ISSN 2411-3336; e-ISSN 2541-9404

ЗАПИСКИ ГОРНОГО ИНСТИТУТА
Journal of Mining Institute
Сайт журнала: pmi.spmi.ru

Обзорная статья

Геохимические исследования пород Сибирской магматической провинции и их роль в теории образования уникальных платино-медно-никелевых месторождений

Н.А.Криволуцкая
Институт геохимии и аналитической химии им. В.И.Вернадского РАН, Москва, Россия

***Как цитировать эту статью*:** Криволуцкая Н.А. Геохимические исследования пород Сибирской магматической провинции и их роль в теории образования уникальных платино-медно-никелевых месторождений // Записки Горного института. 2024. Т. 269. С. 738-756. EDN ROAVGE

***Аннотация*.** Норильские месторождения, уникальные как по геологическому строению, так и запасам никеля и платиновых металлов, привлекают внимание исследователей на протяжении нескольких десятилетий. Было предложено несколько гипотез их образования, из которых наибольшее распространение получили две: модель формирования руд в промежуточной камере и внедрение обогащенного сульфидами пикритового расплава на место кристаллизации и образование сульфидов *in situ* за счет ассимиляции толеитовой магмой сульфатсодержащих осадков при ее движении к поверхности. Главными вопросами генезиса в этих построениях являются состав родоначальных магм рудоносных массивов; взаимоотношение интрузивных и эффузивных пород; масштаб и роль ассимиляции вмещающих пород магмами. Эти вопросы рассматриваются в статье на примере большого объема аналитических данных, полученных автором при исследовании геологического строения магматических образований Норильского района. На их основании сделан вывод о том, что ни одна из предложенных моделей полностью не объясняет наблюдаемые факты, а также появление уникальных сульфидных руд. Для решения проблемы генезиса норильских месторождений необходим анализ развития P_3-T_1 магматизма во времени на территории всей крупной Сибирской магматической провинции, особенно ее восточной части, и установление связи с ним процессов рудообразования. Важнейшую роль в генезисе месторождений играло развитие Енисей-Хатангского прогиба, установление эволюции которого является первоочередной задачей в образовании сульфидных руд. Ее решение должно во многом базироваться наряду с геофизическими данными на изучении геохимии магматических пород провинции.

***Ключевые слова*:** Норильский район; Cu-Ni месторождения; Сибирская провинция; магматические породы; геохимия

Благодарность. Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ № 13.1902.21.0018 (соглашение 075-15-2020-802).

Поступила: 31.08.2023 ***Принята: 27.12.2023*** ***Онлайн: 23.04.2024*** ***Опубликована: 12.11.2024***

Введение. Д.И.Менделеев был выдающимся ученым-энциклопедистом, который наряду с химией основное внимание уделял минералогии и явлениям изоморфизма, рассмотренным в его квалификационных работах [1]. Наряду с этим его интересовало и поведение элементов в процессах образования углей и нефтей [2], относящееся к геохимии – одному из новых в 1870-х годах направлений геологии, в развитие которого внес огромный вклад его ученик по Санкт-Петербургскому университету В.И.Вернадский. Геохимия занимает одно из лидирующих мест в науках о Земле и позволяет по-новому решать многие геологические проблемы. К ним относится и происхождение платино-медно-никелевых месторождений [3-5], приуроченных к большим магматическим провинциям (БМП, или LIPs), крупнейшей из которых является Сибирская, охарактеризованная в работах как зарубежных исследователей [6, 7], так и многих российских геологов [8-10]. Использование современных аналитических методов при изучении ее пород и руд позволяет глубже понять природу их образования и возможные пути обнаружения новых месторождений.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2024. Т. 269. С. 738-756
© Н.А.Криволуцкая, 2024

