavitel' [Applicant] Minnesota Mining and Manufacturing Company, zayavl. 10.10.91; opubl. 15.01.95.
- Ignat'yev M. M. Razrabotka ekstraktsionnoy tekhnologii polucheniya medi iz rastvorov vyshchelachivaniya rud mestorozhdeniya Aktogay [Development of extraction technology for obtaining copper from leaching solutions of ores from the Aktogay deposit], dissertatsiya na soiskaniye uchebnoy stepeni kand. tekhn. Nauk [dissertation for the degree of Cand. tech. Sciences]. Alma-Ata, 1989, 173 p. (In Russ.)
- Patent na izobreteniye KZ No. 32300. Sposob izvlecheniya medi iz tekhnogennykh produktov [Patent for invention KZ No. 32300. Method for extracting copper from technogenic products]. Abisheva Z. S., Ignat'yev M. M., Kuanbay A., Koyzhanova A. K., Arystanova G. A., Magomedov D. R., zayavl. 09.02.2016, opubl. 15.08.2017, bulletin 15.
- Sanakulov K. S. Perspektivy pererabotki okislennykh mednykh rud mestorozhdeniya Kal'makyr [Prospects for processing oxidized copper ores at the Kalmakyr deposit]. Gornyy vestnik Uzbekistana, 2009, No. 3, pp. 47–49. (In Russ.)
- Khalezov B. D. Issledovaniya i razrabotka tekhnologii kuchnogo vyshchelachivaniya mednykh i medno-tsinkovykh rud [Research and development of technology for heap leaching of copper and copper-zinc ores].

Yekaterinburg, "Institut metallurgii Ural'skogo otdeleniya RAN" publ., 2008, 548 p. (In Russ.)

- Gentina J. C., Acevedo F. Application of bioleaching to copper mining in Chile. Electronic Journal of Biotechnology, 2013, V. 16, No. 3. DOI: 10.2225/voL16-issue3fuLLtext-12.
- Hayes A. Top of the heap. Mining Magazine, June 2011, pp. 62–68.
- Koizhanova A. K., Magomedov D. R., Tastanov E. A., Kenzhaliyev B. K., Sedelnikova G. V., Berkinbayeva A. N. Intensification of copper leaching from heaps using biological oxidation. Metalurgija, 2022, V. 61, No. 3–4, pp. 789–792.
- Lin M., Yang B., Lin H., Liu S., Wang J. Catalytic Effects of Red Mud and Acidithiobacillus ferrooxidans on Biodissolution of Pyrite. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, V. 768 (1), 012019.
- Lyu X., Zhao H., Zhang Y., Yan Z., Zhao Y., Zheng H., Liu W., Xie J., Qiu G. Active destruction of pyrite passivation by ozone oxidation of a biotic leaching system. Chemosphere, 2021, V. 277, 130335.
- Magomedov D. R., Magad E., Ignatiev M. M., Koizhanova A. K., Zhanabay Zh. Extraction of copper and precious metals from waste copper dumps of the Sayak deposit. Complex Use of Mineral Resources, 2016, No. 4, pp. 30–34.

- Mukhanova A., Tussupbayev N., Turysbekov D., Yessengaziyev A. Improvement of the selection technology of copper-molybdenum concentrate with the use of modified flotoragents. Metalurgija, 2022, V. 61, No. 1, pp. 221–224.
- Santaolalla A., Gutierrez J., Gallastegui G., Barona A., Rojo N. Immobilization of Acidithiobacillus ferrooxidans in bacterial cellulose for a more sustainable bioleaching process. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2021, V. 9 No. 4, 105283.
- Song C.-I., Jo C.-M., Ri H.-G. Immobilization of Acidithiobacillus ferrooxidans-1333 on the waste ore particles for the continuous oxidation of ferrous iron. Iranian Journal of Biotechnology, 2020, V. 18 (3), pp. 55–61.
- 20. Yin S., Wang L., Chen X., Yan R., Wu A., Kabwe E., An K., Zhang L. Copper Bioleaching in China: Review and Prospect. Minerals, 2018, V 8, No. 2, pp. 32.
- Zhou Z., Ma W., Liu Y., Ge S., Hu S., Zhang R., Ma Y., Du K., Syed A., Chen P. Potential application of a knowledgebase of iron metabolism of Acidithiobacillus ferrooxidans as an alternative platform. Electronic Journal of Biotechnology, 2021, 52, pp. 45–51.
- 22. *Dresher* W. H. Producing Copper Nature's Way: Bioleaching. Innovations available at: https://www.copper.org/ publications/newsletters/innovations/2004/05/produ-cing_ copper_natures_way_bioleaching.html (17.11.2022)

Статья поступила в редакцию 20.07.22; одобрена после рецензирования 20.10.22; принята к публикации 21.10.22. The article was submitted 20.07.22; approved after reviewing 20.10.22; accepted for publication 21.10.22.

DOI:10.47765/0869-7175-2022-10037

УДК 669.21/23 © Коллектив авторов, 2022

Исследования обогатимости золотосодержащей руды

В работе приведены результаты исследований по обогащению и повышению извлечения золота в цикле флотации руды Васильковского месторождения.

Изучен вещественный состав исходной руды. По результатам минералогического рентгенофлуоресцентного, химического пробирного, атомно-абсорбционного, рентгенофазового, рационального анализов, золото обнаружено свободное, тонкодисперсное, связанное с сульфидами в халькопирите, пирите и арсенопирите, а также в тонковкрапленном состоянии в силикатных минералах. Установлено, что технологический тип исследуемой руды – золотокварцевый, золотосульфидный со свободным и цианируемым золотом.

Представлены результаты оптимизации реагентного режима флотации руды и класса крупности измельчения. В качестве собирателя использовали бутиловый ксантогенат, в качестве вспенивателя применяли С7, аэрофлот; сульфидизатор – сульфид натрия (Na,S), так же дополнительно применён режим диспергации. Выяснено, что для повышения эффективности флотационного обогащения целесообразно увеличение показателя рН исходной пульпы до рН 9,0. Извлечения в концентрат золота – 82,49 %. Данным экспериментом и минералогическим анализом хвостов флотации были установлены оптимальная крупность флотируемого сырья, класс крупности -0,1+0,071 и -0,071 мм и нецелесообразность дополнительного измельчения из-за увеличения доли свободного золота, не преходящего в концентрат при последующей флотации. Минеральный анализ продуктов флотации показал, что основной сульфидный минерал концентратов – арсенопирит; обнаружены также пирит и халькопирит. В хвостах флотации содержится рудовмещающая жильная пустая порода; золото, обнаруженное в пробах хвостов флотации, имеет круглую и овальную форму, не эффективную для флотации.

Ключевые слова: флотация, сульфиды, тонковкрапленное золото, диспергация.

ТОКТАР ГУЛЬМИРА. PhD. научный сотрудник¹. Gulmiratoktar0@gmail.com

КАУМЕТОВА ДИНАРА СУЮНДИКОВНА, лектор кафедры «Горное дело, строительство и экология»², kaumetovadinara@mail.ru

КОЙЖАНОВА АЙГУЛЬ КАЙРГЕЛЬДЫЕВНА, кандидат технических наук, заведующий лабораторией спецметодов гидрометаллургии¹, a.koizhanova@satbayev.university, aigul_koizhan@mail.ru

МАГОМЕДОВ ДАВИД РАСИМОВИЧ, магистр, младший научный сотрудник¹, d.magomedov@stud.satbayev.university

АТАНОВА ОЛЬГА ВЯЧЕСЛАВОВНА, кандидат технических наук¹

АБДЫЛДАЕВ НУРГАЛИ НУРЛАНОВИЧ, бакалавр, ведущий инженер¹, nur.ab.kz@mail.ru; n.abdyldaev@satbayev.university

¹ Казахский национальный технический университет имени Сатбаева, АО «Институт металлургии и обогащения», г. Алматы, Казахстан

² Некоммерческое акционерное общество «Кокшетауский университет им. Ш. Уалиханова», г. Кокшетау, Казахстан.

Study of gold-bearing ore bonification ability

TOKTAR G.¹, KAUMETOVA D. S.², KOIZHANOVA A. K.¹, MAGOMEDOV D. R.¹, ATANOVA O. V.¹, ABDYLDAYEV N. N.¹

¹ Satbayev University, The Institute of Metallurgy and Ore Beneficiation, Almaty, Kazakhstan

² Non-commercial joint stock company Ualikhanov Kokshetau University, Kokshetau, Kazakhstan.

The paper presents the study results on the gold benification and increase of gold extraction in the flotation cycle of ore from the Vasilkovsky deposit.

The composition of the initial ores was studied. Based on mineralogical, XRF, chemical assay, atomic absorption, X-ray phase and rational analyses the following types of gold were identified: fine gold; gold associated with sulfides in chalcopyrite, pyrite and arsenopyrite; and fine-disseminated gold in silicates. It was established that the ore belongs to the gold-quartz and gold-sulfide types with free and cyanided gold.

Our results allow us to optimize the ore flotation reagent mode and the crushing size class. Butyl xanthate was used as a collector; C7, aeroflot, was used as a foaming agent; sodium sulfide (Na,S) was used as a sulfidizer; dispersion mode was additionally applied. It was established that an increased pH value of the initial pulp up to 9.0 is required to boost the efficiency of flotation beneficiation. The gold extraction in the concentrate is 82,49 %. This experiment and mineralogical analysis of flotation tailings has established the optimal fineness of the fractions for flotation (0,1 +- 0,071 mm) as well as the inexpediency of additional milling, due to the fine free and quartz-embedded gold that does not pass into the concentrate during the subsequent flotation. The mineral analysis of the flotation products showed that the main sulfide mineral of the concentrates is arsenopyrite; pyrite and chalcopyrite. Flotation tailings contain host vein rock. Gold found in flotation tailings samples has round and oval shape, which is inefficient for flotation.

Key words: Flotation, sulfides, fine-disseminated gold, dispersion.

Введение. Для полноты комплексного использования сырья при разработке технологии извлечения целевого металла необходима информация о минеральном составе исходного сырья с диагностикой всех минеральных фаз, в том числе формы нахождения в исследуемом продукте полезного компонента (собственная минеральная фаза, изоморфное срастание в структуру минерала), количественной оценкой их содержания. Флотация золотосодержащих руд имеет ряд трудностей, связанных, в частности, с высокой плотностью самородного или свободного золота и его низкой концентрацией в руде, тонковкрапленной формой образования в сульфидах и кварцевой породе. Разработка эффективной технологии по повышению извлечения золота в цикле флотационного обогащения увеличивает рентабельность производства, комплексность использования сырья и способствует вовлечению в эксплуатацию месторождений золотых сульфидных, тонковкрапленных, бедных и комплексных руд.

Несмотря на значительные исследования по повышению эффективности извлечения золота, флотационное извлечение тонкодисперсного золота, ассоциированного с сульфидами и кварцем, не превышает 60–80%, а в ряде случаев 30–40%. Таким образом, исследования по повышению извлечения благородных металлов из минерального сырья являются актуальными задачами.

Среди важных технологических и эксплуатационных параметров флотационного цикла подготовки руды можно выделить: минералогию руды, крупность исходного материала, конструкционные решения машин флотации, режим скорости подачи исходного материала, плотность и температуру пульпы [1, 11–13].

Экспериментальные методы и результаты. Объектом исследований являлась золотосодержащая руда Васильковского месторождения ЗИФ АО «Altyntau Kokshetau» стадии крупного, среднего и тонкого дробления. Технологическая проба характеризуется золотосульфидно-кварцевой формацией вкрапленного типа. Рудная минерализация – пирит.

Для исследования проводилась стандартная пробоподготовка образцов, а именно: исходная проба руды была подвергнута дроблению, измельчению и усреднению (рис. 1). Форма нахождения золота в анализируемой пробе зависит от крупности помола и исходного класса крупности руды. Данная методика отбора позволяет определять содержание золота во всех продуктах по нескольким параллельным пробам, что повышает достоверность результатов. Фазовый анализ проводили последовательно в трёх фазах.

Для определения химического, фазового, минералогического составов руды использовались следующие методы анализов: атомно-абсорбционный и пробирно-гравиметрический. Анализы выполнялись на приборах: атомно-абсорбционный спектрометр «Varian» AA240 индуктивно-связанной плазмой «Varian Optica ISpectroscopy Instruments», рентгеновский дифрактометр Advance D8 «Bruker», рентгенофлуоресцентный волнодисперсионный спектрометр Venus 200 Axios PANalyical B.V., электронный растровый микроскоп с анализатором JEOL JXA-8230, оптический микроскоп Axio Scope.A1.



Рис. 1. Руда Васильковского ГОК в процессе рудоподготовки:

А – исходная руда; Б – после первого дробления на щековой дробилке; В – после второго дробления на щековой дробилке; Г – после измельчения на валковой дробилке до класса -2,5 мм

Для проведения исследований отобраны частные пробы из дроблённой и измельчённой на вибрационном истирателе ИВ 1 до крупности 98% класса -0,071 мм руды.

Химический анализ показал следующие содержания основных компонентов: золото – 2,17 г/т, железо – 3,4%, мышьяк – 0,9%, сера – 0,696%. При этом, согласно данным паспорта пробы руды, содержание золота составляет 2,1 г/т, серы – 0,67%, железа – 2,52%. Содержание железа варьировалось в пределах 2,52–3,4%.

Далее изучен элементный и фазовый состав с помощью рентгенофлуоресцентного и рентгенофазового методов анализа. Результаты приведены в таблицах 1, 2.

Изучение вещественного состава руды осуществлялось методами минералогического анализа с применением оптической микроскопии и рентгенографии. Расшифровка проб и поиск фаз выполнялись по программе Search-match с использованием базы порошковых дифрактометрических данных PDF-2. Для минералогического исследования был изготовлен аншлиф из руды. Образец руды непрозрачен, и исследование проводилось на оптическом микроскопе в отражённом свете. Для нахождения форм золота был выполнен рациональный анализ исходной пробы руды крупностью -2,0 мм, пробы крупности 98% класса -0,071 мм руды и измельченной руды крупностью класса -0,05 мм и +0,05 мм.

Исследования по флотации выполнены на лабораторных флотомашинах, в открытом цикле. Флотацию проводили для руды крупности 90% класса -0,071 мм, и так же исследовалась руда, доизмельчённая в шаровой мельнице до класса +0,05 мм и -0,05 мм. Пульпа каждого класса крупности в последующем подвергалась флотационному обогащению при реагентном режиме 120 г/т ксантогената натрия, 60 г/т вспенивателя. Исследуемую руду распульповывают водой в режиме в соотношении Т:Ж = 1:3 (плотность пульпы 33%), доводят до необходимого значения рН, добавляя щёлочь NaOH. Во флотомашине, лабораторной с флотационной камерой, происходит стабильная генерация мелких пузырьков и интенсивное перемешивание воздуха с пульпой. Дисперсная подача воздуха осуществляется через керамические диспергаторы, встроенные по бокам флотокамеры. Это обеспечивает быструю и эффективную флотацию. Во время активации добавляются реагенты и снимается пенная фракция. Флотацию проводили в два цикла – основной и контрольный – в течении 10 и 7 минут соответственно. Концентраты объединяли для исследования, так же был проведён опыт с доочисткой концентрата, с ксентогинатом натрия и С7 при рН 9. Продукты флотации, концентрат и хвосты анализировали на вещественный и химический состав.

1. Результаты рентгено-флуоресцентного анализа пробы руды

Элемент	Содержание, %
0	47,51
Na	1,192
Mg	1,394
Al	6,334
Si	23,871
Р	0,061
S	0,236
Cl	0,015
К	1,608
Ca	2,552
Ti	0,261
Mn	0,033
Fe	2,62
Cu	0,02
Zn	0,01
Ga	0,002
As	0,783
Rb	0,013
Sr	0,015
Zr	0,007

2. Результаты рентгенофазового анализа руды

Компонент	Формула			
Кварц	SiO_2			
Альбит (кальциевый)	(Na,Ca)Al(Si,Al) ₃ O ₈			
Микроклин	$K_{0,92}Na_{0,08}Al_{0,99}Si_{3,01}O_8$			
Мусковит-2МІ	KAl ₂ (Si,Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₂			
Эденит	NaCa ₂ Mg ₅ AlSi ₇ O ₂₂ (OH) ₂			
Клинохлор-1MIIb	$(Mg,Fe)_6(Si,Al)_4O_{10}(OH)_8$			
Пирит	FeS ₂			
Арсенорипит	FeAsS			
Ильменит	FeO·TiO ₂			
Магнетит	FeO·Fe ₂ O ₃			

Обсуждение результатов. Вещественный состав сырья определяет методы и технологию получения целевого металла. Исследование элементного состава и минералов, непосредственных носителей золота, количество и равномерность их распределения указывает на возможность применения определённых методов обогащения.

Выполнение данной работы включало:

• определение основных причин потерь в процессе коллективной флотации ценного компонента – золота;

• проведение исследований по повышению извлечения золота в цикле флотации.

Качество руд определяется их минералогическим и химическим составом, физико-химическими свойствами, текстурно-структурными особенностями руд и размерами минеральных агрегатов. Химический и минералогический анализы позволяют получить полное представление о вещественном составе руд, наличии в их составе ценных и вредных компонентов. В пробе руды, по результатам рентгено-флуоресцентного анализа, преимущественно содержатся (в%): кислород – 47,51, кремний – 23,871, железо – 2,62, сера – 0,670 и мышьяк – 0,783 (см. табл. 1). Можно предположить, что руда преимущественно состоит из кварца, оксидов железа и сульфидных соединений, что подтверждается фазовым и минералогическим анализами, и относится к технологическому типу золотокварцевый, золотосульфидный со свободным и цианируемым золотом. Наличие тонковкрапленного золота в сульфидах является одной из основных причин технологической упорности минерального сырья. В то же время тонковкрапленное золото обнаружено в кварце, слоистых алюмосиликатах и органическом веществе, в которых оно распределено неравномерно.

По итогам фазового анализа золото, в руде присутствует в основном в свободном виде. Результаты ситового анализа показали максимальное содержание ценного компонента в классе крупности -0,1+0,071 мм и -0,071 мм – 2,7 и 2,8 г/т соответственно.

Упорные руды, содержащие тесные ассоциаты золота с кварцем, сульфидами, при наличии в рудах теллуридов, пирротинов, цианируются неэффективно, с повышенным расходом цианида. Также ржавое золото, золото, покрытое плёнками железистых соединений, гидратированных оксидов железа, не переходит в раствор при прямом цианировании. Флотационный метод обогащения позволяет оптимизировать процесс извлечения золота методом цианирования [2, 6, 10, 18].

В соответствии с результатами рентгенофазового анализа подтверждено, что руда состоит преимущественно из кварца, который определяется как пустая порода, и силикатных минералов, таких как альбит, микроклин, мусковит, эденит и клинохлор (см. табл. 2).

Для определения форм золота в рудах, характера его взаимосвязи с рудными компонентами и оценки высвобождаемости в процессе измельчения был выполнен фазовый (рациональный) анализ пробы руды. Важным фактором, определяющим эффективность флотационного обогащения, являются крупность исходного материала и степень раскрытия сростков; оптимальная степень измельчения руды при флотационном обогащении определяется опытным путём на основании лабораторных исследований. Сульфидные руды отличаются чрезвычайно тонким вкраплением и взаимопрорастанием минералов, что не исключает образование сростков после тонкого их измельчения. Верхний предел крупности частиц при измельчении руды определяется прочностью прилипания к воздушным пузырькам. Нижний предел крупности измельчения определяется характером срастания минералов друг с другом. Степень раскрытия сростков возрастает с увеличением степени измельчения руды. Золото было обнаружено в свободном виде и в виде мелких зёрен в сульфидах (халькопирит, пирит), а также в тонковкрапленном состоянии в силикатных минералах. Результаты которого приведены в таблице 3. По результатам анализа следует, что в пробе исходной руды крупности класса 2,0 мм количество свободного золота -40,09%, в том числе золота с чистой поверхностью – 18,43%, покрытого плёнками золота – 21,66%, золота в сростках с сульфидами – 15,21 %. В пробе руды класса крупности -0,071 мм количество свободного золота увеличилось незначительно - с 19,35 до 41,01 % и покрытого плёнками – до 20,66 %; так же показано некоторое увеличение доли золота в сростках с сульфидами – до 17,51 %, что может быть объяснено прорастанием минералов и высвобождением при измельчении сульфидных минералов. При дальнейшем измельчении руды до класса крупности 0,05 мм и +0,05 мм доля свободного золота значительно увеличилась, до процентного соотношения свободного золота к золоту в сростках, равного 78,8 к 21,2%; золото в сростках с сульфидами не обнаружено. По данным исследования можно сделать вывод, что дополнительное измельчение до крупности 0,05 мм и +0,05 мм неблагоприятно для обогащения сырья флотацией.