Важнейшим районом аномального концентрирования стратегически важных металлов является северная часть Восточной Сибири – Северо-Сибирская никеленосная провинция [11], в состав которой входят суперкрупные PGE-Cu-Ni Норильские месторождения [12-14], играющие ведущую роль в мировой экономике никеля и платиновых металлов*. Непреходящий интерес исследователей разных стран вызывает геологическое строение этих месторождений, характеризующихся редким сочетанием крупных сульфидных залежей (первые десятки метров) с маломощными (100 м) телами базитового состава, относящимися к P_3-T_1 трапповой формации, в то время как другие медно-никелевые месторождения мира связаны с крупными древними плутонами [15, 16]. Генезис таких уникальных объектов представляет одну из важнейших проблем геологии, связанную с формированием гигантских геохимических аномалий в земной коре. Этой проблеме была посвящена международная программа геологической корреляции № 354 (1995-1999), симпозиумы в Санкт-Петербурге (1996), Аделаиде (2009), Пекине (2017) и других городах. Предложены многочисленные гипотезы образования норильских месторождений: магматическая, метасоматическая, гидротермальная [3, 17, 18] и др. Наиболее обоснованной является магматическая теория, подкрепленная экспериментальными работами [19, 20] и находкой закаленных твердых растворов в рудах [21]. Но в ее рамках существуют две принципиально разные модели: первая предполагает образование сульфидов в условиях закрытой магматической системы из пикритовой магмы, возникшей в промежуточной камере и обогащенной металлами и летучими компонентами [3, 13, 22], вторая объясняет формирование руд за счет ассимиляции ангидритсодержащих пород магмой в открытой магматической системе, где интрузивы – горизонтальные части каналов для магм, изливающихся на поверхность [23]. Таким образом, наиболее распространенные модели отличаются местом образования сульфидов: либо они привносятся в камеру кристаллизации силикатной магмой, либо они образуются *in situ*. Вторая из названных моделей получила широкое распространение, в том числе и за рубежом, благодаря предполагаемому эффективному накоплению большого количества сульфидов [24-26]. Каждая из моделей имеет свои достоинства и недостатки, но ряд вопросов является спорным и требует изучения – состав родоначальных магм рудоносных интрузивов; взаимоотношение рудоносных интрузивов с базальтами; масштаб ассимиляции вмещающих пород магмами.

На первом этапе исследований модели были протестированы. Анализ показал, что ни одна из них полностью не соответствует геологическим данным. Поэтому мы приступили к разработке новой модели образования месторождений Арктической зоны, учитывающей эволюцию магматизма и позицию месторождений в ее пределах [27, 28].

Основные сведения о геологическом строении территории. Проблема образования крупных магматических провинций является одной из ведущих проблем геологии, так как их появление играет важную роль в истории развития Земли [29]. К таким провинциям относят и континентальные трапповые провинции, крупнейшая из которых Сибирская [30]. В последнее время в ее состав включают всю совокупность магматических пород, близких по возрасту (251 млн лет) [29] и географическому положению (Западная Сибирь, Кузбасс, Алтай и Урал), без учета их геологических особенностей [31, 32]. Понятие «траппы» относится только к базальтам, покрывающим огромные площади на древних платформах (flood basalts), к которым принадлежат всего несколько провинций: Деканская, Парана-Этендека, Эмейшанская, Колумбия. Согласно принятой терминологии [33], этот термин учитывает геологическое строение потоков (покровов), их тектоническое положение и химический состав. Типичные траппы характеризуются выдержанностью мощности и состава пород (преимущественно толеитового) на больших территориях.

Такие вулканические образования распространены в Восточной Сибири и южной части Таймыра, которые представляют собой части древней Сибирской платформы (с архейским фундаментом и PR-T платформенным чехлом). К типичным траппам относятся толеитовые базальты туклонской – самоедской свит Норильского района и их аналоги: аянская и хоннамакитская свиты Путорана и кочечумская, нидымская, ямбуканская свиты Тунгусской синеклизы, бетлингская на Таймыре. Они имеют очень близкие геохимические характеристики: MgO 6-7 мас.%;

* Nornickel reports 1H 2023 interim consolidated IFRS financial results, 2023. 21 p. URL: https://nornickel.com/news-and-media/press-releases-and-news/nornickel-reports-1h-2023-interim-consolidated-ifrs-financial-results/ (дата обращения 26.08.2023).

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

TiO_2 0,9-1,7 мас.% [30]; Gd/Yb = 1,48-1,58 и La/Sm = 2,14-2,81; $^{87}Sr/^{86}Sr$ = 0,70466-70653; ε_{Nd} от +0,14 до +1,90; $^{206}Pb/^{204}Pb$ = 18,231-18,844 [5-7]. Им соответствуют силлы габбро-долеритов нормальной щелочности, в основном объединенные в катангский комплекс, а также в норильский рудоносный комплекс и др. [8, 9].

Однако на этой же территории, на плечах Енисей-Хатангского рифтогенного прогиба и оперяющих его структур (как и в Западной Сибири), распространены вулканиты, приуроченные только к линейным структурам (палеорифтовым зонам), характеризующиеся локальностью распространения, сильными вариациями мощности и состава (от щелочных до ультраосновных пород, свиты: сырадасайская на Таймыре, ивакинская – надеждинская в Норильском районе и арыджангская – маймечинская в Маймеча-Котуйском): MgO от 3-5 до 22-24 мас.%; TiO_2 0,9-5 мас.%; La/Sm = 2,4-5,72 и Gd/Yb = 1,6-7,9; $^{87}Sr/^{86}Sr$ = 0,70302-0,71114; ε_{Nd} от –11,0 до +6,6; $^{206}Pb/^{204}Pb$ = 17,796-19,111 [13, 30]. Интрузивные породы близкого состава также локализованы в этих зонах и преимущественно обнажаются на Таймыре (Дюмталейский, Боотанкагский массивы и др.) [8, 9]. Эти фундаментальные различия между двумя типами магматизма, названными рифтовым и платформенным (или типичным трапповым) [34], имеют решающее значение как для механизмов формирования БМП, так и условий возникновения магматических месторождений.

Следует выделить Сибирскую крупную магматическую провинцию, включающую оба типа магматических образований. Она может быть подразделена на Западно-Сибирскую и Восточно-Сибирскую магматические провинции; в состав последней в качестве основной части входит Сибирская трапповая провинция, образованная платформенными базальтами.

Восточно-Сибирская провинция (рис.1) состоит из вулканических, плутонических и пирокластических пород преимущественно раннетриасового возраста [29]. На дневной поверхности она имеет зональное строение, при котором в центральной части доминируют лавы, далее следуют туфы, а по периферии обнажаются интрузивные породы. В пределах провинции выделяется несколько районов, отличающихся по строению и составу магматических пород. Мощность вулканических пород максимальна в ее северных районах (до 3,5 км) – в Норильском и Маймеча-Котуйском районах, где распространены породы повышенной щелочности и магнезиальности. Основной объем пород провинции представлен толеитовыми базальтами нормальной щелочности (1-1,5 км), развитыми в Тунгусской синеклизе и частично эродированными к настоящему времени. Расчленение вулканогенной толщи на свиты было выполнено в ходе геологосъемочных работ в 1960-1970-х годах и продолжается в процессе 1:1000000 съемки (третье поколение). Для разных районов разработана своя стратиграфическая схема*.

Интрузивные породы подразделены на ряд комплексов, из которых самым распространенным является катангский, представленный габбро-долеритами нормальной щелочности (6-7 мас.% MgO). Силлы этого комплекса выходят на поверхность в обрамлении Тунгусской синеклизы. В северной части провинции присутствуют субщелочные, щелочные массивы, а также ультраосновные образования, в которых установлена медно-никелевая минерализация [13].

С интрузивами повышенной магнезиальности в Норильском районе связаны сульфидные PGE-Cu-Ni месторождения [13]. Самые крупные из них сконцентрированы в пределах Талнахского и Норильского рудного узлов, в периклинальных частях Хараелахской и Норильской мульд (рис.2). Рудоносные массивы представляют собой лентообразные тела мощностью около 100 м, шириной 1-2 км и протяженностью 15-18 км. Как правило, они залегают субсогласно в терригенно-карбонатных отложениях девона – перми (Хараелахский, Талнахский, Норильск 1, Пясино-Вологочанский), реже прорывают туфогенно-лавовые породы в виде дайко- или трубообразных тел (Норильск 2, гора Большая Барьерная, Северо-Масловский и Южно-Масловский). Интрузивы сложены габбро-долеритами (снизу вверх): контактовыми, такситовыми, пикритовыми, оливиновыми, оливинсодержащими, безоливиновыми [14]. Верхняя зона состоит из габбро-диоритов, лейкогаббро, феррогаббро (обогащенных титаномагнетитом габбро-долеритов), магматических брекчий; некоторые горизонты в ней могут отсутствовать. Руды представлены вкрапленностью сульфидов в

* Изученность территории РФ и ее континентального шельфа Госгеолкартами масштаба 1:200000 и 1:1000000. URL: https://vsegei.ru/ru/info/ggk/izuchennost (дата обращения 01.08.2023).