Минералы-носители золота в золотосодержащих рудах обычно имеют весьма неравномерную вкрапленность – от 1000 долей микрометра до десятков микрометров. Составляющим критерия упорности является также наличие мышьяка и сульфидных минералов в золотосодержащих рудах. Поэтому сложные фазовый и минеральный составы золотосодержащих руд определяют необходимость минералогического исследования.

Формы нахождения золота и характер его	Исходная проба крупностью класса -2,0 мм		Проба изме класса	ельчения 98 % -0,071 мм	Проба измельченная крупностью класса -0,05 мм и +0,05 мм	
связи с рудными компонентами	Содержание Аu, г/т	Распределение Аu, %	Содержание Аи, г/т	Распределение Аи, %	Содержание Аи, г/т	Распределение Аu, %
Золото свободное с чистой поверхностью	0,40	18,43	0,42	19,35	1,25	60,6
Золото свободное покрыто плёнками	0,47	21,66	0,47	20,66	0,42	18,2
Золото в сульфидах	0,33	15,21	0,38	17,51	_	—
Золото в сростках (цианируемое)	0,20	9,22	0,24	7,87	0,31	12,1
Золото в нерастворимых в царской водке минералах и кварце	0,77	35,48	0,73	33,64	0,19	9,1
Всего	2,17	100,0	2,17	100	2,17	100

3. Формы нахождения золота и характер его связи с рудными компонентами

Минералогический анализ показал, что основным ценным компонентом в руде является золото. Общая масса сульфидов не превышает 5%, сульфидные минералы находятся в мелких, тонких и тонкодисперсных зёрнах и рассеяны по массе пород. Золото ассоциирует с кварцем и сульфидами. Сульфиды представлены халькопиритом, пиритом, арсенопиритом (рис. 2). Значительная масса свободного золота является тонкодисперсной (0,5–10,0 mkm). Форма золотин неправильная, компактная, комковатая, изометричнопластинчатая. Поверхность большей части золота покрыта охрами, плёнками и корочками гидроксидов железа, сульфидов, карбонатов и силикатов (рис. 3).

Сульфидные минералы, присутствующие в сырье, – арсенопирит Ars (FeAsS), пирит Ру (FeS₂),



Рис. 2. Результаты минералогического анализа исходной руды:

А – зёрна халькопирита и пирита в сростке с нерудной массой; Б – золото в сростках с кварцем, сульфидами



Рис. 3. Свободное золото с чистой поверхностью и золото, покрытое плёнками в руде

халькопирит Cp (CuFeS₂), пирротин Pirr (Fe1xS) – находятся в мелких, тонких и тонкодисперсных зёрнах (рис. 4).

Из окисленных железных минералов выявлены (в г/г): магнетит Mgt (Fe₃O₄), гётит (HFeO₂), гидрогётит (HFeO₂·ag); гематит (α Fe₂O₃) (см. рис. 4).

Из литературных источников известно, что флотация свободного золота эффективна для золотин неправильной формы. Оксиды железа как пенообразователи способствуют процессу флотации. Наличие сульфидов и оксидов железа предполагает возможность применения флотационного метода обогащения с учётом применения сульфатизатора [2].

Процесс флотации осуществляется в перемешиваемой водной минеральной суспензии (флотационной пульпе), в которую тем или иным способом вводят пузырьки воздуха. Успех флотации зависит от того, насколько отличаются по смачиваемости минералы, подлежащие разделению [14, 17, 19]. Набор флотационных реагентов достаточно широк, что позволяет подобрать селективные реагенты для большинства природных минералов. Это делает флотационный метод обогащения универсальным, то есть пригодным для обогащения большинства природных руд. В исследованиях для снижения затрат процесса флотации, основываясь на данных научной литературы, были использованы эффективные и доступные реагенты невысокой стоимости. В качестве собирателя использовали бутиловый ксантогенат натрия, который является достаточно сильным коллективным собирателем. В качестве вспенивателя применяли С7, который широко распространён. В ходе экспериментов по флотации были выполнены 5 вариантов режимов обогащения при разных средах пульпы: pH 8,0, 9,0, 10,0 и с применением сульфидизатора (Na₂S) и дополнительной диспергации пульпы [3, 4, 8–9].

Результаты экспериментов по флотации руды крупностью 0,071 мм: при pH = 8 массовый выход итогового концентрата составил 14,3 % с концентрацией золота 10,0 г/т, что дало извлечение 82,07 %. Похожий результат с извлечением (82,79 %) наблюдался при повышении pH до 9,0, при общем массовом выходе концентрата, равном 9,45 %, с содержанием золота 15,3 г/т. Доочистка наработанного концентрата при оптимальном режиме при pH 9 поднимает извлечение до 90,3 % (табл. 4).

Флотационное исследование доизмельчённой до классов крупности $\pm 0,05$ мм показало нецелесобразность помола исходного сырья до -0,05 мм. Извлечение золота в концентрат составило немногим более 65% против 89,94% при крупности $\pm 0,05$ мм.



Рис. 4. Сульфидные и железные минералы, содержащиеся в руде: вкрапление: 1 – зёрен арсенопирита, 2 – пирита, 3 – ильменита и 4 – магнетита

Hamman	Вых	код	Содержание	Извлечение	Примонали	
паименование продуктов			Аи, г/т	Au, %	примечание	
Объединённый концентрат	400,0	40	4,0	65,22	0.05 vor	
Хвосты	600,0	60	1,42	34,78	-0,03 MM	
Объединённый +0,05 мм концентрат	179,4	17,94	6,8	89,94	+0,05 мм	
Хвосты	820,6	82,06	0,17	10,06		

5. Результаты флотации исходного сырья классов крупности ±0,05 мм

При тонком измельчении в пульпе появляется большое количество тонких шламов, которые ухудшают флотацию за счёт уменьшения скорости и избирательности флотации и увеличения расхода реагентов. Ухудшение селективности флотации тонкозернистых частиц происходит вследствие ряда причин, основные из которых связаны с уменьшением вероятности контакта тонких частиц с пузырьками [5, 15, 16].

Минералогический анализ концентратов флотации, полученных в экспериментах с максимальными показателями извлечения – при pH пульпы, равном 9, а также при добавлении сульфида натрия и диспергации, показал, что основной сульфидный минерал концентратов – арсенопирит. Он характеризуется всеми присущими ему свойствами – цветом, отражательной способностью, анизотропией. Содержание его в пробах соответственно порядка 18–19 и 16–17%. Обнаружены также пирит и халькопирит. Содержание пирита соответственно в пробах порядка 6–7 и 4–5%. Халькопирит в пробе флотоконцентрата, полученного при pH = 9, составляет 3–4%, в пробе с диспергацией и добавлением сульфида натрия – менее 0,2%.

В хвостах флотации (рис. 5), по результатам минералогического анализа, содержится рудовмещающая жильная пустая порода (полевые шпаты разной классификации, кварциты, карбонат кальция, слюды, хлорит, теллурит и в меньшей степени темноцветные минералы, такие как апатит, оливин, плагиоклазы). Из рудных компонентов проба представлена арсенопиритом, пиритом, халькопиритом и редко пирротином, висмутином, оксидами и гидроксидами железа (магнетитом, гётитом). Обнаруженное в пробах хвостов флотации золото имеет круглую и овальную форму, не эффективную для флотации.

После проведённых исследований можно сделать выводы, что исследуемая руда упорного типа, кварцевая, с содержанием сульфидов около 5%. Технологический тип исследуемой руды – золотокварцевый,



Рис. 5. Минералогическое исследование продуктов флотации:

А – в концентрате: 1 – арсенопирит, 2 – пирит, 3 – халькопирит; Б – рудные компоненты, содержащиеся в хвостах флотации;
В – золото свободное и в сростках с пустой породой в хвостах флотации

золотосульфидный со свободным и цианируемым золотом. Сульфиды представлены пиритом, халькопиритом и арсенопиритом, а также пирротином; из минералов, содержащих железо, в руде содержится магнетит и ильменит. Золото находится преимущественно в свободной форме (40 %) и в сростках с кварцем и сульфидами. По дисперсности золото тонкодисперсное. Потери золота в цикле флотации происходят за счёт перехода в хвосты золота в сростках с кварцем и золотин овальной и круглой формы. Наибольшая полнота перехода золота в концентрат (84,42 %) наблюдается при крупности руды класса 0,07 мм.

Рекомендованный режим флотации для извлечения золота: крупность руды 0,071 мм, в соотношении Т:Ж = 1:3 (плотность пульпы 33 %), реагентный режим 120 г/т бутилового ксантогената натрия в ка-

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Абрамов А. А. Флотационные методы обогащения. 3-е изд. – М. : МГГУ, 2008. – 670 с.
- Богудлова А. И., Войлошников Г. И., Матвеева Т. М. Повышение эффективности переработки золотосодержащей сульфидной руды // Вестник иркутского государственного технического университета. – 2017. – Т. 21, № 12 (131). – С. 195–202.
- Бочаров В. А., Игнаткина В. А., Алексейчук Д. А. Новые научные подходы к выбору композиций сульфгидрильных собирателей, механизму их действия и обоснованию условий селективной флотации сульфидных минералов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2013. – № 10. – С. 59–66.
- Воробьев Н. И. Обогащение полезных ископаемых: пособие для студентов специальности 1-48 01 01 «Химическая технология неорганических веществ, материалов и изделий» специализации 1-48 01 01 01 «Технология производства минеральных удобрений, солей и щелочей» / Н. И. Воробьев, Д. М. Новик. – Минск : БГТУ, 2008. – 174 с.
- Глембоцкий В. А., Классен В. И. Флотационные методы обогащения. – М. : Недра. –1981. – С. 238–250.
- Ерденова М. Б., Койжанова А. К., Камалов Э. М., Абдылдаев Н. Н., Абубакриев А. Т. Доизвлечение золота из отходов переработки золотосодержащих руд Казахстана // Комплексное использование минерального сырья. – 2018. – № 2. – С. 12–20.
- 7. Игнаткина В. А. Выбор селективных собирателей для флотации сульфидных минералов // Цветные металлы. 2009. № 6. С. 14–19.
- Кондратьев С. А. Оценка флотационной активности реагентов-собирателей // Обогащение руд. – 2010. – № 4. – С. 24–30.
- Лодейщиков В. В. Технология извлечения золота и серебра из упорных руд: монография. В 2 томах. Том 1. – Иркутск : Иргиредмет, 1999. – 342 с.
- Матвеева Т. Н. Современные реагентные режимы флотации платины и золотосодержащих руд // Проблемы освоения недр в XXI в. глазами молодых: материалы

честве собирателя, 60 г/т вспенивателя С7, сульфатизатор Na₂S, при кислотностях пульпы pH 8,0–9,0, с использованием дополнительной диспергации.

Дополнительное измельчение исходной руды до -0,005 мм нецелесообразно, извлечение золота составило 65,22%. Потери золота происходят с мелким шламом.

Для дальнейшей переработки сырья с целью извлечения золота может проводиться цианирование полученного концентрата чановым способом с сорбцией и активацией процесса, хвосты флотации кучным цианидным выщелачиванием с применением бактериальных окислителей.

Министерство образования и Науки Республики Казахстан оказало финансовую поддержку данной работе в рамках грантового финансирования AP08051925.

5-й Международной научной школы молодых ученых и специалистов. – М. : Изд-во ИПКОН РАН, 2008. – С. 12–15.

- Матвеева Т. Н., Чантурия В. А., Гапчич А. О. Извлечение тонкодисперсных микро- и наночастиц золота с применением термоморфного полимера с функциональной группой дифенилфосфина // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2017. № 3.– С. 131–140.
- Рябой В. И. Проблемы использования и разработки новых флотореагентов в России // Цветные металлы. – 2011. – № 3. – С. 7–14.
- Рябой В. И., Шендерович В. А., Кретов В. П. Применение аэрофлотов при флотации руд // Обогащение руд. – 2005.– № 6. – С. 43–44.
- 14. Чантурия В. А., Задорожный В. К. Флотация тонко вкрапленных руд. – Л. [СПб.] : Наука, 1985. – 139 с.
- Основы пенной флотации [Электронный ресурс]. URL: https://zolotodb.ru/article/11335. Дата обращения 16.11.2022.
- Etchepare R., Oliveira H., Nicknig M., Azevedo A., Rubio J. Nanobubbles: Generation using a multiphasepump, properties and features in flotation // Minerals Engineering. – 2017. – Vol. 112. – P. 19–26.
- Fairthorne G., Fornasiero D., Ralston J. Interaction of thionocarbamate and thiourea collectors with sulphide minerals: a flotation and adsorption study // International Journal of Mineral Processing. – 1997. – Vol. 50, Iss. 4. – P. 227–242.
- Koizhanova A. K., Toktar G., C. E. Banks, Magomedov D. R., Kubaizhanov A. A. Research of hydrometallurgical method of leaching gold from flotation tails with using biooxidation // Complex Use of Mineral Resources. – 2020. – № 3 (314). – P. 28–39.
- Wiese J., Harris P., Bradshaw D. Investigation of the role and interactions of a dithiophosphate collector in the flotation of sulphides from the Merensky reef // Minerals Engineering. – 2005. – Vol. 18, Iss. 8. – P. 791–800.
- Kliewer R. Persistence Leads to Over a Pound of Gold [Электронный ресурс]. – URL: https://www.icmj.com/ magazine/article/persistence-leads-to-over-a-pound-ofgold-4004/. Дата обращения 16.11.2022.

REFERENCES

- Abramov A. A. Flotatsionnyye metody obogashcheniya [Flotation methods of enrichment]. 3rd ed., Moscow, MGGU publ., 2008, 670 p. (In Russ.)
- Bogudlova A. I., Voyloshnikov G. I., Matveyeva T. M. Povysheniye effektivnosti pererabotki zolotosoderzhashchey sul'fidnoy rudy [Improving the efficiency of processing gold-bearing sulfide ore]. Vestnik irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Bulletin of the Irkutsk State Technical University], 2017, V. 21, No. 12 (131), pp. 195–202. (In Russ.)
- Bocharov V. A., Ignatkina V. A., Alekseychuk D. A. Novyye nauchnyye podkhody k vyboru kompozitsiy sul'fgidril'nykh sobirateley, mekhanizmu ikh deystviya i obosnovaniyu usloviy selektivnoy flotatsii sul'fidnykh mineralov [New scientific approaches to the choice of compositions of sulfhydryl collectors, the mechanism of their action and the justification of the conditions for selective flotation of sulfide minerals]. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten', 2013, No. 10, pp. 59–66. (In Russ.)
- 4. Vorob'yev N. I. Obogashcheniye poleznykh iskopayemykh: posobiye dlya studentov spetsial'nosti "Khimicheskaya tekhnologiya neorganicheskikh veshchestv, materialov i izdeliy" spetsializatsii "Tekhnologiya proizvodstva mineral'nykh udobreniy, soley i shchelochey" [Mineral enrichment: a manual for students of specialty «Chemical technology of inorganic substances, materials and products» specialization «Technology of production of mineral fertilizers, salts and alkalis»]. N. I. Vorob'yev, D. M. Novik, Minsk, BGTU publ., 2008, 174 p. (In Russ.)
- 5. *Glembotskiy V. A., Klassen V. I.* Flotatsionnyye metody obogashcheniya [Flotation enrichment methods]. Moscow, Nedra publ., 1981, pp. 238–250. (In Russ.)
- Yerdenova M. B., Koyzhanova A. K., Kamalov E. M., Abdyldayev N. N., Abubakriyev A. T. Doizvlecheniye zolota iz otkhodov pererabotki zolotosoderzhashchikh rud Kazakhstana [Re-extraction of gold from waste processing of gold-bearing ores in Kazakhstan]. Kompleksnoye ispol'zovaniye mineral'nogo syr'ya [Complex use of mineral raw materials], 2018, No. 2, pp. 12–20. (In Russ.)
- Ignatkina V. A. Vybor selektivnykh sobirateley dlya flotatsii sul'fidnykh mineralov [Choice of selective collectors for flotation of sulfide minerals]. Tsvetnyye metally [Nonferrous metals], 2009, No. 6, pp. 14–19. (In Russ.)
- Kondrat'yev S. A. Otsenka flotatsionnoy aktivnosti reagentov-sobirateley [Evaluation of the flotation activity of reagents-collectors]. Obogashcheniye rud [Enrichment of ores], 2010, No. 4, pp 24–30. (In Russ.)
- 9. *Lodeyshchikov V. V.* Tekhnologiya izvlecheniya zolota i serebra iz upornykh rud: Monografiya [Technology of extraction of gold and silver from persistent ores: Mono-

graph]. In 2 volumes, V. 1, Irkutsk, Irgiredmet, 1999, 342 p. (In Russ.)

- Matveyeva T. N. Sovremennyye reagentnyye rezhimy flotatsii platiny i zolotosoderzhashchikh rud [Modern reagent modes of flotation of platinum and gold-bearing ores]. Problemy osvoyeniya nedr v XXI v. glazami molodykh: materialy 5-y Mezhdunarodnoy nauchnoy shkoly molodykh uchenykh i spetsialistov. Moscow, IPKON RAN publ., 2008, pp. 12–15. (In Russ.)
- 11. *Matveyeva T. N., Chanturiya V. A., Gapchich A. O.* Izvlecheniye tonkodispersnykh mikro- i nanochastits zolota s primeneniyem termomorfnogo polimera s funktsional'noy gruppoy difenilfosfina [Extraction of finely dispersed micro- and nanoparticles of gold using a thermomorphic polymer with a functional group of diphenylphosphine]. Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh [Physical and technical problems of mineral development]. 2017, No. 3, pp. 131–140. (In Russ.)
- 12. *Ryaboy V. I.* Problemy ispol'zovaniya i razrabotki novykh flotoreagentov v Rossii [Problems of use and development of new flotation reagents in Russia]. Tsvetnyye metally [Nonferrous metals], 2011, No. 3, pp. 7–14. (In Russ.)
- Ryaboy V. I., Shenderovich V. A., Kretov V. P. Primeneniye aeroflotov pri flotatsii rud [Application of aeroflots in ore flotation]. Obogashcheniye rud [Enrichment of ore], 2005, No. 6, pp. 43–44. (In Russ.)
- Chanturiya V. A., Zadorozhnyy V. K. Flotatsiya tonko vkraplennykh rud [Flotation of finely disseminated ores]. Leningrad, Nauka publ., 1985, 139 p.
- 15. Osnovy pennoy flotatsii [Fundamentals of Froth Flotation], available at: https://zolotodb.ru/article/11335. (16.11.2022)
- Etchepare R., Oliveira H., Nicknig M., Azevedo A., Rubio J. Nanobubbles: Generation using a multiphasepump, properties and features in flotation. Minerals Engineering, 2017, Vol. 112, pp. 19–26.
- Fairthorne G., Fornasiero D., Ralston J. Interaction of thionocarbamate and thiourea collectors with sulphide minerals: a flotation and adsorption study. International Journal of Mineral Processing, 1997, Vol. 50, Iss. 4, pp. 227–242.
- Koizhanova A. K., Toktar G., C. E. Banks, Magomedov D. R., Kubaizhanov A. A. Research of hydrometallurgical method of leaching gold from flotation tails with using biooxidation. Complex Use of Mineral Resources, No. 3 (314), pp. 28–39.
- Wiese J., Harris P., Bradshaw D. Investigation of the role and interactions of a dithiophosphate collector in the flotation of sulphides from the Merensky reef. Minerals Engineering, 2005, Vol. 18, Iss. 8, pp. 791–800.
- 20. *Kliewer R*. Persistence Leads to Over a Pound of Gold, available at: https://www.icmj.com/magazine/article/persistence-leads-to-over-a-pound-of-gold-4004/. (16.11.2022)

Статья поступила в редакцию 20.07.22; одобрена после рецензирования 20.10.22; принята к публикации 21.10.22. The article was submitted 20.07.22; approved after reviewing 20.10.22; accepted for publication 21.10.22.