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2024. Т. 269. С. 738-756
© Н.А.Криволуцкая, 2024

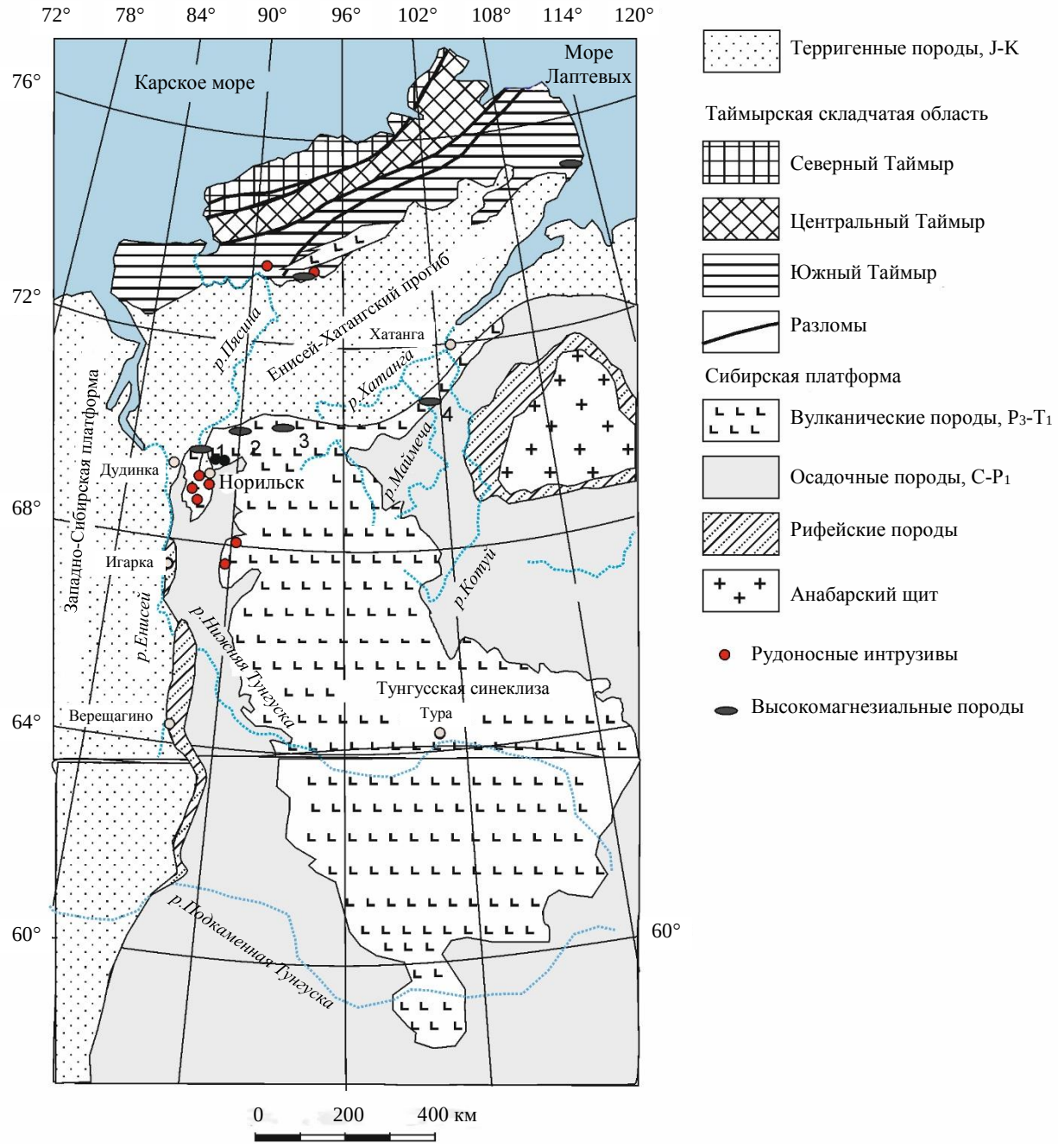


Рис.1. Схема тектонического строения Восточной Сибири с положением интрузивов с PGE-Cu-Ni минерализацией

габбро-долеритах нижних горизонтов интрузивных тел (пикритовых и такситовых габбро-долеритах) и во вмещающих их породах, а также жилами сплошных сульфидов в области нижнего контакта с подстилающими породами. В рудоносных интрузивах в верхних частях обнаружена малосульфидная платиновая минерализация [35].