DOI:10.47765/0869-7175-2022-10038

УДК 553.4+552.16+549.0 (454) © Э. М. Спиридонов, 2022

Норильские рудоносные интрузивы и сульфидные руды. К 120-летию М. Н. Годлевского

Михаил Николаевич Годлевский — один из создателей современной геологии Норильского региона, ведущий специалист в области магматических сульфидных месторождений. Все серьёзные научные труды и производственные отчёты по Норильскому региону содержат ссылки на знаменитую книгу М. Н. Годлевского «Траппы и рудоносные интрузии Норильского района» [11]. Ниже рассмотрено современное состояние некоторых проблем, которые исследовал М. Н. Годлевский в Норильском регионе.

ЭРНСТ МАКСОВИЧ СПИРИДОНОВ, доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры минералогии геологического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова, ведущий научный сотрудник Минералогического музея им. А. Е. Ферсмана РАН, ernstspiridon@gmail.com

Norilsk ore-bearing intrusives and sulfide ores. To the 120th anniversary of the birth of M. N. Godlevsky

E. M. SPIRIDONOV

Lomonosov Moscow State University, A. E. Fersman Mineralogical Museum of the Russian Academy of Sciences, Moscow

Mikhail Nikolaevich Godlevsky is one of the creators of modern geology in the Norilsk region, and a leading specialist in the field of magmatic sulfide deposits. All serious scientific works and production reports on the Norilsk region contain references to the famous book by M. N. Godlevsky "Traps and ore-bearing intrusions of the Norilsk region" [11]. Below we consider the current state of some of the problems that M. N. Godlevsky investigated in the Norilsk region.

Геологическая позиция и строение Норильского рудного поля

М. Н. Годлевский ясно показал отличие Норильского от иных регионов Восточно-Сибирской платформы: заметная дислоцированность, обилие разрывных нарушений, существенная доля пикритов среди вулканических траппов и богатых магнезиальным оливином габбро-долеритов среди интрузивных траппов.

Норильское рудное поле находится в пределах дорифейской Восточно-Сибирской платформы, недалеко от границы с Западно-Сибирской эпикаледоногерцинской плитой, над мощным выступом высокоплотных пород основного состава (рис. 1) [10], в зоне краевых дислокаций в северо-западной части платформы. Мощность земной коры здесь 42-47 км, из них 34-40 км - толщи кристаллических сланцев и амфиболитов архейского и протерозойского возраста с телами гранитов (фундамент платформы), и 8-12 км - несколько дислоцированные и слабо метаморфизованные толщи рифея-венда-фанерозоя (плитный чехол платформы) [69]. Фундамент платформы разбит массой разломов. Рудные узлы Норильский (на юго-западе рудного поля) и Талнахский (на северо-востоке рудного поля, между ними 20 км) размещены в плитном чехле платформы. Плитный чехол слагают терригенные отложения R (~2,5 км), пестроцветные ангидрит-карбонатно-терригенные толщи от R₃ до C (~5,5–9 км), угленосная толща C–P (тунгусская серия) (~0,5 км), платобазальты P_2-T_1 (до 4–5 км) [69]. Толщи ангидрита содержат линзы галита и рассолов, пятна нафтидов.

Траппы P_2-T_1 развиты не только на Восточно-Сибирской платформе, но и выполняют мощные рифты в Западно-Сибирской плите. При формировании трапповой формации преобладали процессы растяжения земной коры и сопутствующая эффузивная деятельность, их периодически сменяли процессы сжатия и интрузивная деятельность. Состав вулканитов трапповой формации – от щелочных оливиновых базальтов до резко преобладающих толеитовых базальтов континентального типа, интрузивных базитов – от безрудных толеитовых габбро-долеритов до рудоносных оливиновых габбро-норит-долеритов повышенной калийности [11, 24, 51, 65, 75].

О соотношении эффузивных траппов и рудоносных интрузивов норильского типа

Данный вопрос имеет принципиальное значение для выяснения генетического типа гигантских



Рис. 1. Фрагмент сейсмического профиля «Батолит» [10]:

1 – опорные сейсмические границы (В – фундамент, М – поверхность Мохо); 2 – внутрикоровые сейсмические границы; 3 – границы блока с различными скоростными характеристиками; 4 – блоки земной коры, сложенные породами основного состава; числа на рисунке – значения скоростей продольных волн, км/с; красным показано географическое положение Норильского рудного поля

Норильских месторождений: эти месторождения плутоногенные или субвулканические? Кроме того, для месторождений Норильского рудного поля характерна аномально высокая мощность сульфидных залежей при скромной мощности рудоносных интрузивов. Интересную гипотезу для объяснения этих соотношений выдвинул В.А. Радько [37]. Суть её в том, что через камеры рудоносных интрузивов прошли огромные массы базальтовых расплавов, которые затем сформировали толщу эффузивов трапповой формации, но «по дороге оставили» в камерах интрузивов свой «рудный груз»; эта гипотеза подхвачена западными учёными и очень популярна [72]. Проанализируем, насколько с этой интересной гипотезой согласуются данные по реальной геологии Норильского региона.

Эффузивы трапповой формации Восточно-Сибирской платформы – производные бесчисленных трещинных излияний, сформировались в условиях тектонического растяжения [33]. Эффузивные траппы Норильского региона не содержат ни одной капли

сульфидов. В центре вулканических плато покровы залегают горизонтально, у базальтов правильная вертикальная столбчатая отдельность. Мульдообразное залегание платобазальтов в Норильском регионе обусловлено смятием совместно всей толщи вулканических траппов от ивакинской до моронговской свит вместе с подстилающими осадочными толщами [9, 69]. В этих пологих брахисинклинальных складках - с юго-запада на север и северо-восток Норильской, Вологочанской, Хараелахской, Сыверминской мощность вулканитов в их центре и на крыльях одинакова. В местах замыкания брахисинклиналей платобазальты трапповой формации смяты, у них исчезла столбчатая отдельность (рис. 2). Возможно, плитный чехол Восточно-Сибирской платформы в Норильском регионе был смят при раскрытии мощных рифтов на севере Западно-Сибирской плиты.

Великолепный знаток геологии Норильского региона М. Н. Годлевский и его ученики В. К. Степанов, Д. М. Туровцев, А. П. Лихачёв, В. В. Юдина, Э. А. Кулагов, которые детально изучили весь объём



Рис. 2. Северное замыкание Норильской брахисинклинали. Западная стенка карьера Угольный Ручей. Фото автора:

высота стенки 13 м; смятые платобазальты ивакинской свиты, у которых исчезла правильная столбчатая отдельность поисково-разведочных скважин, в том числе Талнахского рудного узла, карьеры рудников Угольный ручей и Медвежий ручей, заметную часть подземных выработок рудников Заполярный, Маяк, Октябрьский, Комсомольский и Таймырский, надёжно установили, что рудоносные интрузивы норильского типа не имели выхода на палеоповерхность [6, 11, 15, 24, 32, 51, 52, 54]. Следовательно, напрямую они не связаны с вулканитами трапповой формации Р₂–Т₁.

Судя по геологической карте Норильского региона масштаба 1:200000 [9], все вулканические свиты трапповой формации смяты совместно. Недеформированные рудоносные интрузивы прорвали и контактово метаморфизовали дислоцированные вулканиты трапповой формации и подтрапповые толщи. Рудоносные интрузивы – расслоенные, залегание первичной расслоенности габброидных пород в них пологое.

Н. А. Криволуцкая показала, что вулканические траппы и породы рудоносных интрузивов некомагматичны [28]. Оценка давления при формировании этих интрузивов, по М. Н. Годлевскому и В. К. Степанову, – 0,8 кбар, что соответствует глубине становления 2,5 км от палеоповерхности. Для рудоносных интрузивов норильского типа характерно наличие пегматоидных габбро-долеритов [13, 21], крупнои гигантокристаллических сульфидных руд [8, 45]. Итак, норильские месторождения – плутоногенные [45, 56].

Таким образом, красивая гипотеза В.А. Радько, «просто» объясняющая огромное количество магматогенных сульфидных руд в интрузивах норильского типа, не согласуется с последовательностью геологических событий, с реальными соотношениями эффузивных траппов и рудоносных интрузивных траппов [72].

Механизм внедрения рудоносных интрузивов норильского типа

По данным В.К. Степанова [51, 73], Норильские рудоносные интрузивы внедрились в обстановке сжатия, при смятии слоистых толщ рамы интрузивов. Согласно принципу Эйлера, при этом образуются линзовидные полости, которые «работают как помпы», происходит всасывание магматического материала и формируются интрузивные тела. Характер течения расплавов – ламинарный. По данным В.К. Степанова [51, 52] и натурным наблюдениям, сульфидные расплавы внедрились из глубинного источника синхронно с силикатными расплавами, породившими рудоносные интрузивы норильского типа. В.К. Степанов предположил, что три несмешивающиеся расплава с количественным соотношением ~100:10:1 сформировали коаксиальное цилиндроподобное в разрезе тело, где самый тяжёлый сульфидный расплав находился в центре; его окружал менее тяжёлый кашеобразный базитовый расплав с обильными кумулятивными оливином и хромшпинелидом, вокруг них находился наименее тяжёлый толеит-базальтовый расплав.

Предложенный способ внедрения объясняет: 1) каким образом в верхнюю часть плитного комплекса платформы внедрились тяжёлые расплавы, в том числе сульфидный; 2) возможность образования двух горизонтов «пикритовых» пород в рудоносных интрузивах - стандартного нижнего и нестандартного верхнего; 3) наличие тонкокристаллических долеритов и стекловатых пород (так называемых «псевдотахилитов») на слепых окончаниях Хараелахского и Верхнеталнахского интрузивов [24 и др.] – при всасывании первые порции базитового расплава быстро «убежали» от теплового фронта поднимающихся расплавов и сформировали эффузивоподобные породы на интрузивном уровне. С большой долей вероятности можно предположить, что внедрение рудоносных интрузивов норильского типа произошло в процессе смятия толщи вулканических траппов и подтрапповых толщ при раскрытии мощных рифтов на северо-востоке Западно-Сибирской плиты.

Интрузивный процесс был неоднородным - относительно спокойное внедрение, при котором возникли участки интрузивов с пологими дном и кровлей, сменялось условиями, когда магматические массы буквально выпахивали пространство, образуя депрессии дна интрузивов. При этом движение магматической колонны тормозилось, из «струи» сульфидного расплава начинался дождь или град сульфидных капель [43]. Часть капель застряла в кашеобразном «пикритовом» горизонте, значительная часть просочилась до дна, образовав озёра сульфидного расплава именно в депрессиях дна интрузивов. По А. П. Лихачёву [32], при торможении интрузивного процесса ламинарное течение расплавов сменялось турбулентным, что способствовало интенсификации сульфидного дождя. Временами происходило взламывание пород рамы, при этом возникали интрузивные брекчии и, соответственно, гибридные магматические породы, то богатые кварцем и (или) гранофировыми агрегатами гранитного состава, то богатые кордиеритом, то с массой обломков хромитоносных лейкогаббро. Размер обломков осадочных пород в таких брекчиях достигал 150 м, например, в интрузиве Норильск-II [6].

Зачастую весьма неоднородное распределение магматических пород в объёме интрузивов могло быть вызвано тем, что следующие порции расплавов перемещали – «толкали» вперёд ранее сформированные магматические массы [32, 51, 52]. Особенно

неравномерно распределены породы «пикритового» горизонта с каплями сульфидов. По данным В.К. Степанова [73]: 1) «пикритовые капельники» слагают до 60% мощности Норильского интрузива в скважинах Е-17 (Ергалах) и РЕ-92 (Чибичей) и до 70% мощности в отдельных участках головных частей Талнахского (Верхнеталнахского) и Хараелахского (Таймырского) рудоносных интрузивов; 2) в более глубоко залегающих северных продолжениях Талнахского и Хараелахского интрузивов «пикритовых капельников» мало; 3) установлена прямая корреляция мощности горизонта «пикритовых капельников» и обилия в них сульфидов и мощности сульфидной залежи в данной депрессии дна интрузивов; 4) нижний и верхний горизонты оливиновых габбро-долеритов - такситовых оливиновых габбро-долеритов содержат однотипную вкрапленность сульфидов; 5) нижний и верхний «пикритовые» горизонты содержат различную по составу вкрапленность сульфидов и хромшпинелидов.

Установлено сложное неоднородное строение главного (в будущем) типа руд Норильского рудного поля – капельников горизонта «пикритов» = габбронорит-перидотитов с сульфидными каплями. Магматические породы данного горизонта обычно описывают как пикритовые габбро-долериты. Термин долериты к ним не приложим, поскольку плагиоклаз в этих породах ксеноморфный. Это габбро-норитперидотиты, меланотроктолиты, плагиолерцолиты. В вертикальном разрезе данного горизонта присутствует несколько уровней обогащённых и обеднённых сульфидными каплями.

О вероятном источнике исходных расплавов рудоносных интрузивов норильского типа

Основной объём этих интрузивов слагают габбродолериты призматически-зернистые, оливиновые, оливинсодержащие, безоливиновые, лейкократовые, анортозитовые, такситовые; меланотроктолиты, плагиолерцолиты. Для этой ортомагматической ассоциации характерна анортозитовая тенденция магматической дифференциации [41]. Судя по составу оливина (Fe хризолит и гиалосидерит), хромшпинелидов (низкохромистые Ti алюмомагнезиохромит и алюмохромит, Ti феррихромит), пироксенов, Mg ильменита, рудоносные интрузивы – производные базитовых (пикробазальтовых) расплавов невысокой щёлочности.

Заметную часть рудоносных интрузивов слагают гибридно-метасоматические и гибридные породы (магматизированные и мигматизированные роговики) – габбро-нориты, нориты, кварцевые нориты, кордиеритовые нориты; габбро-диориты, кварцевые габбро-диориты, гранофировые габбро-диориты. По данным ведущих исследователей Норильских месторождений, породившие их магматические системы имели глубинный мантийный источник [11, 27, 32, 56, 65, 66, 75, 76].

Детальные исследования геохимии вулканических траппов показали достаточно монотонную картину для всех свит, кроме нижней части надеждинской свиты, которая сложена лейкобазальтами с резко пониженным содержанием Mg, Cr, Ni, Cu, S, Pd, Pt, Au и заметно повышенным содержанием REE, U, Ba, Rb [65]. Был сделан вывод, что при контаминации расплавов платобазальтов низов надеждинской свиты веществом земной коры возникли лейкобазальты и комплиментарные им расплавы, обогащённые оливином, хромшпинелидом, сульфидами Fe-Ni-Cu, Pd,



Рис. 3. Изотопный состав свинца трапповой формации Норильского региона:

1 — базальты [65, 76]; 2 — габбро-долериты Норильских интрузивов [65, 76]; 3 — сульфидные руды Норильского рудного узла [76]; 4 — габбро-долериты Талнахского и Хараелахского интрузивов [65, 76]; 5 — сульфидные руды Талнахского рудного узла [76]; 6 — магматический PbSss, Талнах [46]; 7 пневматолитовый галенит, Талнах [46]; 8 — пневматолитовый алтаит, Талнах [46]; 9 — звягинцевит и атокит, Норильск [46]; 10 — полярит и плюмбопалладинит, Талнах [46]; 11 галенит из арсенидно-карбонатных жил, Талнах [71]; 12 галенит из уранинит-серебро-арсенидно-карбонатных жил, Талнах [71]; линии эволюции изотопного состава Pb в мантии и коре, по [18] Рt, Au, то есть исходные магмы рудоносных интрузивов норильского типа. По оценке А. Дж. Налдретта [66], этот процесс с лихвой обеспечивал ресурсы Pd, Pt, Au Норильского рудного поля. Скрупулёзные подсчёты реального площадного распространения лейкобазальтов надеждинской свиты с дефицитом Mg, Cr, Ni, Pd, Pt, выполненные Н. А. Криволуцкой, показали гораздо более скромный масштаб таких лейкобазальтов; возникло сомнение в оценке А. Налдретта [28, 29].

Судя по изотопии свинца (рис. 3), все образования трапповой формации Норильского региона имели единый мантийный источник. Мантийные магмы трапповой формации были в заметной степени контаминированы веществом континентальной коры, что коррелируется с данными по геохимии широкого круга химических элементов [65, 66, 76]. Изотопный состав Рb рудоносных интрузивов и магматических сульфидных руд Норильского и Талнахского рудных узлов в значительной степени различается – в Талнахском Pb заметно более радиогенный [43, 46].

Установлен очень узкий диапазон вариаций изотопного состава Pb магматического PbSss и пневматолитовых галенита и алтаита Талнаха, практически такой же, как в пневматолитовых плюмбопалладините и полярите Талнаха [46]. Изотопный состав Pb пневматолитовых звягинцевита и атокита Норильска существенно отличен от талнахского и находится в поле состава Pb норильских руд [46]. Это свидетельствует о генетических связях сульфидных руд с конкретными интрузивами, о различных мантийных промежуточных очагах для Норильского и Талнахского рудных узлов, о более высокой степени контаминации мантийных магм Талнаха, чем и обусловлен его гигантский масштаб [43].

О реальности существования сульфидных расплавов

По наблюдениям Е. Н. Сухановой и М. Н. Годлевского, вдоль сульфидных жил месторождения Норильск-I, секущих пласты углей, угли превращены в кокс [15, 53]. В рудниках Медвежий Ручей, Заполярный, Маяк, Комсомольский, Скалистый вдоль контактов сульфидных жил с углями развиты оторочки апоугольного графита (рис. 4). У контактов сульфидных жил, залегающих в роговиках по песчаникам и алевролитам аркозового состава, развиты палингенные гранофиры и аплитовидные породы гранитного состава [11, 15, 24, 30]. По расплавным включениям в кварце этих гранофиров получена оценка температур их формирования 950–920 °С. Всё это – свидетельства реального существования высокотемпературных сульфидных расплавов.



Рис. 4. Рудник Скалистый, гор. -800 м. Фото автора:

сульфидный расплав механически активно внедрился в угли тунгусской серии; часть пласта угля с оторочкой апоугольного графита почти оторвана сульфидным расплавом от горизонта углей

Источники и генезис рудоносных сульфидных расплавов

Многие геологи, изучавшие норильские руды, считают, что исходные для них сульфидные расплавы - продукт ликвации силикатных магм рудоносных интрузивов [8, 11, 12, 27, 30, 36 и др.]. Иное мнение – сульфидные расплавы мантийные, внедрённые совместно с силикатными расплавами [51, 52, 54, 66 и др.]. В обоих вариантах оставалось непонятым различие изотопного состава серы и содержаний благородных металлов во вкрапленных рудах «пикритового горизонта» и в сплошных рудах сульфидных залежей. Руды залежей примерно в 1,5 раза беднее благородными металлами, а сера слагающих их сульфидов более тяжёлая, квазиангидритовая. Чтобы разрешить эти противоречия пытались привлечь гипотезу ассимиляции ангидрита силикатными расплавами рудоносных интрузивов. Но, как известно, ангидрит не растворяется в силикатных расплавах. Некоторые западные учёные «открыли» наличие магматического ангидрита в Норильских месторождениях [62], приняв за магматический ангидрит гидротермальных пирротиновых жил; на этом основана новая гипотеза генезиса норильских руд [64].

Возможное решение проблемы видится следующим образом. Рудоносные интрузивы метаморфизовали угли тунгусской серии до графита; угли тунгусской серии содержат 25–38% летучих веществ, интенсивно графитизированные (до 300 м от контакта с интрузивами) – 4–10% летучих веществ [15]. При этом возникло огромное количество высокотемпературных восстановленных газов (СН₄, Н₂, СО и др.). Как предполагал М.Н. Годлевский, эти газы активно взаимодействовали с ангидритом толщ палеозоя. При сульфатредукции возникли газы с S, H₂S, SO₂, COS, изотопный состав серы в них ангидритовый, богат³⁴S. Попадая в остывающие, сокращающиеся в объёме горячие интрузивы и роговики, такие газы интенсивно взаимодействовали с железосодержащими минералами. Прошли процессы сульфуризации, сформировались тонкая вкрапленность сульфидов в интрузивных породах и роговиках и вторичные сульфидные расплавы [23], которые смешались с глубинными мантийными сульфидными расплавами, заметно разбавили их, при этом изотопный состав серы сульфидных залежей стал заметно более тяжёлым, квазиангидритовым [43]. Это отчасти объясняет огромное количество сульфидных расплавов в Норильском рудном поле и утяжелённый квазиангидритовый изотопный состав серы сульфидных залежей [14, 63], а также пониженное содержание в них же благородных металлов в сравнении с рудами - капельниками, повышенное содержание в сидеронитовых и массивных рудах радиогенного (корового) Оs. Данные по геохимии летучего Re свидетельствуют, что система интрузив-сульфидные залежи имела закрытый характер [75].

О механическом взаимодействии сульфидоносных интрузивов и рамы интрузивов

Уточнённая модель формирования рудоносных интрузивов норильского типа учитывает механическое взаимодействие сульфидоносных мантийных расплавов и рамы интрузивов, прежде всего, механическую нагрузку [44]. Из-за неравномерной нагрузки вышележащих толщ на кровлю Хараелахского, Талнахского (Вехнеталнахского) и Норильского интрузивов значительная часть сульфидных расплавов была выжата из тыловой и промежуточной частей тридцатикилометровой ленты интрузивов в их головную часть, расположенную гипсометрически выше, где нагрузка вышележащих толщ была значительно меньше. Ярко это фиксировано в форме Хараелахского интрузива с его наиболее мощной и широкой головной частью субширотного простирания, размещённой на выходе из-под Хараелахской брахисинклинали, сложенной многокилометровой толщей платобазальтов. Именно к этой головной части Таймырского интрузива приурочена гигантская самая крупная в мире Главная Хараелахская залежь магматических сульфидных руд субширотного простирания. Более легкоплавкие поздние дифференциаты - Ni-Fe-Cu сульфидные расплавы с высокой концентрацией Pd, Pt,

Au, Ag – были выжаты во фронтальную часть интрузивов почти целиком, частично и далее за пределы интрузивов [44]. Этим прежде всего и объясняется непропорционально большая мощность сульфидных залежей в головных частях интрузивов при скромной мощности самих интрузивов. Сульфидные расплавы Талнахского рудного узла выжимались вдоль зоны Главного Норильско-Хараелахского разлома, от которого расходились отдельными струями, формируя многочисленные залежи сплошных и жильных руд. Эффективный способ выявления таких струй и, соответственно, поиска новых рудных тел разработал В.А. Радько [38]. Иногда сульфидные расплавы были выжаты и за пределы ореола контактового метаморфизма, это - богатые Pd жилы тонкозернистых медистых руд рудника Морозова на северном склоне горы Рудной (месторождение Норильск-І).

Текстуры сульфидных агрегатов рудных жил и залежей

В большинстве случаев текстуры сульфидных агрегатов массивные, так как кристаллизация происходила одновременно из множества центров. В крупных и гигантских сульфидных телах и в отходящих от них жилах размер кристаллов сульфидных твёрдых растворов Mss составляет от 3–5 до 30–40 см,



Рис. 5. Рудник Медвежий Ручей, Норильск-I. Коллекция и фото автора:

кристаллы – вкрапленники Mss₂ (коричневатые), ориентированные перпендикулярно нижней стенке пологой жилы в оливиновых габбро-долеритах, вокруг вкрапленников светлая оторочка из переотложенного «распадного» пентландита; матрица – агрегат кристаллов Iss. 106 × 89 мм



Рис. 6. Сульфидная жила. Рудник Комсомольский, гор. -480 м. Коллекция и фото автора:

кристаллы — вкрапленники Mss₂ (коричневатые) ориентированы с наклоном направо (реально на северо-восток) навстречу движению сульфидного расплава; матрица — агрегат кристаллов Iss. 129 × 119 мм. Пологая жила в роговиках

изредка превышает 1 м, это крупно- и гигантокристаллические агрегаты. Таковы кристаллы Mss сульфидных жил, оперяющих Главную Хараелахскую залежь на средних горизонтах западного фланга рудника Комсомольский. Во вкрапленных рудах размер кристаллов Mss в каплях обычно <15 мм. В маломощных сульфидных жилах рудника Морозова, расплав которых выжат из интрузива Норильск-I на сотни метров – за пределы ореола контактового метаморфизма, размер кристаллов Mss не превышает 1,5 мм. Тем не менее мелкие кристаллики Mss испытали распад на халькопирит, пентландит и подчинённый пирротин.

В пологозалегающих сульфидных жилах иногда проявлены текстуры ориентированного роста кристаллов: из застойного расплава – перпендикулярно подложке (рис. 5), из движущегося расплава – с отклонением навстречу течения сульфидного расплава (рис. 6). Это из наблюдений сульфидных жил рудника Комсомольский, где направление течения сульфидного расплава было от Главного Норильско-Хараелахского разлома на юго-запад.

О взаимодействии рудоносных сульфидных расплавов с окружающими породами

Сульфидные расплавы не равновесны с силикатными породами. Вдоль контактов их тел от мелких капель и жил магматических сульфидов до гигантских залежей развиты ореолы замещения минералов магматических пород и роговиков магнетитом, титаномагнетитом, сульфидами, Ті биотитом, фаялитом, амфиболами, К-Na полевым шпатом и др. При этом сами минералы магматических и контактовометаморфических пород совершенно свежие, включая такие малостойкие, как оливин, монтичеллит, ромбические пироксены, биотит [8, 22, 24, 25, 44, 48, 49]. Все крупные залежи магматических сульфидов содержат «объедки» габброидов и роговиков и продукты их замещения, чаще представленные кучными скоплениями реакционного магнетита, когда преобладал сульфидный расплав, или титаномагнетита, когда преобладали габбро-долериты [8].

Наиболее широко в ореолах флюидного воздействия распространён флогопит — биотит, который содержит TiO₂ от 11 до 3–4 мас.%, что отвечает температуре кристаллизации до 1150 °C. Количество метакристаллов новообразованного крупнопластинчатого биотита над Главной Хараелахской сульфидной залежью в роговиках местами достигает 30% их объёма, в приконтактовых габбро-долеритах до 20%. Таким образом, прошёл существенный привнос калия и, соответственно, вынос натрия. Возможно, что описанные Д. М. Туровцевым [54] альбититы в экзоконтактовых ореолах рудоносных интрузивов порождены околорудной биотитизацией.

В ряде ореолов флюидного воздействия место биотита занимают амфиболы – эденит, ферроэденит, Cl-К гастингсит, которые интенсивно замещали пироксены габбро-долеритов, и санидиноподобный K-Na полевой шпат, замещавший лабрадор.

На месторождении Норильск-І известны руды с «миндалекаменной» текстурой, развитые там, где интрузив внедрился в базальты ивакинской свиты с обильными газовыми пустотами. При застывании и сокращении в объёме интрузива сульфидные расплавы были из него в заметной степени выжаты. Часть их мигрировала в породы рамы и по сети тонких <0,05 мм трещин инъецировала вмещающие базальты. Возникли серии малых отливок сульфидных расплавов в газовых пустотах базальтов с поперечником 1-23, обычно 4-6 мм. Вдоль путей миграции сульфидных расплавов и вокруг сульфидных отливок базальты преобразованы на расстоянии 1-15, обычно 2-4 мм (рис. 7). Реакционные – фаялит, феррогортонолит (рис. 8), феррогиперстен, ферропижонит, высокотитанистые флогопит, анортит, санидин - развиты вдоль путей миграции сульфидных расплавов, вокруг и в сульфидных отливках. Минералы титанавгитовых базальтов с обилием Fe³⁺ замещены силикатами и оксидами с обилием Fe²⁺, то есть процесс прошёл при участии восстановленных флюидов. Оценки температур образования реакционных фаялита, феррогиперстена, ульвошпинели, флогопитабиотита - от 1150 до 780 °С.



Рис. 7. «Миндалекаменные» руды. Карьер Медвежий Ручей. Месторождение Норильск-I. Коллекция Э. А. Кулагова. Фото автора:

газовые пустоты в титанавгитовых базальтах ивакинской свиты заполнены сульфидным расплавом, который попал в них по сети микротрещин, вдоль которых базальты изменены и импреньированы сульфидами. 60 мм



Рис. 8. Продукт взаимодействия сульфидного расплава и титанавгитовых базальтов ивакинской свиты. Карьер Медвежий Ручей. Месторождение Норильск І. Фото автора:

реакционный железистый оливин – феррогортонолит на контакте и внутри сульфидной миниотливки. В проходящем свете, сверху при 1 николе, снизу – николи х. Поле зрения 5 мм

Эволюция – кристаллизационная дифференциация рудоносных сульфидных расплавов. Норильские руды – царство сульфидных твёрдых растворов

Как и в любых магмах, в сульфидных расплавах проходят процессы кристаллизационной дифференциации. В знаменитой статье 1927 г. в «Economic Geology» И. Фогт показал, что кристаллизация природных сульфидных расплавов идёт стандартно: в начале кристаллизуются Fe и Fe-Ni сульфиды (гексагональные, в дальнейшем названные Mss), которые бедны платиновыми металлами; позже кристаллизуются Fe-Cu и Fe-Cu-Ni сульфиды (кубические, в дальнейшем названные Iss), которые обогащены платиновыми металлами и золотом [74]. В норильских рудах такой тренд установил М. Н. Годлевский [11, 12].

По образному выражению М.Н. Годлевского, норильские руды – царство сульфидных твёрдых растворов (пирротин-пентландит, кубанит-халькопирит, халькопирит-пентландит) [11, 12, 16]. Позднее были установлены троилит и талнахит [5, 8, 30], моихукит и путоранит [8, 35, 43, 48, 55].

Тренд кристаллизационной дифференциации сульфидных расплавов обычный, с истощением Fe и накоплением Cu: Mss₁ (*T*_{крист.} ~1190–1150 °C, состав близкий к пирротину или троилиту с отклонением к пентландиту), $Mss_2 (T_{крист.} \sim 1100 \text{ °C}, \text{ состав заметно более}$ медистый, с отклонением к кубаниту или халькопириту), Iss₁ (*T*_{крист.} ~1000–950 °C, состав промежуточный между троилитом, кубанитом и пентландитом), Iss, (состав промежуточный между кубанитом, халькопиритом и пентландитом), Iss, и Iss, (состав промежуточный между халькопиритом, кубанитом и пентландитом), $Iss_5 (T_{крист} \sim 760 \text{ °C}, \text{ состав})$ промежуточный между халькопиритом и пентландитом). Этим обусловлено зональное строение сульфидных тел от малых капель до крупных залежей [8, 11, 12, 25, 30, 32, 43, 44, 51, 52, 55, 66 и др.]. Ni и Со примерно в равной степени рспределены во всех типах сульфидных твёрдых растворов. Состав тех и других близок к MeS.

В крупных сульфидных залежах и в мощных сульфидных жилах, отходящих от этих залежей, то есть при кристаллизации в условиях повышенных температур, состав кристаллов Mss более сернистый, приближающийся к Fe_7S_8 . Массовая кристаллизация Mss такого состава привела к тому, что поздние дифференциаты обеднены серой и из них кристаллизовались сульфидные твёрдые растворы Iss_{1-5} , недосыщенные серой [43, 44, 48].

На любой стадии кристаллизации сульфидных расплавов происходила сепарация кристаллов и остаточного расплава. В результате возникли руды,



Рис. 9. Вкрапленные руды – капельники. Талнахский рудный узел. Скв. РТ-2, глуб. 1442 м. Фото Н. Н. Жукова:

низы сульфидных капель слагают кристаллы ${\sf Mss}_{\scriptscriptstyle 2}$, верхи – агрегаты кристаллов Iss



Рис. 10. Сплошные сульфидные руды. Рудник Октябрьский, rop. -530 м. Коллекция и фото автора:

Несколько корродированные вкрапленники («острова») Iss_4 в матрице кристаллов Iss_5 . Iss_4 испытал полиморфный переход кубический —> тетрагональный и распад на халькопирит (матрица) и кубанит (ламелли). Iss_5 испытал полиморфный переход кубический —> тетрагональный. Из обоих выделился пентландит. 86 × 55 мм сложенные кристаллами Mss_1 , Mss_1 и Mss_2 , Mss и Iss (рис. 9). Нередко агрегаты Mss пересечены жилками позднего медистого сульфидного расплава. При кристаллизации медистого сульфидного расплава возникли руды, сложенные кристаллами Iss_1 , Iss_2 , Iss_3 , Iss_4 , Iss_5 (рис. 10), Iss_5 (рис. 11).

Перед завершением кристаллизации крупных тел Fe-Cu-Ni сульфидных расплавов, залегающих среди роговиков под интрузивами, при общем сокращении объёмов произошло выжимание остаточных существенно медистых расплавов, обогащённых благородными металлами, в прилегающие роговики. Частично это были инъекции, большей частью – импреньяции. Возникли импреньяционные, так называемые «медистые руды» (рис. 12).



Рис. 11. Сплошные сульфидные руды. Рудник Маяк, гор. -330 м. Коллекция и фото автора:

агрегат крупных кристаллов lss_5 ; lss_5 испытал полиморфный переход кубический —> тетрагональный и распад на халькопирит (матрица) и пентландит (скелетные кристаллы). 140 × 86 мм



Рис. 12. Импреньяционные «медистые руды». Рудник Таймырский. Рудное тело – 1400 м. Коллекция В. В. Бутенко, фото автора:

приконтактовые роговики, пропитанные медистым расплавом. 180 мм

Графические руды – продукты кристаллизации поздних Pb-Cu-Fe-Ni-S расплавов

Уникальная особенность Норильских месторождений – наличие эвтектических руд, сложенных графическими срастаниями PbSss–Iss₃₋₅, продуктами кристаллизации поздних легкоплавких (*T*_{крист} ~550 °C)



Рис. 13. Фрагмент жилы графических руд. Октябрьский рудник, гор. -630 м. Коллекция и фото автора:

графические руды — срастания кристаллов PbSss, превращённого в галенит (ламелли) и алтаит (мельчайшие тельца распада), и Iss_s, превращённый в халькопирит (матрица) и пентландит (тельца распада). 47 × 47 мм

сульфидных Pb-Fe-Cu-Ni расплавов. Сульфидные руды – эвтектические срастания слагают гнёзда размером от первых до 15–30 см и секущие жилы нескольких поколений мощностью от 2–3 до 150 см (в исключительных случаях до 3 м) и длиной до 3–15 м в различных частях залежей массивных существенно медистых сульфидных руд (преимущественно в их кровле) в интрузивных породах, а также в роговиках, которые эти руды окружают. Наиболее многочисленны такие гнёзда и жилы в верхней части Главной Хараелахской сульфидной залежи (рис. 13). Причина их появления – обилие К и когерентного Pb в норильских рудно-магматических системах [43].

Графические руды уникально богаты Pd, Pt, Ag, Au, содержат в среднем и (до): Pd – 1200 г/т (5300), Pt – 540 г/т (6120), Ag – 1220 г/т (2990), Au –17 г/т (88) [44, 49]. Гнёзда и жилы этих руд и непосредственно окружающие их агрегаты сульфидов Cu-Fe-Ni содержат обильную минерализацию Pd, Pt, Ag, Au, включая скопления сперрилита до 45 см.

Субсолидусные твёрдофазные превращения сульфидных твёрдых растворов

При субсолидусных превращениях Mss₁, слагающий нижние части сульфидных капель, превратился в матрицу железистого пирротина с пластинчатыми ламеллями пентландита и тонкими «змеевидными» ламеллями троилита (рис. 14). Iss, слагающий верхние части сульфидных капель, распался на железистый пирротин и решётчатые срастания халькопирита и кубанита (рис. 15).

При субсолидусных превращениях бедный серой Iss, превратился в срастания троилита и (или) железистого пирротина и кубанита с пентландитом. Обогащённый серой Iss, превратился в срастания преобладающего магнитного моноклинного пирротина и халькопирита с пентландитом. При субсолидусных превращениях бедный серой Iss, превратился в агрегаты кубанита (± халькопирит) с включениями пентландита. Обогащённый серой Iss, трансформировался в срастания примерно равных количеств пирротина и халькопирита с включениями пентландита. При субсолидусных превращениях Iss, и Iss, превратились в пластинчатые срастания кубанита и халькопирита с включениями пентландита. При субсолидусных превращениях Iss, превратился в агрегаты сдвойникованных кристаллов халькопирита с включениями скелетного пентландита. Описанная картина характерна для большинства сульфидных жил и залежей рудного поля. В некоторых других, включая Главную Хараелахскую сульфидную залежь, картина более сложная. В низах этих залежей - масса обогащённых серой Mss, и Mss, которые распались на магнитный сернистый пирротин (матрица)



Рис. 14. Вкрапленные руды – «капельники» в плагиоперидотитах Талнахского интрузива. Коллекция В. К. Степанова:

низы сульфидной капли. Продукты субсолидусных превращений сульфидного твёрдого раствора Mss₁: железистый пирротин (матрица), пентландит (светлые ламелли), троилит (сероватые змеевидные ламелли). В отражённых электронах



Рис. 15. Вкрапленные руды – «капельники» в плагиоперидотитах Талнахского интрузива. Коллекция В. К. Степанова:

верхи сульфидной капли. Продукты субсолидусных превращений сульфидного твёрдого раствора lss: железистый пирротин (коричневатый) и решётчатые срастания кубанита (сероватый) и халькопирита. В отражённом свете при 1 николе

и ламелли пентландита и с тельцами халькопирита в Mss₂. Поэтому среди поздних продуктов кристаллизации сульфидных расплавов в этих залежах обильны минералы группы халькопирита, недосыщенные серой – талнахит $Cu_{18}Fe_{16}S_{32}$ [5, 30], моихукит $Cu_{18}Fe_{18}S_{32}$ [35, 55] и путоранит Cu_{17} (Fe, Ni)₁₈S₃₂ [48, 55]. Картина минеральной зональности в этом случае довольно сложная.

Iss эвтектических руд испытал распад на халькопирит + пентландит ± кубанит, халькопирит + талнахит + пентландит ± кубанит, редко на халькопирит + + моихукит + пентландит или путоранит + моихукит. PbSss эвтектических руд испытал распад на галенит Pb (S_{7Te}) и алтаит Pb (Te,_S). Оценки температуры распада по соотношению серы и теллура в галените и алтаите и по содержанию в них селена от 507 до 420 °C, чаще – 490–470 °C [26]. Это верхний предел температуры образования минералов Pd и Pt, которые замещали структуры распада PbSss.