Объекты и методы исследований. Главными объектами наших исследований явились интрузивы, с которыми связаны основные месторождения Норильского района – Октябрьское, Талнахское, Норильск 1, Масловское, Черногорское и Вологочанское (рис.2). Они изучались в ходе выполнения хоздоговорных работ ГЕОХИ РАН с ООО «Норильскгеология» по скважинам, пробуренным в разные годы: ОУГ-2, ТГ-21, ЗФ-12, ЗФ-10, РГ-2, МН-2, Г-22, ОВ-29, ОВ-32, Ч-55, ОМ-4, ОМ-24, ЛП-1 и др. Силлы, расположенные по обрамлению Тунгусской синеклизы и выходящие на поверхность, исследовались в коренных обнажениях. Это касается и эффузивных пород, распространенных как в главных тектонических структурах Норильского района, так и в ключевых

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

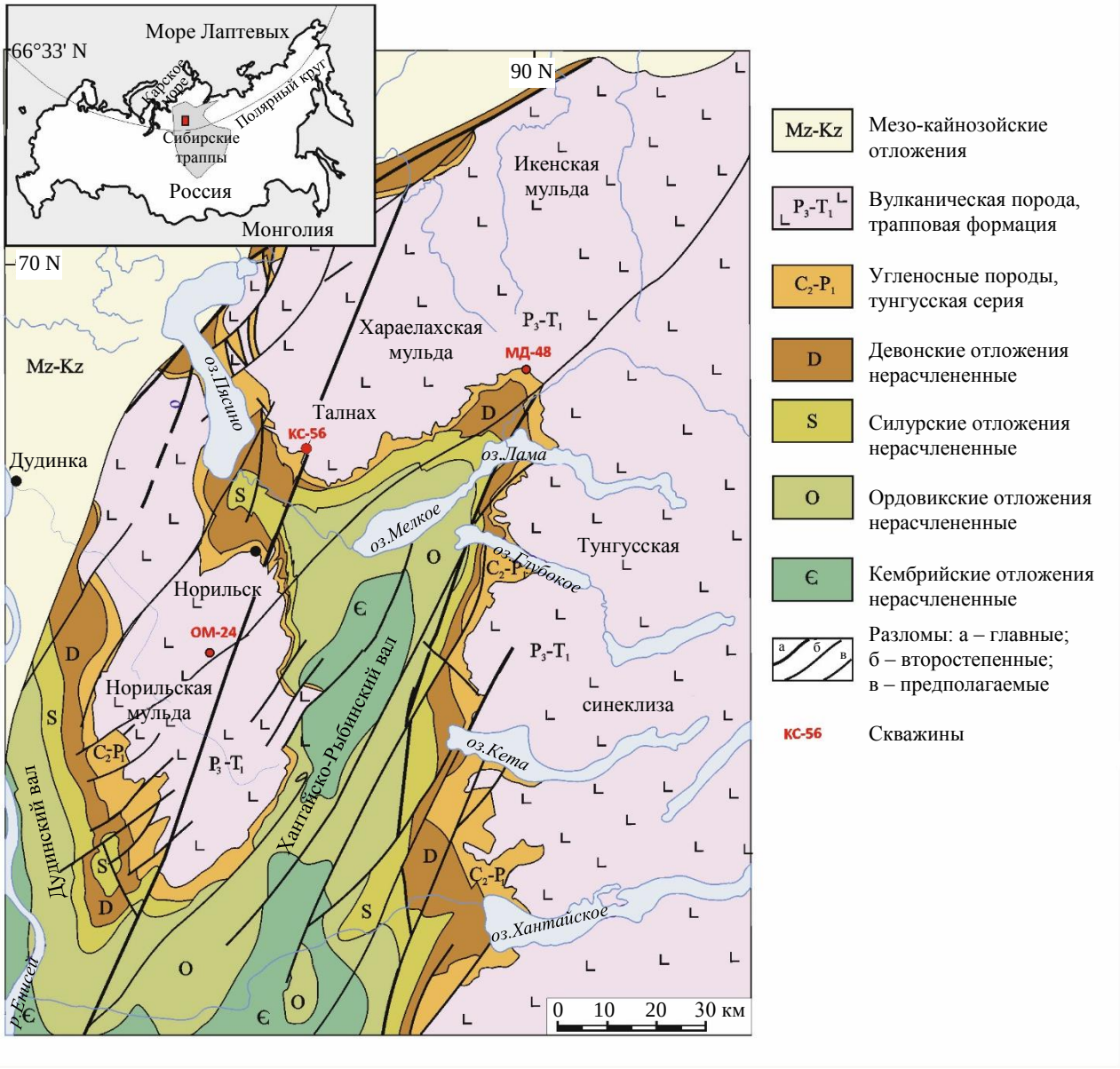


Рис.2. Схематическая геологическая карта Норильского района

районах Восточно-Сибирской провинции; значительно реже базальты для изучения отбирались по скважинам (ХС-51, ХС-59, ОМ-6, ОМ-25, ЛП-5). Многочисленные аналитические данные (главные, редкие элементы и распределение радиогенных изотопов; состав рудных и породообразующих минералов) были суммированы в работах [36, 37].