Флюидная дифференциация рудоносных сульфидных расплавов

Сульфидные расплавы рудоносных интрузивов были богаты флюидами. Около каждого тела магматических сульфидов от миниотливок до гигантских тел развиты ореолы флюидного воздействия. Масштаб флюидных ореолов коррелирован с размером тел магматических сульфидов: около миниотливок до 4 мм, около капель – до 12 мм, около огромной Главной Хараелахской залежи сплошных руд – до 15-20 м [43]. Ореолы флюидного воздействия слагают высокотитанистые биотит и флогопит, гидроксилфторхлорапатит и хлорапатит, гидроксилхлорфторапатит и фторапатит, гастингсит, эденит, ангидрит, титаномагнетит, ильменит с ламеллями бадделеита, щелочные хлорсодержащие сульфиды – джерфишерит и бартонит [8, 11, 45, 70 и др.]. По данным ГРО рудника Комсомол, над центральной частью Хараелахской сульфидной залежи на расстоянии до 15 м от её верхнего контакта любые типы пород содержат в 1,5-2 раза больше Pd, Pt, Au, чем аналогичные породы, расположенные на этом же уровне в стороне. Это результат флюидного воздействия кристаллизующегося сульфидного расплава.

Судя по существенно гидроксильному составу тёмных слюд и амфиболов, вначале в составе флюидов преобладал водяной пар. Благодаря обилию калия практически вся масса водяного пара была связана в биотите, заметная часть в гастингсите и эдените. Далее, судя по эволюции состава пневматолитового апатита, на первое место во флюидах вышел хлор, в дальнейшем – фтор, а также восстановленные газы – монооксид углерода, углеводороды, возможно, и фуллерены и др. Это и обусловило специфический состав минералов благородных металлов, которые возникли при флюидной переработке платиноид- и серебросодержащих сульфидных твёрдых растворов – продуктов кристаллизации сульфидных расплавов рудоносных интрузивов. Среди них – интерметаллиды системы Pt-Fe, станниды, висмутиды, плюмбиды, куприды, теллуриды и арсениды Pd-Pt, палладогерманид, минералы Au-Ag, Au-Ag-Cu, гессит, а также алтаит [2, 8, 19, 30, 43, 44, 48, 49, 61, 70, 71].

Минерализация благородных металлов первичных норильских сульфидных руд

Благородные металлы первоначально были растворены в сульфидных расплавах, при кристаллизации которых произошла их селекция, так как Ru, Rh, Os, Ir – это Mss-совместимые металлы, a Pt, Pd, Ag, Au – это Iss-совместимые металлы. По этой причине руды, сложенные в основном Mss,- руды существенно пирротинового состава, содержат заметные количества Rh (до 20 г/т), Os, Ru и первые г/т Pd, Pt, Аg. Руды, сложенные Iss, - существенно медистые, богатые кубанитом и минералами группы халькопирита, бедны Rh, Os, Ru, содержат десятки-первые сотни г/т Pd, Pt, Ag и от первых до десятков г/т Au. Уникальные концентрации благородных металлов и их минералов содержат графические руды - эвтектические срастания PbSss, Iss, и медистые сульфидные руды в экзоконтактах жил графических руд; содержание Pd, Pt, Ag в них достигает многих кг/т, Аи – сотни г/т [44, 49].

Несмотря на то, что изучению Ag-Au-Pt-Pd минерализации посвящены многочисленные исследования [2, 8, 11, 12, 16, 19, 20, 25, 26, 30, 34, 40, 42–44, 46, 48-50, 61, 66, 70, 71 и др.], мы только начинаем понимать реальную, весьма непростую картину и длительную историю формирования минералов благородных металлов в норильских рудах. Преобладающее количество Rh, Ru, Os, Ir рассеяно в минералах группы пирротина и в пентландите [66]. Основная масса Pd, Pt, Au, Ag в норильских рудах представлена собственными минералами, часто микронного размера [25, 34, 43, 44, 48]. Заметная часть Pd и Ag рассеяна в пентландите, Ag - в кубаните и халькопирите [30]. Минералы благородных металлов примерно однотипны во всех разновидностях руд – от пирротиновых до кубанитовых, халькопиритовых, талнахитовых, моихукитовых, путоранитовых, заметно меняются лишь их содержание и количественные соотношения [25, 34, 43, 49].

Все типы минералов платиновых металлов и Au-Ag слагают метасоматические образования, метакристаллы, гнёзда, простые и сложные, ветвящиеся прожилки, замещают все типы магматогенных сульфидов и продукты их субсолидусных превращений (рис. 16).

Ареалы распространения минералов благородных металлов шире контуров сульфидных залежей и со-

впадают с ореолами воздействия флюидов, выделившихся при кристаллизации сульфидных расплавов. Среди этих образований в 6 метрах выше кровли Главной Хараелахской сульфидной залежи в роговиках без сульфидов в гнезде амфибола и Ті биотита находился кристалл сперрилита длиной 8 мм (рудник Октябрьский, горизонт -530 м) [43]. В мандельштейновых рудах Норильска-І над сульфидными миниотливками в силикатной матрице титанавгитовых базальтов вне сульфидов развиты многочисленные мельчайшие метакристаллы тетраферроплатины, атокита, рустенбургита, майчнерита, электрума, маякита, полярита, паоловита, котульскита и др. [42, 43, 44].

В верхней приконтактовой части Главной Хараелахской сульфидной залежи крупнокристаллические пентландит-халькопирит-талнахитовые руды с гнёздами эвтектических руд с галенитом (рудник Октябрьский, горизонт -800 м) содержат метакристаллы соболевскита Pd (Bi, Te), окружённые каймами



Рис. 16. Сплошные сульфидные руды у кровли Главной Хараелахской сульфидной залежи. Рудник Октябрьский, гор. -710 м. Коллекция С. Н. Белякова:

метакристаллы соболевскита (белые) около контакта галенита (светлый слева вверху) и талнахитовой матрицы (чёрная). Центральный метакристалл соболевскита окружён зональной каймой джерфишерита и талфенисита. На джерфишерит – талфенисит нарос электрум (светло-серый). Электрум также выполняет сеть тонких трещин в талнахите. В отражённых электронах хлорсодержащих щелочных сульфидов, богатых калием и таллием – джерфишерита K_6 (Fe, Cu, Ni)₂₄ S_{26} Cl – талфенисита Tl₆ (Fe, Cu, Ni)₂₄ S_{26} Cl (см. рис. 16). Это прямое доказательство пневматолитового генезиса минералов палладия в норильских сульфидных рудах.

Итак, генезис минералов благородных металлов в норильских рудах – пневматолитовый [43, 44, 49]. При их формировании Pt, Au, Sn, Te, As, Sb, Bi и часть Pd и Ag привнесены флюидами, возникшими при кристаллизации сульфидных, расплавов. Си, Pb, Fe, Ni и часть Pd и Ag заимствованы из сульфидов рудных тел (так, маякит PdNiAs и меньшиковит Pd₂Ni₂As₂ заместили пентландит, звягинцевит Pd, Pb и плюмбопалладинит Pd₅Pb₃ – галенит). Пневматолитовые минералы Pd и Pt представлены интерметаллидами. Это станниды, висмутиды, плюмбиды, куприды и близкие теллуриды, арсениды, антимониды. Поскольку норильские руды – крупнейшее скопление палладия в Мире, постольку они содержат множество его минералов. Сульфидов среди них нет. С ними ассоциируют минералы Аи-Си и Аи-Аg. Распределены минералы благородных металлов крайне неравномерно. В одних участках руд преобладают теллуриды Pd (соболевскит и др.), в других – станниды Pd (паоловит или атокит и др.) и Pt (нигглиит), в третьих – арсениды Pd (маякит и др.) и Pt (сперрилит), в четвёртых – висмутиды Pd (фрудит) и Pt (инсизваит), в пятых – антимониды Pd (стибиопалладинит, котульскит) и Pt (геверсит), в шестых – плюмбиды Pd (полярит, звягинцевит), в седьмых - минералы Рt-Fe и др. Размер таких участков от первых мм до метров. Наиболее характерны полиминеральные срастания минералов Pd-Pt-Au-Ag. Размер таких срастаний достигает 2-3 см. С минералами благородных металлов ассоциируют метасомы алтаита размером до 11 см.

Условия образования пневматолитовых минералов благородных металлов норильских руд: верхний предел 490 °С (температура распада PbSss); две стадии формирования: 1) при кристаллизации сульфидных расплавов захват благородных металлов в сульфидные твёрдые растворы; 2) флюидная переработка Mss, Iss, PbSss и кристаллизация минералов Pd, Pt, Au, Ag в резко восстановительных условиях при $T \approx 450-350$ °C, при крайне низкой фугитивности сульфидной серы; судя по ассоциации многих минералов Pd-Pt с тетрааурикупридом, температура их образования ниже 390-385 °C - это верхний предел устойчивости тетрааурикуприда [67]. Возможно, что транспорт благородных металлов происходил в форме карбонилов, весьма устойчивых при повышенных температурах [3]. Об участии в процессах рудогенеза углеродистых соединений «угольного» происхождения свидетельствует присутствие в норильских рудах палладогерманида Pd_2Ge [61] и когенита Fe_3C [8], сходство изотопного состава углерода в норильских рудах и углях тунгусской серии норильского региона [68].

О реальной длительности формирования норильских рудно-магматических систем

Редкий случай, когда возраст рудных образований строго определён. Изотопный U-Pb возраст по циркону и бадделеиту рудоносных габбро-долеритов – 251,2±0,3 Ма [60]. Практически те же датировки получены Rb/Sr и Ar/Ar методом по плагиоклазу и биотиту пород рудоносных интрузивов и Re/Os методом по сульфидным рудам [58]. Этот возраст соответствует границе пермского и триасового периодов, установленной по морской фауне в стратотипе Мейшань в Южном Китае, для которой получена изотопная датировка - 251,2±0,3 Ма [57]. В северовосточной части Восточно-Сибирской платформы развиты траппы, аналогичные норильским, U-Pb возраст которых по циркону и бадделеиту - 251,7±0,5 Ма [59], и более молодые щелочные базальтоиды и ультраосновные-щелочные породы Маймеча-Котуйской провинции, U-Pb возраст которых по циркону и бадделеиту и U-Th-Pb возраст по перовскиту -250,2±0,3 Ма [59]. Одни из характерных магматических образований Маймеча-Котуйской провинции дайки щелочных лампрофиров, в их числе арфведсонит-флогопитовые минетты лампроитовой серии, богатые высокостронциевым апатитом. Точно такие же дайки в Норильском рудном поле в руднике Заполярном пересекли рудоносный интрузив и магматические сульфидные руды [45]. Таким образом, реальная длительность формирования рудно-магматических систем Норильского рудного поля не превышает 1,5 Ма.

Возможная импактная инициация гигантской Сибирской трапповой формации и уникальных Норильских месторождений

По представлениям ведущих петрологов [56 и др.], сибирская трапповая формация порождена суперплюмом – мощным потоком вещества и энергии – примерно от границы жидкого ядра Земли к её поверхности. Возраст сибирской трапповой формации точно отвечает границе пермского и триасового периодов – 251±1 Ма. Именно в это время произошла одна из самых крупных экологических катастроф на Земле – вымерло более 70% всей биоты того времени. Считалось, что причиной этой экологической катастрофы были грандиозные извержения сибирских платобазальтов с колоссальным выбросом серы, хлора, фтора.

В чём возможная причина возникновения плюма гигантского масштаба, породившего платобазальтовую формацию? Возможные ответы появились из Антарктиды и Китая. В районе Земли Уикса на востоке Антарктиды обнаружен самый крупный из известных на нашей планете астероидный кратер. Диаметр его воронки правильной округлой формы составляет 482 км, то есть крупное космическое тело ударило почти перпендикулярно к поверхности континента. Учёные убеждены, что возраст кратера 251 Ма, так как в Китае в регионе Мейшань на границе фаунистически охарактеризованных слоёв верхней перми и нижнего триаса обнаружен горизонт с металлическими частицами космического происхождения. Представляется, что причиной крупнейшей экологической катастрофы на границе пермского и триасового периодов было именно мощнейшее импактное событие, а крупномасштабные извержения сибирских траппов - его возможное следствие.

Физики полагают жизнеспособным следующее предположение [44]. Мощная гидравлическая ударная волна от падения крупного космического тела 251 Ма тому назад дошла до жидкого ядра Земли, прошла через него и вызвала на противоположной стороне жидкого ядра выброс вещества и энергии, спровоцировав возникновение суперплюма – «прародителя» сибирской трапповой формации и генетически связанных норильских месторождений сульфидных Ni-Cu-Pd руд. Палинспастическая реконструкция на время 250 Ма тому назад этому не противоречит.

С этим предположением согласуется и необычайное богатство норильских руд Pd и Pt. Сравним два крупнейших месторождения платиновых металлов – Бушвелд в Южной Африке и Норильск в Сибири. Объём магматической системы Бушвелда ~500 000 км³, магматической системы Норильска ~25 км³. При разнице в объёме в 2000 раз ресурсы палладия Норильска больше Бушвелда в 4 раза, платины – только в 5 раз меньше. Таким образом, производительность магматической системы Норильска превышает таковую для Бушвелда по Pd примерно в 10 000 раз, по Pt в 500 раз. Известно, что в планетах Земной группы максимальная концентрация платиновых металлов сосредоточена в их металлических ядрах и в низах мантии [17, 66].

Миллерит, годлевскит и иные низкотемпературные сульфиды в норильских рудах

Миллерит и иные низкотемпературные сульфиды Ni и Cu довольно широко распространены среди магматогенных сульфидных руд месторождения Норильск-I [11, 16, 32]. Широкое распространение подобных минералов и минеральных ассоциаций, наложенных на магматогенные норильские сульфидные руды, установлены в работах [4, 8, 19, 24, 25, 30, 31, 43, 47–50, 54, 71 и др.]. М. Н. Годлевский рассматривал их как поздние низкотемпературные послемагматические гидротермальные производные трапповой формации. Из-за широкого распространения таких минеральных ассоциаций в рудах месторождения Норильск-I ряд геологов рассматривал норильские сульфидные руды как гидротермальные [39 и др.].

В дальнейшем было установлено, что низкотемпературные сульфиды Ni (миллерит, годлевскит, хизлевудит, никелистые пирит и макинавит и др.) и низкотемпературные сульфиды Cu (халькозин, борнит, валлериит и др.) норильских руд являются производными эпигенетичного послетраппового низкоградного метаморфизма в условиях цеолитовой, затем более высокотемпературной пренит-пумпеллиитовой, далее вновь цеолитовой фации [43, 50, 71]. Rb/Sr возраст процессов метаморфизма по апофиллиту и по метабазальтам – первая дата 232 Ma (начало процессов метаморфизма), последняя 122 Ma (завершение процессов метаморфизма) [71].

Каждый образец норильских магматических пород и магматогенных сульфидных руд содержит микропрожилки метаморфогенно-гидротермальных магнетита, макинавита, валлериита, гизингерита, возникшие при участии вадозных вод. Поэтому понятно, почему изотопный состав кислорода норильских пород отличен от стандартного, изотопия кислорода норильских магматогенных сульфидных руд - «гидротермальная» [36], изотопный состав аргона богатых сульфидных руд – воздушный [1], при том, что изотопный состав гелия в тех же образцах мантийный [1]. Последовательность метаморфогенногидротермальных рудных образований: 1) миллеритпирит-халькопирит; 2) халькопирит-пирротин-ангидрит; 3) борнит-пирит, борнит-магнетит; 4) хизлевудит-халькозин; 5) макинавит-магнетит-валлериит; 6) валлериит-карбонат-корренсит-хлорит-магнетит; 7) кварц-гизингерит±игольчатый кубанит. Нередко разновозрастные метаморфогенно-гидротермальные образования фиксируются в одном обнажении (рис. 17). При интенсивном преобразовании первичных руд под действием метаморфогенных флюидов с высоким f O₂ сульфиды были полностью замещены ангидритом и гематитом.

Среди низкоградно метаморфизованных норильских сульфидных руд развита рассеянная вкрапленная регенеративная метаморфогенно-гидротермальная минерализация Ag – не содержащее Au самородное серебро, Hg серебро, богатый Ag борнит, аргентопентландит, ленаит, акантит, пираргирит, штромейерит [30, 44, 47, 48]; Pt самородная – продукт


Рис. 17. Метаморфизованные сплошные сульфидные руды у кровли Главной Хараелахской сульфидной залежи. Рудник Октябрьский, гор. -800 м. Фото автора:

моихукитовые руды с крупным пентландитом (под перчаткой) последовательно замещены преобладающими борнитом (сиреневый), валлериитом (тёмно-серый), гизингеритом (серый)

деарсенизации сперрилита [20], куперит, брэггит [8, 49], хараелахит [19]; Pd – палладоарсенид, винсентит и самородный палладий – продукты деарсенизации маякита [44, 71], высоцкит [8, 49, 71], беспримесный звягинцевит [48].

Арсениды Fe-Ni-Co в норильских сульфидных рудах

Арсениды – характерные гидротермальные образования в магматических норильских сульфидных рудах [13]. М.Н. Годлевский рассматривал арсениды как поздние низкотемпературные послемагматические гидротермальные производные трапповой формации. В дальнейшем было установлено, что вкрапленность арсенидов и карбонатные и ангидрит-карбонатные жилы с арсенидами и антимонидами Fe, Ni и Co-Co-Ni-Sb-As минерализация моложе на 80-100 млн лет, чем трапповая формация, и развита только среди метаморфизованных Со-Ni-Си руд с миллеритом, валлериитом, годлевскитом и др. Модельный Pb-Pb возраст галенита арсенидно-карбонатных жил – 144 Ма, галенита карбонатных жил с минералами серебра и уранинитом - 110 Ма [46, 71]. Параметры образования рудных и жильных минералов: *T* – 270–120 °С и *P* – 1–0,6 кбар, они возникли при повышенной f O, и низкой активности сульфидной серы [47]. Основной источник рудных элементов для Co-Ni-Sb-As минерализации - метаморфизуемые

Ag-Au-Pt-Pd Co-Ni-Cu сульфидные руды. При процессах низкоградного метаморфизма произошла заметная мобилизация As, Pb, Zn, Co, Ni, Sb, Ag, Se, Mn, Cd, незначительное перераспределение Pd и Pt, признаки мобилизации Аи не обнаружены. Масштаб миграции Pb и As – не менее десятков м; Zn, Co, Ni, Sb, Hg, Se – более скромный; Cd, Mn, Pd, Pt – не более первых см. Изотопный состав Pb галенита арсенидно-карбонатных жил близок составу Рb континетальной коры, изотопный состав свинца галенита карбонатных жил с арсенидами, минералами серебра и уранинитом отвечает свинцу пород континентальной земной коры [46], тогда как изотопный состав Pb первичных сульфидных руд близок к мантийному [76]. Это свидетельствует о различных источниках вещества первичных сульфидных руд и арсенидно-карбонатных жил. Норильская метаморфогенно-гидротермальная Co-Ni-Sb-As минерализация с карбонатами, гематитом, сульфидами Zn, Pb, Cu, Ni, Mn, Ag, Bi, Cd, Sb, селенидами Pb и Ag, самородными мышьяком, серебром и висмутом, уранинитом – это пятиметалльная U-Ag-Bi-Ni-Со формация малого масштаба.

Процессы эпигенетичного низкоградного метаморфизма обусловили крайнее разнообразие (>450) минеральных видов Норильского рудного поля, резко усложнили минеральный состав его руд и, следовательно, схемы их переработки.

Некоторые замечания о методике изучения норильских сульфидных руд

Во многих типах норильских руд размер слагающих их кристаллов высокотемпературных сульфидных твёрдых растворов превышает 7–10 см. Поэтому исследование норильских руд прямым изучением аншлифов небольшого размера, выполненное А.Д. Генкиным для главного минерала норильских руд – пирротина [7], скорее затормозило изучение норильских руд. Исследование норильских руд необходимо начинать с анализа их текстур и только после этого переходить к рассмотрению микродеталей их строения.