Концентрации главных оксидов в породах получены с помощью рентгенофлуоресцентного метода (XRF; AxiosmAX model from PANalytical – Almelo, The Netherlands) в ИГЕМ РАН (Москва) А.И.Якушевым, а редких элементов (ICP-MS) – в Институте прикладной и теоретической механики (Черноголовка) В.К.Карандашевым. Частично содержания и тех, и других элементов определялись методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой с лазерным отбором материала (LA-ICP-MS) в Институте химии Макса Планка (Майнц, Германия) Н.А.Криволуцкой и Д.В.Кузьминым под руководством Б.Столл. Там же получен большой объем аналитических данных по составу породообразующих минералов с использованием микрозонда GEOL JXA 8200 (лаборатория А.В.Соболева). Изотопы Sr, Nd and Pb в породах анализировались во ВСЕГЕИ (Санкт-Петербург) Б.В.Беляцким. Изотопный анализ серы сульфидов выполнен в ДВГИ ДВО РАН (Владивосток) аналитиком Т.А.Веливецкой по стандартной методике. Экспериментальное изучение расплавных включений осуществлялось Н.А.Криволуцкой в ГЕОХИ РАН. Указанные методы исследования были описаны ранее в монографии [36]. ЭВМ моделирование состава исходной

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2024. Т. 269. С. 738-756
© Н.А.Криволуцкая, 2024

магмы Талнахского интрузива выполнено с помощью программы КОМАГМАТ совместно с А.А.Арискиным [37].

Результаты исследований. ***Оценка составов родоначальных магм рудоносных интрузивов.*** Для магматических месторождений, в которых сульфиды являются составляющими интрузивных пород, в первую очередь рассматривается вопрос о роли состава магм в образовании руд, а именно, содержаний в них главных оксидов, редких элементов и особенно флюидных компонентов. Для их оценки использованы три метода:

• Подсчет средневзвешенных составов пород рудоносных интрузивов. Первоначально состав исходных магм параллелизовался с составом наиболее высокомагнезиальных пород – с пикритовыми габбро-долеритами и троктолитами, что привело к представлениям об образовании рудоносных интрузивов из ультрабазитовых магм, аналогичных гудчихинской свите [13, 38], и даже к выводу о самостоятельных инъекциях такой магмы, независимой от габброидной [39]. Для оценки родоначальных расплавов использовались составы зон закалки интрузивов. Однако часто контактовые зоны отражают процессы ассимиляции вмещающих пород магмой, а также подвержены гидротермальной проработке. Кроме этого, при внедрении гетерогенных магм вкрапленники часто «отгоняются» от контакта, и поэтому состав зон закалки чаще всего не соответствует реальному составу родоначальной магмы.

Наибольшее распространение получил метод оценки состава магм по валовому составу пород, так как породы слабо изменены. Еще М.Н.Годлевским [3] были отмечены специфические особенности рудоносных интрузивов Норильского района, полученные на основании расчета их средневзвешенного состава, а именно их повышенная магнезиальность (MgO 10-12 мас.%), хромистость (0,4 мас.%) и пониженная титанистость (TiO_2 < 1 мас.%), свидетельствующие о более глубинном источнике магм, приближающемся к пикритовому, по сравнению с типичными траппами. Механизм образования таких расплавов был предложен А.П.Лихачевым [14] как результат последовательного порционного плавления мантии. Также использовались подсчеты средневзвешенных составов рудоносных интрузивов для оценки состава магм. В частности, средневзвешенный состав Хараелахского интрузива был определен по скв. КС-56 (рис.2, табл.1, 2), расположенной в северо-восточной части Октябрьского месторождения.

Таблица 1

Состав пород по скважине КС-56, мас.%

Глубина, м	Компоненты									
	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	P_2O_5
1380,4	51,25	1,12	26,77	12,75	0,04	2,74	0,53	0,40	4,04	0,19
1382	57,06	1,13	24,75	9,27	0,04	2,73	0,34	0,85	4,05	0,07
1382,9	56,46	1,15	23,43	9,98	0,09	2,87	1,05	2,30	2,87	0,22
1385	48,38	1,08	17,74	10,96	0,20	7,25	10,60	2,77	0,83	0,14
1387,6	49,57	1,10	16,92	10,57	0,17	7,17	11,75	2,44	0,61	0,14
1441,9	42,44	0,69	11,43	17,69	0,18	14,50	8,02	1,21	0,28	0,10
1516,2	49,04	0,91	17,61	9,86	0,18	8,20	11,23	2,29	0,53	0,14
1530,7	49,07	0,91	16,74	9,90	0,20	8,20	11,92	2,33	0,54	0,07
1536,6	42,83	0,50	6,94	14,16	0,20	29,51	4,92	0,61	0,16	0,07
1537,4	40,47	0,61	8,02	19,59	0,23	22,45	5,13	0,70	0,17	0,06
1540,4	42,73	0,72	11,03	16,01	0,21	17,54	7,30	1,16	0,36	0,12
1541,6	42,31	0,72	11,82	16,26	0,11	14,32	8,19	1,39	0,29	0,08
1551,3	37,22	0,46	16,16	20,46	0,14	7,41	16,18	0,24	0,03	0,06
1552,6	47,49	0,49	21,88	9,12	0,08	7,13	11,40	1,97	0,47	0,07
1554,85	44,93	0,48	17,26	16,06	0,15	7,46	6,84	1,63	0,95	0,07
1556,4	53,65	0,63	23,32	7,08	0,13	4,25	5,85	3,48	1,98	0,13
1558,7	51,40	1,36	26,94	11,08	0,06	3,92	1,37	0,78	3,00	0,57
1559,2	58,68	1,02	23,74	8,91	0,08	2,74	0,78	0,67	3,33	0,07
1561,4	50,95	1,70	28,17	6,88	0,05	3,90	1,81	3,10	3,34	0,27

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Полученные результаты (табл.2) хорошо совпадают с представительными средневзвешенными составами норильских интрузивов, рассчитанными с использованием большого количества анализов по разным вертикальным разрезам, позволяющим учитывать сложную морфологию рудоносных массивов, которая существенно отличается от пластовой.

Таблица 2

Средневзвешенные составы интрузивов норильского комплекса, мас.%

Компоненты	Норильск 1	Талнах	СВ Хараелах	ЮЗ Хараелах	Черногорский
	1	2	3	4	5
SiO_2	48,3	46,1	46,15	50,26	47,2
TiO_2	0,85	0,74	0,83	0,91	0,61
Al_2O_3	15,33	15,5	15,08	17,32	16,7
FeO	12,3	13,4	13,56	10,89	9,91
MnO	0,19	0,15	0,17	0,18	0,16
MgO	10	11,3	10,81	7,93	11,64
CaO	10,4	10,3	9,52	9,49	11,4
Na_2O	1,86	1,32	1,76	2,01	1,85
K_2O	0,57	0,69	0,56	0,84	0,46
P_2O_5	0,2	0,25	0,12	0,18	0,07
Cr	1000	1900	–	1058	1800

Примечания. Данные по номерам скважин: 1 – 54 скважины [3]; 2 – 29 скважин [40]; 3 – КС-56 (табл.1); 4 – ТГ-21; 5 – Ч-55 [36]. Прочерк – элемент не определялся.

• Расчетные методы. Использование метода геохимической термометрии [41] для Талнахского интрузива позволило с помощью ЭВМ программы КОМАГМАТ оценить состав расплава, температуру его кристаллизации и количество интрателлурических вкрапленников при внедрении в современную камеру [37]. Было рассчитано, что талнахская магма содержала 7 об.% оливина и 4 об.% плагиоклаза (т.е. доля кристаллов в ней составила 11 об.%), а состав содержащего их расплава был близок к базальтам мороновской – мокулаевской свит – типичным платформенным базальтам (т.е. траппам), мас.%: 49,44 SiO_2, 1,20 TiO_2, 15,44 Al_2O_3, 11,43 FeO, 0,22 MnO, 8,06 MgO, 11,53 CaO, 1,82 Na_2O, 0,69 K_2O, 0,19 P_2O_5.