Заключение

Месторождения Норильского рудного поля – плутоногенные. Источник расплавов рудоносных интрузивов и основной массы сульфидных руд – глубинный или сверхглубинный мантийный. Мантийные промежуточные магматические очаги Норильского и Талнахского рудных узлов – различные. Рудоносные интрузивы, одни из наиболее поздних производных трапповой формации P₂–T₁, внедрились синхронно с процессом смятия вулканитов трапповой формации. Не менее трети сульфидной массы залежей сплошных руд возникли при процессах сульфуризации на уровне становления интрузивов. Источник серы – сернистые газы, возникшие при сульфатредукции осадочных ангидритов под действием восстановленных газов, порождённых контактовым метаморфизмом углей и нафтидов около рудоносных интрузивов. Из-за неравномерной нагрузки на кровлю рудоносных интрузивов большая часть сульфидных расплавов была выжата в их головную часть. Этим в первую очередь и объясняется «ненормальное» соотношение мощности рудоносных интрузивов и сульфидных залежей. Тренд кристаллизационной дифференциации сульфидных расплавов обычный, с истощением Fe и накоплением Cu: Mss, (*T*_{крист.} ~1190–1150 °С, состав близкий к пирротину или троилиту с отклонением к пентландиту), Mss, $(T_{_{\rm KDHCT}} \sim 1100 \,^{\circ}{\rm C}$, состав заметно более медистый, с отклонением к кубаниту или халькопириту), Iss, (*T*_{крист} ~1000–950 °C, состав промежуточный между троилитом, кубанитом и пентландитом), Iss, (состав промежуточный между кубанитом, халькопиритом и пентландитом), Iss, (состав промежуточный между халькопиритом, кубанитом и пентландитом), Iss₄, Iss₅ ($T_{\text{крист}} \sim 760 \text{ °C}$, состав промежуточный между халькопиритом и пентландитом). Этим обусловлено зональное строение сульфидных тел от малых капель до гигантских залежей. В крупных сульфидных залежах и в мощных сульфидных жилах, от-

ходящих от этих залежей, то есть при кристаллизации в условиях повышенных температур, состав кристаллов Mss более сернистый, приближающийся к Fe₇S₆. Массовая кристаллизация Mss такого состава привела к тому, что поздние дифференциаты обеднены серой и из них кристаллизовались сульфидные твёрдые растворы Iss₁₋₅, недосыщенные серой; среди продуктов их твёрдофазных превращений – талнахит, моихукит, путоранит. На любой стадии кристаллизации сульфидных расплавов происходила сепарация кристаллов и остаточного расплава. Уникальная особенность Норильских месторождений – наличие руд, сложенных графическими срастаниями сульфидных твёрдых растворов PbSss и Iss₃₋₅, продуктами кристаллизации поздних легкоплавких (*T*_{крист.} ~550 °C) сульфидных Pb-Fe-Cu-Ni расплавов. Эти руды крайне богаты Pd, Pt, Au, Ag и их минералами.

Реальная длительность формирования норильских рудно-магматических систем не превышает 1,5 Ма.

Минеральный состав горных пород и руд Норильского рудного поля в заметной степени был преобразован при процессах эпигенетичного послетраппового низкоградного метаморфизма в условиях цеолитовой и пренит-пумпеллиитовой фаций. Часть руд была превращена в агрегаты валлериита, гизингерита, гематита и др., что резко усложнило технологию их переработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Адамская Е.В., Петров О.В., Прасолов Э.М. [и др.] Изотопная геология норильских месторождений. – СПб. : ВСЕГЕИ, 2017. – 348 с.
- Бегизов В. Д. Минералы благородных металлов в рудах Талнахского месторождения: специальность 04.00.08 «Петрография, вулканология»: дис. на соискание учён. степ. канд. геол.-минерал. наук / Бегизов Виктор Дмитриевич. – М. : МГРИ, 1977. – 197 с.
- 3. *Белозерский Н.А.* Карбонилы металлов. М. : Металлургия, 1958. 272 с.
- Будько И. А., Изоитко В. М., Кулагов Э. А., Митенков Г.А. Макинавит и валлериит в рудах Норильска и Талнаха // Ученые записки НИИГА. Региональная серия. – 1966. – Вып. 5. – С. 203–209.
- Будько И.А., Кулагов Э.А. Новый сульфид меди и железа – талнахит // Записки ВМО. – 1968. – Ч. 97, Вып. 1. – С. 63–70.
- Васильев Ю. Р. Петрология и черты строения сложно дифференциированной трапповой интрузии Норильск II // Геология и петрология интрузивных траппов Сибирской платформы. – Новосибирск : Наука, 1966. – С. 5–112.

- 7. Генкин А.Д., Логинов В.П., Органова Н.И. О взаимоотношениях и особенностях размещения гексагональных и моноклинных пирротинов в рудах // Геология рудных месторождений. – 1965. – Т. 7, № 1. – С. 3–24.
- Генкин А.Д., Филимонова А.А., Евстигнеева Т. Л. [и др.] Сульфидные медно-никелевые руды норильских месторождений. – М.: Наука, 1981. – 234 с.
- 9. Геологическая карта Норильского рудного района масштаба 1:200 000. Норильск, 1994.
- Глубинное строение территории СССР / В.В. Белоусов (отв. ред.), Н.И. Павленкова, А.В. Егоркин [и др.]. – М.: Наука, 1991.–238 с.
- Годлевский М.Н. Кристаллизационная дифференциация сульфидного расплава на примере Норильских медно-никелевых месторождений // Материалы по геологии и полезным ископаемым Сибирской платформы. – Л. [СПб.] : ВСЕГЕИ, 1960. – С. 95–101.
- Годлевский М. Н. Поведение арсенидов и сульфидов никеля и кобальта при послемагматических процессах // Проблемы кристаллохимии минералов и эндогенного минералообразования. – М. : АН СССР, 1967. – С. 211–221.
- Годлевский М. Н. Траппы и рудоносные интрузии Норильского района. – М. : Госгеолтехиздат, 1959. – 68 с.

- Годлевский М. Н., Гриненко Л. Н. Некоторые данные об изотопном составе серы сульфидов Норильского месторождения // Геология и геофизика. – 1963. – № 1. – С. 35–39.
- Годлевский М. Н., Кравцов Г. С., Сливко В. М. Вопросы теплообмена интрузива и вмещающих пород и контактовый термометаморфизм углей вблизи трапповых интрузивов // Геология и геофизика. – 1962. – № 2. – С. 6–24.
- Годлевский М. Н., Шумская Н. И. Халькопирит-миллеритовые руды месторождения Норильск І // Геология рудных месторождений. – 1960. – № 6. – С. 61–72.
- 17. Гольдшмидт В. М. Сборник статей по геохимии редких элементов. – М.–Л. [СПб.] : ГОНТИ, 1938. – 244 с.
- Доу Б. Р., Зартман Р. Е. Плюмботектоника фанерозоя // Геохимия гидротермальных рудных месторождений. – М. : Мир, 1982. – С. 28–70.
- Евстигнеева Т.Л., Генкин А.Д. Платинометалльная минерализация норильских медно-никелевых руд: природные и экспериментальные данные // Геология медно-никелевых месторождений СССР.– Л. [СПб.]: Наука, 1990.– С. 98–106.
- 20. *Евстигнеева Т.Л., Ким А.А., Некрасов И.Я.* О деарсенизации сперрилита в природе // Минералогический журнал. 1990. Т. 12, № 3. С. 90–96.
- Золотухин В. В. Базитовые пегматоиды норильских рудоносных интрузивов и проблема генезиса платиноидно-медно-никелевого оруденения норильского типа. – Новосибирск: СО РАН, 1997. – 88 с.
- Золотухин В. В. О находке фаялитсодержащих метасоматитов в рудах Норильска // Доклады АН СССР. – 1971. – Т. 198. – С. 692–695.
- Золотухин В. В. Обобщенная модель сульфидного Cu-Ni рудообразования как процесса сульфуризации // Рудообразование и генетические модели эндогенных рудных формаций. – Новосибирск : Наука. – 1988. – С. 172–182.
- 24. Золотухин В. В., Рябов В. В., Васильев Ю. Р., Шатков В. А. Петрология Талнахской рудоносной дифференциированной трапповой интрузии. – Новосибирск : Наука. – 1975. – 434 с.
- 25. *Изоитко В. М.* Технологическая минералогия и оценка руд. – СПб. : Наука. – 1997. – 582 с.
- Коваленкер В. А., Лапутина И. П., Павлов Е. Г. О распаде природного твёрдого раствора в системе PbS PbTe // Упорядочение и распад твёрдых растворов в минералах. М. : Наука, 1979. С. 185–190.
- 27. *Котульский В.К.* К вопросу о происхождении магматических медно-никелевых месторождений // Доклады АН СССР. – 1946. – Т. 51. – С. 381–384.
- 28. *Криволуцкая Н.А.* Формирование Pt-Cu-Ni месторождений в процесе эволюции траппового магматизма в Норильском регионе // Геология рудных месторождений. – 2011. – Т. 53, № 4. – С. 309–339.
- Криволуцкая Н.А., Рудакова А.В. Строение и геохимические особенности пород трапповой формации Норильской мульды (СЗ Сибирской платформы) // Геохимия. – 2009. – № 7. – С. 675–698.
- 30. *Кулагов Э.А.* Особенности минерального состава руд месторождения Норильск-I: специальность 127: дис.

на соискание учён. степ. канд. геол.-минерал. наук/ Дисс. канд. геол-мин. наук / Кулагов Эдуард Авксентьевич. – М. : МГУ, 1968. – 239 с.

- 31. *Кулагов Э. А., Евстигнеева Т. Л., Юшко-Захарова О. Е.* Новый сульфид никеля – годлевскит // Геология рудных месторождений. – 1969. – Т. 11. № 3. – С. 115–121.
- 32. *Лихачёв А. П.* Платино-медно-никелевые и платиновые месторождения. – М. : Эслан. – 2006. – 496 с.
- Масайтис В. Л. Пермский и триасовый вулканизм Сибири: проблемы динамических реконструкций // Записки ВМО.– 1983.– Ч. 112, Вып. 4.– С. 412–425.
- 34. Митенков Г.А., Кнауф В.В., Ерцева Л. Н. [и др.] Минералы элементов группы платины в сплошных пирротиновых рудах Талнаха // Основные проблемы в учении о магматогенных рудных месторождениях. – М. : Наука, 1997. – С. 284–285.
- 35. Муравьёва И.В., Евстигнеева Т.Л., Филимонова А.А., Малов В.С. Первая находка моихукита в медно-никелевых рудах Октябрьского месторождения (Норильский район) // Геология рудных месторождений. – 1972. – Т. 14. № 3. – С. 94–97.
- Покровский Б.Г., Служеникин С.Ф., Криволуцкая Н.А. Изотопный состав кислорода и водорода в трапповых интрузивах Норильского района // Доклады РАН.– 2002. – Т. 383. – С. 675–679.
- Радько В.А. Модель динамической дифференциации интрузивных траппов северо-запада Сибирской платформы // Геология и геофизика. – 1991. – № 11. – С. 19–27.
- Радько В.А. Фации интрузивного и эффузивного магматизма Норильского района. – СПб. : Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2016. – 226 с.
- Роговер Г.Б. Месторождение Норильск-1, некоторые его особенности, могущие иметь поисковое значение, и рациональная методика его разведки. – М. : Госгеолтехиздат, 1959. – 168 с.
- Служеникин С. Ф., Дистлер В.В., Кравцов В. Ф. [и др.] Малосульфидное платиновое оруденение в Норильских дифференцированных интрузивах // Геология рудных месторождений. – 1994. – Т. 36, № 3. – С. 195–217.
- 41. Спиридонов Э. М. Анортозитовая тенденция магматической дифференциации // Проблемы магматизма Балтийского щита. – Л. : Наука, 1971. – С. 162–166.
- Спиридонов Э. М. Арфведсонит-флогопитовые минетты лампроитовой серии Горного Крыма и Восточно-Сибирской платформы // Петрология и геодинамика геологических процессов. Иркутск, 2021. Т. 3. С. 100–104.
- Спиридонов Э. М. Генетическая модель месторождений Норильского рудного поля // Смирновский сборник-2019. М. : Макс Пресс, 2019. С. 41–113.
- 44. Спиридонов Э. М. О взаимодействии Ni-Cu-Fe сульфидного расплава (c Pd, Pt, Ag, Au) с титанавгитовыми базальтами (месторождение Медвежий Ручей, Норильск) // Ежегодный семинар по эксперимент. минералогии, петрологии и геохимии. – М. : Изд. РАН. – 2004. – С. 65–66.
- Спиридонов Э.М. Рудно-магматические системы Норильского рудного поля // Геология и геофизика. – 2010. – Т. 51. – С. 1356–1378.

- Спиридонов Э. М., Голубев В. Н., Гриценко Ю. Д. Изотопный состав свинца галенита, алтаита и интерметаллидов палладия сульфидных руд Норильского рудного поля // Геохимия. – 2010. – № 8. – С. 1–10.
- Спиридонов Э. М., Гриценко Ю. Д. Эпигенетический низкоградный метаморфизм и Co-Ni-Sb-As минерализация в Норильском рудном поле. – М. : Научный мир, 2009. – 218 с.
- 48. Спиридонов Э. М., Иванова Ю. А., Наумов Д. И. [и др.] Норильское рудное поле: новая метаморфогенногидротермальная минеральная ассоциация – беспримесные звягинцевит и серебро, хиббингит, Ми хиббингит, сидерит, фосгенит, сфалерит в магматогенных путоранитовых рудах // Вестник МГУ. Геология. – 2022. – № 3. – С. 70–82.
- 49. Спиридонов Э. М., Кулагов Э. А., Куликова И. М. [и др.] Генетическая минералогия Pd, Pt, Au, Ag, Rh в норильских сульфидных рудах // Геология рудных месторождений. – 2015. – Т. 57, № 5. – С. 447–476.
- Спиридонов Э. М., Ладыгин В. М., Степанов В. К. [идр.] Метавулканиты пренит-пумпеллиитовой и цеолитовой фаций трапповой формации Норильского района Сибирской платформы. – М. : МГУ, 2000. – 212 с.
- Степанов В.К. Динамическая модель внедрения, кристаллизации и рудоотложения рудоносных интрузий Норильска // Труды ЦНИГРИ. – 1981. – Вып. 162. – С. 13–19.
- Степанов В. К., Туровцев Д. М. Многофакторные модели медно-никелевых месторождений норильского типа // Труды ЦНИГРИ. – 1988. – Вып. 223. – С. 86–94.
- 53. *Суханова Е. Н.* Случай образования кокса под влиянием сульфидной жилы // Геология рудных месторождений. 1959. № 6. С. 85–89.
- 54. *Туровцев Д. М.* Контактовый метаморфизм Норильских интрузивов. – М. : Научный Мир, 2002. – 319 с.
- 55. Филимонова А. А., Муравьева И. И., Евстигнеева Т. Л. Минералы группы халькопирита медно-никелевых руд Норильских месторождений // Геология рудных месторождений. 1974. Т. 16, № 5. С. 36–45.
- Arndt N. T., Czamanske G. K., Walker R. J. Geochemistry and origin of the intrusivehost of the Noril'sk – Talnakh Cu-Ni-PGE sulphide deposits // Economic Geology.– 2003. – V. 98. – P. 495–515.
- Bowring S. A., Ervin D. M., Jin Y. G. [et al.] The age of the Permian – Triassic boundary at Meishan, Southern China // Science. – 1998. – V. 280. – P. 1039–1045.
- Dalrymple G. B., Cramanske G. K., Stepanov V. K. [et al.] ⁴⁰Ar/³⁹Ar ages of samples from the Noril'sk – Talnach orebearing intrusions and the Siberian flood basalts // Eos. – 1991. – V. 72. – P. 570.
- Kamo S. L., Czamanske G. K., Amelin Yu. V. [et al.] U-Pb zircon and baddeleite and U-Th-Pb perovskite ages for Siberian flood volcanism Maymecha-Kotuy area Siberia // J. Conference Abstr. – 2000. – V. 5, № 2. – P. 569.
- Kamo S. L., Czamanske G. K., Krogh T. E. [et al.] A minimum U-Pb age for Siberian flood-basalt volcanism // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 1996. – V. 60. – P. 3505–3511.

- Kozyrev S. M., Komarova M. Z., Emelina L. N. [et al.] The mineralogy and behavior of PGM during processing of the Noril'sk – Talnakh PGE-Cu-Ni ores // Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum. – 2002. – V. 54. – P. 757–792.
- 62. *Li C., Naldrett A.J., Shmitt A.K.* [et al.] Magmatic anhydrite-sulfide assemblages in plumbing system of the Siberian Traps // Geology. 2009a. V. 37. P. 259–262.
- Li C., Ripley E. M., Naldrett A. J. Compositional variations of olivine and sulfure isotopes in the Noril'sk and Talnakh intrusion, Siberia: Implications for ore-forming processes in dynamic magma conduits // Economic Geology. 2003. V. 98. P. 69–86.
- Li C., RipleyE. M., Naldrett A.J. A new genetic model for the giant Ni-Cu-PGE sulfide deposits associated with the Siberian flood basalts // Economic Geology. – 2009b. – V. 104. – P. 291–301.
- Lightfoot P. C., Naldrett A.J., Gorbachev N.S. [et al.] Chemostratigraphy of Siberian trap lavas Noril'sk district, Russia: Implications and source // Contributions to Mineralogy and Petrology. – 1993. – V. 114. – P. 171–188.
- Naldrett A. J. Magmatic sulfide deposits. Geology, geo-chemistry and exploration. Berlin [etc.]: Springer, 2004.–727 p.
- Okamoto H., Chakrabarti D.J., Laughlin D.E., Massalski T.B. The Au-Cu (gold-copper) system // Bulletin of Alloy Phase Diagrams. – 1987. – V. 8. – P. 453–474.
- Ryabov V. V., Ponomarchuk V. A. The role of hydro-carbons in the formation of the PGE deposits in the Siberian traps // 12th International Platinum Symposium (Ekaterinburg). 2014. P. 115–116.
- Simonov O. N., Lul'ko V. A., Amosov Yu. N., Salov V. N. Geological structure of the Noril'sk region // Sudbury – Noril'sk Symposium, Ontario Geological Survey. – 1994. – Spec. V. 5. – P. 161–170.
- Sluzhenikin S. F., Mokhov A. V. Gold and silver in PGE– Cu–Ni and PGE ores of the Noril'sk deposits, Russia // Mineralium Deposita. – 2015. – V. 50. – P. 465–492.
- Spiridonov E. M., Serova A. A., Kulikova I. M. [et al.] Metamorphic-hydrothermal Ag-Pd-Pt mineralization in the Noril'sk sulfide ore deposit, Siberia // Canadian Mineralogist. – 2016. – V. 54. – P. 429–452.
- Spiridonov E. M., Stepanov V. K., Kulagov E. A., Belyakov S. N. Real relationships of volcanic and ore-bearing intrusive traps in the Noril'sk ore field, Northern Siberia, Russia // 13th International Platinum Symposium (Polokwane, South Africa). – 2018. – P. 176–177.
- Stepanov V.K. Formation mechanism of ore-bearing intrusives of Noril'sk type // 12th International Platinum Symposium (Ekaterinburg). – 2014. – P. 121–122.
- 74. *Vogt J. H. L.* Geology of the platinum metals // Economic Geology. 1927. V. 22. P.322–355.
- Walker R. J., Morgan J. W., Horan M. F. [et al.] Re-Os isotope evidence for an enriched-mantle source for the Noril'sk-type ore-bearing intrusion // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 1994. – V. 58. – P. 4179–4197.
- Wooden J. L., Czamanske G. K., Fedorenko V. A. [et al.] Pb isotope data indicate a complex, mantle origin for the Noril'sk – Talnakh ores, Siberia // Economic Geology.– 1992.– V. 87.– P. 1153–1165.

REFERENCES

- Adamskaya Ye. V., Petrov O. V., Prasolov E. M. [et al.] Izotopnaya geologiya noril'skikh mestorozhdeniy [Isotope geology of the Norilsk deposits], St. Petersburg, VSEGEI publ., 2017, 348 p. (In Russ.)
- Begizov V. D. Mineraly blagorodnykh metallov v rudakh Talnakhskogo mestorozhdeniya [Minerals of noble metals in the ores of the Talnakh deposit]. Moscow, MGRI publ., 1977, 197 p. (In Russ.)
- 3. *Belozerskiy N. A.* Karbonily metallov [Carbonyls of metals], Moscow, Metallurgiya, 1958, 272 p. (In Russ.)
- Bud'ko I. A., Izoitko V. M., Kulagov E. A., Mitenkov G. A. Makinavit i valleriit v rudakh Noril'ska i Talnakha [Makinavit and vallerite in the ores of Norilsk and Talnakh]. Uchenyye zapiski NIIGA. Regional'naya seriya, 1966, Is. 5, pp. 203–209. (In Russ.)
- Bud'ko I. A., Kulagov E. A. Novyy sul'fid medi i zheleza – talnakhit [New copper and iron sulfide – talnakhite]. Zapiski VMO, 1968, Ch. 97, Is. 1, pp. 63–70. (In Russ.)
- Vasil'yev Yu. R. Petrologiya i cherty stroyeniya slozhno differentsiirovannoy trappovoy intruzii Noril'sk II [Petrology and structural features of the complexly differentiated trap intrusion Norilsk II]. Geologiya i petrologiya intruzivnykh trappov Sibirskoy platformy, Novosibirsk, Nauka publ., 1966, pp. 5–112. (In Russ.)
- Genkin A. D., Loginov V. P., Organova N. I. O vzaimootnosheniyakh i osobennostyakh razmeshcheniya geksagonal'nykh i monoklinnykh pirrotinov v rudakh [On the relationship and features of the placement of hexagonal and monoclinic pyrrhotites in ores]. GRM, 1965, V. 7, No. 1, pp. 3–24. (In Russ.)
- Genkin A. D., Filimonova A. A., Yevstigneyeva T. L. [et al.] Sul'fidnyye medno-nikelevyye rudy noril'skikh mestorozhdeniy [Sulfide copper-nickel ores of Norilsk deposits], Moscow, Nauka publ., 1981, 234 p. (In Russ.)
- 9. *Geologicheskaya* karta Noril'skogo rudnogo rayona masshtaba 1:200 000 [Geological map of the Norilsk ore region, scale 1:200,000]. Noril'sk, 1994. (In Russ.)
- Glubinnoye stroyeniye territorii SSSR [Deep structure of the territory of the USSR]. Ed. V. V. Belousov, Moscow, Nauka publ., 1991, 238 p. (In Russ.)
- Godlevskiy M. N. Kristallizatsionnaya differentsiatsiya sul'fidnogo rasplava na primere Noril'skikh medno-nikelevykh mestorozhdeniy [Crystallization differentiation of sulfide melt on the example of Norilsk copper-nickel deposits]. Materialy po geologii i poleznym iskopayemym Sibirskoy platformy, Leningrad, VSEGEI publ., 1960, pp. 95–101. (In Russ.)
- Godlevskiy M. N. Povedeniye arsenidov i sul'fidov nikelya i kobal'ta pri poslemagmaticheskikh protsessakh [Behavior of arsenides and sulfides of nickel and cobalt during post-magmatic processes]. Problemy kristallokhimii mineralov i endogennogo mineraloobrazovaniya, Moscow, AN SSSR publ., 1967, pp. 211–221. (In Russ.)

- 13. *Godlevskiy M. N.* Trappy i rudonosnyye intruzii Noril'skogo rayona [Traps and ore-bearing intrusions of the Norilsk region]. Moscow, Gosgeoltekhizdat publ., 1959, 68 p. (In Russ.)
- Godlevskiy M. N., Grinenko L. N. Nekotoryye dannyye ob izotopnom sostave sery sul'fidov Noril'skogo mestorozhdeniya [Some data on the isotope composition of sulfur in sulfides of the Norilsk deposit]. Geologiya i geofizika, 1963, No. 1, pp. 35–39. (In Russ.)
- Godlevskiy M. N., Kravtsov G. S., Slivko V. M. Voprosy teploobmena intruziva i vmeshchayushchikh porod i kontaktovyy termometamorfizm ugley vblizi trappovykh intruzivov [Issues of heat transfer between intrusion and host rocks and contact thermometamorphism of coals near trap intrusions]. Geologiya i geofizika, 1962, No. 2, pp. 6–24. (In Russ.)
- Godlevskiy M. N., Shumskaya N. I. Khal'kopirit-milleritovyye rudy mestorozhdeniya Noril'sk I [Chalcopyritemillerite ores of the Norilsk I deposit]. Geologiya rudnykh mestorozhdeniy, 1960, No. 6, pp. 61–72. (In Russ.)
- Gol'dshmidt V. M. Sbornik statey po geokhimii redkikh elementov [Collection of articles on the geochemistry of rare elements]. Moscow, Leningrad, GONTI publ., 1938, 244 p. (In Russ.)
- Dou B. R., Zartman R. Ye. Plyumbotektonika fanerozoya [Plumbotectonics of the Phanerozoic]. Geokhimiya gidrotermal'nykh rudnykh mestorozhdeniy, Moscow, Mir publ., 1982, pp. 28–70. (In Russ.)
- Yevstigneyeva T. L., Genkin A. D. Platinometal'naya mineralizatsiya noril'skikh medno-nikelevykh rud: prirodnyye i eksperimental'nyye dannyye [Platinum-metal mineralization of Norilsk copper-nickel ores: natural and experimental data]. Geologiya medno-nikelevykh mestorozhdeniy SSSR, Leningrad, Nauka publ., 1990, pp. 98– 106. (In Russ.)
- Yevstigneyeva T. L., Kim A. A., Nekrasov I. Ya. O dearsenizatsii sperrilita v prirode [On dearsenization of sperrylite in nature]. Mineralogicheskiy zhurnal, 1990, V. 12, No. 3, pp. 90–96. (In Russ.)
- Zolotukhin V. V. Bazitovyye pegmatoidy noril'skikh rudonosnykh intruzivov i problema genezisa platinoidnomedno-nikelevogo orudeneniya noril'skogo tipa [Basic pegmatoids of the Norilsk ore-bearing intrusives and the problem of the genesis of Norilsk-type platinoid-copper-nickel mineralization]. Novosibirsk, SO RAN publ., 1997, 88 p. (In Russ.)
- Zolotukhin V. V. O nakhodke fayalitsoderzhashchikh metasomatitov v rudakh Noril'ska [On the discovery of fayalite-bearing metasomatites in the ores of Norilsk]. Doklady AN SSSR, 1971, V. 198, pp. 692–695. (In Russ.)
- Zolotukhin V. V. Obobshchennaya model' sul'fidnogo Cu-Ni rudoobrazovaniya kak protsessa sul'furizatsii [Generalized model of sulfide Cu-Ni ore formation as a process of sulfurization]. Rudoobrazovaniye i geneticheskiye modeli endogennykh rudnykh formatsiy, Novosibirsk, Nauka, 1988, pp. 172–182. (In Russ.)

- Zolotukhin V. V., Ryabov V. V., Vasil'yev Yu. R., Shatkov V. A. Petrologiya Talnakhskoy rudonosnoy differentsiirovannoy trappovoy intruzii [Petrology of the Talnakh ore-bearing differentiated trap intrusion]. Novosibirsk, Nauka publ., 1975, 434 p. (In Russ.)
- Izoitko V. M. Tekhnologicheskaya mineralogiya i otsenka rud [Technological mineralogy and evaluation of ores]. St. Petersburg, Nauka publ., 1997, 582 p. (In Russ.)
- Kovalenker V. A., Laputina I. P., Pavlov Ye. G. O raspade prirodnogo tvordogo rastvora v sisteme PbS PbTe [On the decomposition of a natural solid solution in the PbS PbTe system]. Uporyadocheniye i raspad tvordykh rastvorov v mineralakh, Moscow, Nauka publ., 1979, pp. 185–190. (In Russ.)
- Kotul'skiy V. K. K voprosu o proiskhozhdenii magmaticheskikh medno-nikelevykh mestorozhdeniy [On the origin of igneous copper-nickel deposits]. Doklady AN SSSR, 1946, V. 51, pp. 381–384. (In Russ.)
- Krivolutskaya N. A. Formirovaniye Pt-Cu-Ni mestorozhdeniy v protsese evolyutsii trappovogo magmatizma v Noril'skom regione [Formation of Pt-Cu-Ni deposits during the evolution of trap magmatism in the Norilsk region]. GRM, 2011, V. 53, No. 4, pp. 309–339. (In Russ.)
- Krivolutskaya N. A., Rudakova A. V. Stroyeniye i geokhimicheskiye osobennosti porod trappovoy formatsii Noril'skoy mul'dy (SZ Sibirskoy platformy) [Structure and geochemical features of the rocks of the trap formation of the Norilsk trough (NW of the Siberian platform)]. Geokhimiya, 2009, No. 7, pp. 675–698. (In Russ.)
- Kulagov E. A. Osobennosti mineral'nogo sostava rud mestorozhdeniya Noril'sk-I [Features of the mineral composition of the ores of the Norilsk-I deposit]. Moscow, MGU publ., 1968, 239 p. (In Russ.)
- Kulagov E. A., Yevstigneyeva T. L., Yushko-Zakharova O. Ye. Novyy sul'fid nikelya – godlevskit [New nickel sulfide – godlevskite]. Geologiya rudnykh mestorozhdeniy, 1969, No. 3, pp. 115–121. (In Russ.)
- 32. *Likhachov A. P.* Platino-medno-nikelevyye i platinovyye mestorozhdeniya [Platinum-copper-nickel and platinum deposits]. Moscow, Eslan publ., 2006, 496 p. (In Russ.)
- Masaytis V. L. Permskiy i triasovyy vulkanizm Sibiri: problemy dinamicheskikh rekonstruktsiy [Permian and Triassic volcanism of Siberia: problems of dynamical reconstructions]. Zapiski VMO, 1983, Ch. 112, Is. 4, pp. 412–425. (In Russ.)
- Mitenkov G. A., Knauf V. V., Yertseva L. N. [et al.] Mineraly elementov gruppy platiny v sploshnykh pirrotinovykh rudakh Talnakha [Minerals of elements of the platinum group in solid pyrrhotite ores of Talnakh]. Osnovnyye problemy v uchenii o magmatogennykh rudnykh mestorozhdeniyakh, Moscow, Nauka publ., 1997, pp. 284–285. (In Russ.)
- 35. Murav'yova I. V., Yevstigneyeva T. L., Filimonova A. A., Malov V. S. Pervaya nakhodka moikhukita v mednonikelevykh rudakh Oktyabr'skogo mestorozhdeniya (Noril'skiy rayon) [The first find of moihukit in copper-nickel ores of the Oktyabrskoye deposit (Norilsk region)].

Geologiya rudnykh mestorozhdeniy, 1972, V. 14. No. 3, pp. 94–97. (In Russ.)

- 36. Pokrovskiy B. G., Sluzhenikin S. F., Krivolutskaya N. A. Izotopnyy sostav kisloroda i vodoroda v trappovykh intruzivakh Noril'skogo rayona [Isotopic composition of oxygen and hydrogen in the trap intrusions of the Norilsk region]. Doklady RAN, 2002, V. 383, pp. 675–679. (In Russ.)
- Rad'ko V. A. Model' dinamicheskoy differentsiatsii intruzivnykh trappov severo-zapada Sibirskoy platformy [Model of dynamic differentiation of intrusive traps in the northwest of the Siberian Platform]. Geologiya i geofizika, 1991, No. 11, pp. 19–27. (In Russ.)
- Rad'ko V. A. Fatsii intruzivnogo i effuzivnogo magmatizma Noril'skogo rayona [Facies of intrusive and effusive magmatism in the Norilsk region]. St. Petersburg, Kartograficheskaya fabrika VSEGEI publ., 2016, 226 p. (In Russ.)
- 39. Rogover G. B. Mestorozhdeniye Noril'sk-1, nekotoryye yego osobennosti, mogushchiye imet' poiskovoye znacheniye, i ratsional'naya metodika yego razvedki [The Norilsk-1 field, some of its features that may be of exploratory significance, and a rational methodology for its exploration]. Moscow, Gosgeoltekhizdat publ., 1959, 168 p. (In Russ.)
- Sluzhenikin S. F., Distler V. V., Kravtsov V. F., Kunilov V. Ye., Laputina L. P., Turovtsev D. M. Malosul'fidnoye platinovoye orudeneniye v Noril'skikh differentsirovannykh intruzivakh [Low-sulfide platinum mineralization in the Norilsk differentiated intrusions]. Geologiya rudnykh mestorozhdeniy, 1994, V. 36, No. 3, pp. 195–217. (In Russ.)
- 41. *Spiridonov E. M.* Anortozitovaya tendentsiya magmaticheskoy differentsiatsii [Anorthositic tendency of magmatic differentiation]. Problemy magmatizma Baltiyskogo shchita, Leningrad, Nauka publ., 1971, pp. 162–166. (In Russ.)
- 42. Spiridonov E. M. Arfvedsonit-flogopitovyye minetty lamproitovoy serii Gornogo Kryma i Vostochno-Sibirskoy platformy [Arfvedsonite-phlogopite minettes of the lamproite series of the Crimean Mountains and the East Siberian Platform]. Petrologiya i geodinamika geologicheskikh protsessov, Irkutsk, 2021, V. 3, pp. 100–104. (In Russ.)
- Spiridonov E. M. Geneticheskaya model' mestorozhdeniy Noril'skogo rudnogo polya [Genetic model of deposits of the Norilsk ore field]. Smirnovskiy sbornik-2019, Moscow, Maks Press publ., 2019, pp. 41–113. (In Russ.)
- 44. *Spiridonov E. M.* O vzaimodeystvii Ni-Cu-Fe sul'fidnogo rasplava (c Pd, Pt, Ag, Au) s titanavgitovymi bazal'tami (mestorozhdeniye Medvezhiy Ruchey, Noril'sk) [On the interaction of Ni-Cu-Fe sulfide melt (with Pd, Pt, Ag, Au) with titanium augite basalts (Medvezhiy Ruchey deposit, Norilsk)]. Yezhegodnyy seminar po eksperiment. mineralogii, petrologii i geokhimii, Moscow, RAN publ., 2004, pp. 65–66. (In Russ.)
- 45. Spiridonov E. M. Rudno-magmaticheskiye sistemy Noril'skogo rudnogo polya [Ore-magmatic systems of the

Norilsk ore field]. Geologiya i geofizika, 2010, V. 51, pp. 1356–1378. (In Russ.)

- 46. Spiridonov E. M., Golubev V. N., Gritsenko Yu. D. Izotopnyy sostav svintsa galenita, altaita i intermetallidov palladiya sul'fidnykh rud Noril'skogo rudnogo polya [Pb isotope composition of galena, altaite and palladium intermetallides from sulfide ores of the Norilsk ore field]. Geokhimiya, 2010, No. 8, pp. 1–10. (In Russ.)
- Spiridonov E. M., Gritsenko Yu. D. Epigeneticheskiy nizkogradnyy metamorfizm i Co-Ni-Sb-As mineralizatsiya v Noril'skom rudnom pole [Epigenetic low-grade metamorphism and Co-Ni-Sb-As mineralization in the Norilsk ore field]. Moscow, Nauchnyy mir publ., 2009, 218 p. (In Russ.)
- 48. Spiridonov E. M., Ivanova Yu. A., Naumov D. I. [et al.] Noril'skoye rudnoye pole: novaya metamorfogennogidrotermal'naya mineral'naya assotsiatsiya – besprimesnyye zvyagintsevit i serebro, khibbingit, Mn khibbingit, siderit, fosgenit, sfalerit v magmatogennykh putoranitovykh rudakh [Norilsk ore field: a new metamorphogenichydrothermal mineral association – pure zvyagintsevite and silver, hibbingite, Mn hibbingite, siderite, phosgenite, sphalerite in magmatogenic putoranite ores]. Vestnik MGU. Geologiya, 2022, No. 3, pp. 70–82. (In Russ.)
- Spiridonov E. M., Kulagov E. A., Kulikova I. M. [et al.] Geneticheskaya mineralogiya Pd, Pt, Au, Ag, Rh v noril'skikh sul'fidnykh rudakh [Genetic mineralogy of Pd, Pt, Au, Ag, Rh in Norilsk sulfide ores]. GRM, 2015, V. 57, No. 5, pp. 447–476. (In Russ.)
- 50. Spiridonov E. M., Ladygin V. M., Stepanov V. K. [et al.] Metavulkanity prenit-pumpelliitovoy i tseolitovoy fatsiy trappovoy formatsii Noril'skogo rayona Sibirskoy platformy [Metavolcanics of the prehnite-pumpelliite and zeolite facies of the trap formation of the Norilsk region of the Siberian platform], Moscow, MGU publ., 2000, 212 p. (In Russ.)
- Stepanov V. K. Dinamicheskaya model' vnedreniya, kristallizatsii i rudootlozheniya rudonosnykh intruziy Noril'ska [Dynamic model of intrusion, crystallization and ore deposition of ore-bearing intrusions of Norilsk]. Trudy TSNIGRI, 1981, Is. 162, pp. 13–19.
- Stepanov V. K., Turovtsev D. M. Mnogofaktornyye modeli medno-nikelevykh mestorozhdeniy noril'skogo tipa [Multifactorial models of copper-nickel deposits of the Norilsk type]. Trudy TSNIGRI, 1988, Is. 223, pp. 86–94. (In Russ.)
- Sukhanova Ye. N. Sluchay obrazovaniya koksa pod vliyaniyem sul'fidnoy zhily [A case of coke formation under the influence of a sulfide vein]. Geologiya rudnykh mestorozhdeniy, 1959, V. 2, No. 6, pp. 85–89. (In Russ.)
- Turovtsev D. M. Kontaktovyy metamorfizm Noril'skikh intruzivov [Contact metamorphism of the Norilsk intrusions, Moscow]. Moscow, Nauchnyy Mir publ., 2002, 319 p. (In Russ.)
- 55. Filimonova A. A., Murav'yeva I. I., Yevstigneyeva T. L. Mineraly gruppy khal'kopirita medno-nikelevykh rud Noril'skikh mestorozhdeniy [Minerals of the chalco-

pyrite group of copper-nickel ores of Norilsk deposits] Geologiya rudnykh mestorozhdeniy, 1974, V. 6, No. 5, pp. 36–45. (In Russ.)

- Arndt N. T., Czamanske G., WalkerR. J. Geochemistry and origin of the intrusivehost of the Noril'sk – Talnakh Cu-Ni-PGE sulphide deposits. Economic Geology, 2003, V. 98, pp. 495–515.
- 57. *Bowring S. A., Ervin D. M., Jin Y. G.* [et al.] The age of the Permian Triassic boundary at Meishan, Southern China. Science, 1998, V. 280, pp. 1039–1045.
- Dalrymple G. B., Cramanske G. K., Stepanov V. K. [et al.] ⁴⁰Ar/³⁹Ar ages of samples from the Noril'sk – Talnach ore-bearing intrusions and the Siberian flood basalts. Eos, 1991, V. 72, pp. 570.
- Kamo S. L., Czamanske G. K., Amelin Yu. V. [et al.] U-Pb zircon and baddeleite and U-Th-Pb perovskite ages for Siberian flood volcanism Maymecha-Kotuy area Siberia. J. Conference Abstr, 2000, V. 5, № 2, pp. 569.
- 60. *Kamo S. L., Czamanske G. K., Krogh T. E.* A minimum U-Pb age for Siberian flood-basalt volcanism. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1996, V. 60, pp. 3505–3511.
- Kozyrev S. M., Komarova M. Z., Emelina L. N. [et al.] The mineralogy and behavior of PGM during processing of the Noril'sk – Talnakh PGE-Cu-Ni ores. Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, 2002, V. 54, pp. 757–792.
- 62. *Li C., Naldrett A. J., Shmitt A. K.* [et al.] Magmatic anhydrite-sulfide assemblages in plumbing system of the Siberian Traps. Geology, 2009a, V. 37, pp. 259–262.
- Li C., Ripley E. M., Naldrett A. J. Compositional variations of olivine and sulfure isotopes in the Noril'sk and Talnakh intrusion, Siberia: Implications for ore-forming processes in dynamic magma conduits. Economic Geology, 2003, V. 98, pp. 69–86.
- 64. *Li C., Ripley E. M., Naldrett A. J.* A new genetic model for the giant Ni-Cu-PGE sulfide deposits associated with the Siberian flood basalts. Economic Geology, 2009b, V. 104, pp. 291–301.
- 65. Lightfoot P. C., Hawkesworth C. S., Hergt J. [et al.] Remobilization of the continental lithoshere by mantle plumes: major-, trace-element, and Sr-, Nd-, and Pb-isotope evidence from picritic and tholeitic lavas of the Noril'sk district, Siberian Trap, Russia. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1993a, V. 114, pp. 171–188.
- 66. *Naldrett A. J.* Magmatic sulfide deposits. Geology, geochemistry and exploration. Berlin [etc.], Springer, 2004, 727 p.
- Okamoto H., Chakrabarti D. J., Laughlin D. E., Massalski T. B. The Au-Cu (gold-copper) system. Bulletin of Alloy Phase Diagrams, 1987, V. 8, pp. 453–474.
- Ryabov V. V., Ponomarchuk V. A. The role of hydrocarbons in the formation of the PGE deposits in the Siberian traps. 12th International Platinum Symposium (Ekaterinburg), 2014, pp. 115–116.
- Simonov O. N., Lul'ko V. A., Amosov Yu. N., Salov V. N. Geological structure of the Noril'sk region. Sudbury– Noril'sk Symposium, Ontario Geological Survey, 1994, Spec.V. 5, pp. 161–170.

- Sluzhenikin S. F., Mokhov A. V. Gold and silver in PGE– Cu–Ni and PGE ores of the Noril'sk deposits, Russia. Mineralium Deposita, 2015, V. 50, pp. 465–492.
- Spiridonov E. M., Serova A. A., Kulikova I. M. [et al.] Metamorphic-hydrothermal Ag-Pd-Pt mineralization in the Noril'sk sulfide ore deposit, Siberia. Canadian Mineralogist, 2016, V. 54, pp. 429–452.
- Spiridonov E.M., Stepanov V.K., Kulagov E. A., Belyakov S. N. Real relationships of volcanic and ore-bearing intrusive traps in the Noril'sk ore field, Northern Siberia, Russia. Abstracts of 13th International Platinum Symposium (Polokwane, South Africa), 2018, pp. 176–177.
- 73. *Stepanov V. K.* Formation mechanism of ore-bearing intrusives of Noril'sk type. 12th International Platinum Symposium (Ekaterinburg), 2014, pp. 121–122.
- 74. *Vogt J. H. L.* Geology of the platinum metals. Economic Geology, 1927, V. 22, pp. 322–355.
- Walker R. J., Morgan J. W., Horan M. F. [et al.] Re-Os isotope evidence for an enriched-mantle source for the Noril'sk-type ore-bearing intrusion. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1994, V. 58, pp. 4179–4197.
- Wooden J. L., Czamanske G. K., Fedorenko V. A. [et al.] Pb isotope data indicate a complex, mantle origin for the Noril'sk – Talnakh ores, Siberia. Economic Geology, 1992, V. 87, pp. 1153–1165.

Статья поступила в редакцию 25.10.22; одобрена после рецензирования 07.11.22; принята к публикации 08.11.22. The article was submitted 25.10.22; approved after reviewing 07.11.22; accepted for publication 08.11.22.

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

Памяти Евгения Михайловича Некрасова



1931-2022

24 октября 2022 года ушёл из жизни **Евгений Михайлович Некрасов**. Не стало одного из ведущих учёных отечественной геологической науки в области геологического строения и геолого-промышленной оценки месторождений цветных и благородных металлов, доктора геолого-минералогических наук. Евгений Михайлович Некрасов родился в Москве 19 августа 1931 г. В 1954 г. с отличием окончил Московский Институт цветных металлов и золота им. М. И. Калинина по специальности «Геология и разведка месторождений полезных ископаемых».

Научную деятельность Евгений Михайлович начал в Казахстане, где работал участковым, а затем главным геологом партии по поискам и разведке месторождений урана.

С 1961 по 1975 гг. Е. М. Некрасов работал в ЦНИГРИ старшим научным сотрудником, занимался изучением свинцово-цинковых и золоторудных месторождений Кавказа, Забайкалья, Магаданской области и Узбекистана. В 1972 г. защитил докторскую диссертацию на тему «Закономерности размещения жильного свинцово-цинкового оруденения».

В 1975–1995 гг. Е. М. Некрасов работал во ВНИИзарубежгеология ведущим научным сотрудником, заведующим сектором геологии стран-членов СЭВ. Изучал закономерности размещения, типизации золоторудных месторождений, анализировал состояние минерально-сырьевой базы зарубежных стран. В качестве эксперта неоднократно выезжал в Болгарию, Аргентину и Вьетнам.

В 1995–2010 гг. Евгений Михайлович работал ведущим геологом в ИАЦ «Минерал» ФГУНПП «Аэрогеология», где занимался оценкой состояния оте-

чественной и зарубежных минерально-сырьевых баз золота и металлов платиновой группы, а также их конъюнктуры на мировом рынке

Е. М. Некрасов – автор свыше 200 научных публикаций, в которых рассмотрены аспекты металлогении, геолого-структурных обстановок формирования эндогенных золоторудных месторождений России и мира, геолого-промышленных типов золоторудных месторождений и их роли в мировых запасах и добыче золота. Результаты научных и практических исследований Евгения Михайловича обобщены в таких научных трудах, как «Зарубежные эндогенные месторождения золота» (1988 г.), «Особенности геологии и структуры крупнейших золоторудных месторождений эндогенного класса» (2015 г.), «Систематика, структуры и запасы золоторудных месторождений» (2019 г.).

Евгению Михайловичу присвоено звание «Почётный разведчик недр», он награждён Памятным знаком «300 лет горно-геологической службы России». Правительством Вьетнама за эффективную методическую помощь при поисках и разведке месторождений золота удостоен ордена «Дружба народов».

Можно без преувеличения сказать, что Евгений Михайлович был непревзойдённым специалистом в области рудничной геологии. Его блестящие, тщательные исследования структуры месторождений позволяли находить новые рудные тела даже на детально разведанных и эксплуатируемых объектах. Результаты его исследований представляют незаменимый практический интерес для геологов, осуществляющих прогнозно-поисковые и оценочные работы на золотоносных объектах, не только в пределах нашей страны, но и за рубежом. Труды Е. М. Некрасова ещё долго останутся настольными книгами геологов-поисковиков.

Евгений Михайлович был человеком безмерного обаяния и открытым для общения. С ним можно было обсудить любую проблему и получить практическую поддержку. Всегда элегантный и остроумный он был душой коллектива. Таким он и останется в нашей памяти и в наших сердцах.

Редколлегия журнала

Список статей, опубликованных в журнале «Отечественная геология» в 2021 году

ОРГАНИЗАЦИЯ, УПРАВЛЕНИЕ, ЭКОНОМИКА, НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

Алексеев Я. В., Заскинд Е. С., Конкина О. М. Сырьевая база металлов платиновой группы России: состояние, освоение и перспективы развития до 2040 года. № 2. С. З. Иванов А. И., Алексеев Я. В., Черных А. И., Наумов Е. А., Куликов Д. А., Тарасов А. С., Конкина О. М., Минькин К. М., Попов И. В. Благородные металлы Российской Федерации – состояние минерально-сырьевой базы и перспективы её развития. № 1. С. З.

НОРМАТИВНО-ПРАВОВОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ, НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ И ПРИКЛАДНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Анисимова А. Б., Ермилова Г. А., Мельникова Т. В. Становление и развитие Государственного баланса запасов твёрдых полезных ископаемых. № 4. С. 30.

Анисимова А. Б., Мазур Е. В. Государственный кадастр месторождений и проявлений полезных ископаемых – от массива бумажных паспортов к базовому электронному реестру. № 4. С. 26.

Аракчеев Д. Б., Юон Е. М., Грушин Р. В. Росгеолфонд вчера, сегодня, завтра – 85 лет Российскому Федеральному геологическому фонду. № 4. С. 3.

Аракчеев Д. Б., Юон Е. М., Захаркин И. В., Попов Е. В., Фролов А. А., Швырков С. А. ФГИС «Единый фонд геологической информации о недрах» как основа цифровой трансформации геологического информационного обеспечения отрасли. № 4. С. 13.

Ткачева Е. А., Михайлова С. М., Шпекторова О. А., Анисимова А. Б. Система ведения и учёта изученности в условиях цифровизации геологической отрасли. № 4. С. 43.

Юон Е. М., Мазур Е. В. Цифровое управление государственным фондом недр – вызовы, задачи, результаты. № 4. С. 19.

МИНЕРАГЕНИЯ

Беляев Е. В., Антонов В. А. Минерагеническая специализация структурно-формационных комплексов Республики Дагестан. № 3. С. 32.

Конкин В. Д., Донец А. И. Дивергенция и конвергенция признаков золотоносности провинций со стратоидными месторождениями золота в черносланцевых формациях. № 5. С. 14.

МЕСТОРОЖДЕНИЯ РУДНЫХ И НЕРУДНЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Иванов А. И., Алексеев Я. В., Черных А. И., Наумов Е. А., Куликов Д. А. Барышев А. Н., Донец А. И., Конкин В. Д. Российские золоторудные месторождения – аспекты открытия. № 3. С. 3.

Кудрявцева Н. Г., Кузнецов В. В., Серавина Т. В. Геодинамические обстановки формирования месторождений цветных и благородных металлов Большого Алтая. № 2. С. 12.

Мигачёв И. Ф., Звездов В. С., Минина О. В. Формационные типы медно-порфировых месторождений и их рудно-магматические системы. № 1. С. 26.

Степанов В. А., Мельников А. В. Золоторудное месторождение Снежинка Уркинского рудно-россыпного узла Приамурской провинции. № 3. С. 22.

РЕГИОНАЛЬНАЯ ГЕОЛОГИЯ

Барышев А. Н. Роль планетарной геодинамики в создании астеносферы, конвективных и транстенсионных структур континентальной литосферы. № 5. С. 24. Зольников И. Д., Анойкин А. А., Филатов Е. А., Левицкая П. С., Чупина Д. А., Глушкова Н. В., Бордюгова Е. А.

кая П. С., Чупина Д. А., Глушкова Н. В., Бордюгова Е. А. Геологическое строение четвертичных отложений правобережья р. Большой Оби (север Западной Сибири). № 5. С. 38.

ЛИТОЛОГИЯ, ПЕТРОЛОГИЯ, МИНЕРАЛОГИЯ, ГЕОХИМИЯ

Агашева Е. В., Агашев А. М., Гудимова А. И., Малыгина Е. В., Червяковский В. С., Прусакова Н. А., Щукин В. С., Голубев Ю. К., Похиленко Н. П. Состав гранатов из кимберлитов Архангельской области как один из признаков алмазоносности. № 1. С. 71.

Барабаш Е.О., Афанасьев В.П., Похиленко Н.П., Малыгина Е.В., Иванова О.А. Оценка возраста и потенциальной алмазоносности коренных источников по их глубинным минералам из ореолов рассеяния. № 6. С. 3.

Бондаренко Н. В., Шатилова Л. В., Позднякова Н. Н., Ковальчук Е. В. Типоморфные признаки самородного золота Учуйского рудного узла (Адыча-Тарынская зона, республика Саха (Якутия)). № 2. С. 24.

Власова Э. А., Хмельков А. М. Исследование парагенетических особенностей состава клинопироксенов из кимберлитов (на примере трубки Чукукская, Якутия). № 3. С. 69.

Зинчук Н. Н. Особенности петрографического изучения кимберлитовых пород. № 6. С. 34.

Зинчук Н. Н. Роль петролого-минералогических и геохимических исследований в оценке потенциальной алмазоносности кимберлитов. № 1. С. 59.

Зубова Т. П., Позднякова Н. Н. Минералого-геохимические поисковые признаки золото-полисульфидно-кварцевого оруденения в ряду «коренной источник – кора выветривания – россыпь» (на примере Урала). № 1. С. 49.

Минькин К. М. Типизация вулканогенных отложений каменноугольного комплекса пород Миндякской грабенсинклинали Вознесенско-Присакмарской структурноформационной зоны Южного Урала. № 2. С. 35.

Нигай Е. В. Базальтоиды острогорского комплекса: геология, возраст, геохимия, геодинамика (Западный Сихотэ-Алинь). № 6. С. 17.

Остапенко Н. С., Нерода О. Н. Золотоносность полиметаллической минерализации Чагоян-Джурканского рудного поля Приамурья. № 3. С. 47.

Петроченков Д. А. Верхнеюрские интерьерно-ювелирные аммониты Ульяновской области: минеральный состав, геммологические характеристики. № 3. С. 58.

Серебрянников А. О., Логвинова А. М., <u>Соболев Н. В.</u> Особенности микропримесного состава хромшпинелидов-включений в алмазах из кимберлитов Якутии. № 6. С. 50.

Хачатрян Г. К., Анашкина Н. Е., Барышев А. Н. Распределение структурных примесей в алмазах из кимберлитовых трубок с различной алмазоносностью. № 5. С. 3.

ТЕХНОЛОГИИ ОБОГАЩЕНИЯ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ

Койжанова А. К., Магомедов Д. Р., Ерденова М. Б., Абдылдаев Н. Н., Бакраева А. Н. Исследование технологии бактериального выщелачивания меди из бедных медьсодержащих отвалов. № 6. С. 76.

Токтар Г., Кауметова Д. С., Койжанова А. К., Магомедов Д. Р., Атанова О. В., Абдылдаев Н. Н. Исследования обогатимости золотосодержащей руды. № 6. С. 86.

ДИСКУССИИ

Александров С. П. Отражение позиции кимберлитовых тел в материалах интерпретации космофотоснимков с использованием метода ГЕОНОМ. № 3. С. 84.

Барышев А. Н. Адвективная сущность кольцевых кратерных структур на Луне и Земле, проблемы их астроблемной интерпретации. № 5. С. 48.

СООБЩЕНИЯ

Мясников Ф. В. Алмазоносная литосфера Сибирской платформы (по геофизическим данным). Тектоническое районирование. № 6. С. 64.

Рященко Т. Г., <u>Макаров С. А.</u> Минеральный состав элювиальных и эоловых песков (на примере уникальной коллекции образцов). № 5. С. 59.

ИНФОРМАЦИЯ

Аксёнов Е. М., Беляев Е. В., Антонов В. А. Роль АО «ЦНИИгеолнеруд» в изучении минерально-сырьевой базы неметаллов Северного Кавказа. № 2. С. 53.

ПОЗДРАВЛЕНИЯ

75-летие Сергея Сероповича Вартаняна. № 1. С. 96. 80-летие Алексея Гордеевича Волчкова. № 1. С. 94. 90-летие Светланы Васильевны Яблоковой. № 1. С. 92.

ПАМЯТНЫЕ ДАТЫ

Летников Ф. А., Лось В. Л., Калиниченко Л. С., Козлянинов Д. М., Моргунова Т. В., Сидорова Е. В. «Геолог первым прикасается к тайне золота» К 90-летию со дня рождения В. А. Нарсеева. № 2. С. 68.

Общероссийская общественная организация «Ветерангеологоразведчик» отмечает 30-летний юбилей. № 3. С. 92.

Спиридонов Э. М. Норильские рудоносные интрузивы и сульфидные руды (к 120-летию М. Н. Годлевского). № 6. С. 95.

Памяти Константина Романовича Ковалева. № 3. С. 94. Памяти Евгения Александровича Козловского. № 1. С. 98. Памяти Евгения Михайловича Некрасова. № 6. С. 117. Памяти Игоря Яковлевича Полывянного. № 5. С. 70. Памяти Дмитрия Васильевича Рундквиста. № 1. С. 100.

IV рудная школа цнигри

15—17 февраля

Минерально-сырьевая база алмазов, благородных и цветных металлов ОТ ПРОГНОЗА К ДОБЫЧЕ

Организатор конференции – ФГБУ «ЦНИГРИ».

Принимаются заявки от студентов, аспирантов, молодых учёных и специалистов в возрасте до 35 лет.

На конференции запланировано проведение лекций ведущими специалистами академических и отраслевых институтов.

Конференция пройдёт в смешанном формате: докладчики будут иметь возможность выступить в зале конференций ФГБУ «ЦНИГРИ», для тех, кто не сможет приехать, доступно выступление в прямом эфире. Все лекции и выступления будут транслироваться онлайн.

НАПРАВЛЕНИЯ КОНФЕРЕНЦИИ



Металлогения, минерагения и рудогенез



Прогноз, поиски, оценка и разведка месторождений полезных ископаемых



Разработка прогнозно-поисковых и геолого-генетических моделей месторождений твёрдых полезных ископаемых



Методы изучения вещественного состава пород и руд



Физико-химические условия минералообразования



Геолого-экономическая оценка месторождений полезных ископаемых и участков недр



Использование геоинформационных технологий и пространственных данных в геологической отрасли



Современные технологии добычи и переработки минерального сырья



young@tsnigri.ru www.young.tsnigri.ru



8(495) 315-43-47, секретарь конференции Костина Елизавета Дмитриевна



Организационный взнос с участников не взимается.

Рабочий язык конференции – русский.



г. Москва, Варшавское шоссе, д. 129 к. 1

МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ



АПРЕЛЯ

2023

НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОГНОЗА, ПОИСКОВ, ОЦЕНКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ АЛМАЗОВ, БЛАГОРОДНЫХ И ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ

МОСКВА 🍪 ЦНИГРИ

К участию приглашаются представители территориальных органов Роснедр, геологоразведочных предприятий, компаний-недропользователей, научно-исследовательских отраслевых и академических институтов, вузов.

Программа конференции включает пленарное заседание, устные и стендовые доклады на тематических секциях.

Конференция пройдёт в смешанном (очном и онлайн) формате. У докладчиков будет возможность выступить в зале конференций ФГБУ «ЦНИГРИ». Для тех, кто не сможет приехать, доступно выступление онлайн. Все выступления будут транслироваться в прямом эфире.

Официальные языки конференции – русский и английский

Организационный взнос с участников не взимается.

Участие в экскурсии платное.

Окончания приёма заявок и оплаты участия в полевых экскурсиях – 27 февраля 2023 г.

conference@tsnigri.ru www.conference.tsnigri.ru 8(495) 315-43-47, секретарь конференции Горячева Алёна Сергеевна

ТЕМАТИКА КОНФЕРЕНЦИИ

- Минерагения АБЦМ
- Приоритетные направления прогнознопоисковых работ на АБЦМ
- Перспективные объекты для постановки геологоразведочных работ на АБЦМ различных стадий
- Опыт проведения и результаты геологоразведочных работ на АБЦМ
- Научно-методические основы комплексирования геологических, геохимических, геофизических методов прогноза, поисков, оценки и разведки
- Использование комплексных моделей месторождений для целей прогноза, поисков, оценки и разведки АБЦМ
- Разработка и реализация инновационных методов, методик и технологий ГРР
 - Г. Москва, Варшавское шоссе, д. 129 к. 1

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, надо 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, ученой 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. В случае отклонения статьи (отрицательная рецензия) редакция направляет авторам рецензию или мотивированный отказ за подписью главного редактора; редколлегия не вступает в дискуссию с авторами отклоненных статей; статьи, отклоненные редколлегией, повторно не рассматриваются.

4. В журнале не публикуются статьи, излагающие обобщения и предположения, не вытекающие из публикуемого оригинального фактического материала; серийные и излагающие отдельные этапы исследований.

5. Объем статьи не должен превышать 20 страниц, включая таблицы и список литературы. Следует выставлять 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: ogeo@tsnigri.ru

6. Для набора математических формул и химических символов рекомендуется использовать Microsoft Equation 2.0.

7. Список литературы дается 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 7) представляются в цветном или чернобелом варианте. Размер оригиналов рисунков не должен превышать формата страницы журнала (170×237 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 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 объем или не отвечающие данным требованиям, возвращаются автору.