• Состав расплавных включений в породообразующих минералах. Первый и второй методы помогают оценить составы твердой и жидкой фаз родоначальных магм, но не позволяют определить содержания в них летучих компонентов, которым многими исследователями придается чрезвычайно важная роль в образовании руд, в том числе предполагается перенос ими сульфидов в верхние зоны массивов и даже на поверхность [42, 43]. Идея о повышенных содержаниях летучих компонентов в магмах, особенно воды и хлора, базировалась на обнаружении мощных метасоматических ореолов вокруг рудоносных интрузивов Талнахского рудного узла [44]. Но современные данные свидетельствуют о том, что эти ореолы сформированы в результате циркуляции метеорных вод в области контактов магматических пород с вмещающими толщами, которые характеризуются повышенной трещиноватостью и проницаемостью [45].

Для изучения содержаний летучих компонентов в магмах мы использовали расплавные и флюидные включения в оливинах и пироксенах из ряда рудоносных массивов – Талнахского, Норильск 1, Северо-Масловского и Южно-Масловского (рис.3), а также безрудных интрузивов – Нижне-Талнахского и Зеленогривского [28, 31]. Состав расплава в целом оказался близок к толеитовым базальтам несколько повышенной магнезиальности (MgO 8-10 мас.%) (табл.3), а концентрации летучих компонентов – одинаково низкими и в рудоносных, и в безрудных интрузивах (H_2O 0,4-1,1 мас.%; Cl 0,02-0,2 мас.%; F = 315 ppm в среднем), что соответствует их образованию в платформенных условиях вблизи поверхности [46].

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2024. Т. 269. С. 738-756
© Н.А.Криволуцкая, 2024

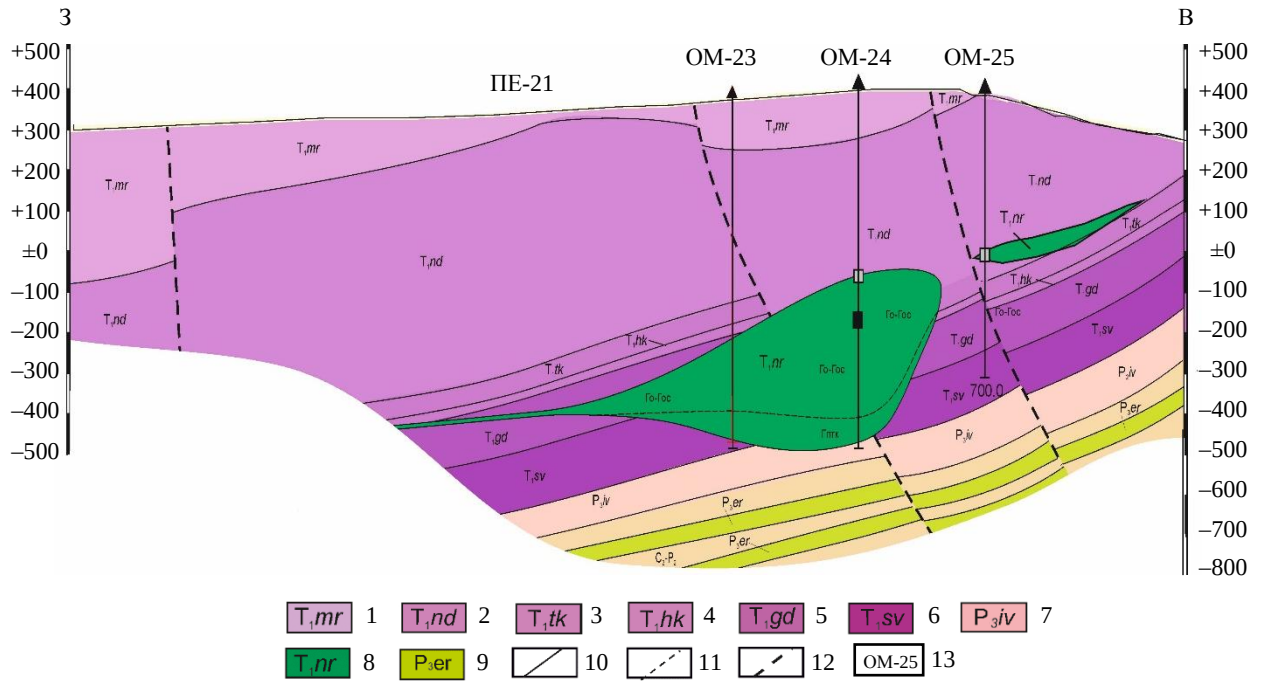


Рис.3. Геологический разрез Южно-Масловского интрузива (по данным ООО «Норильскгеология», с изменениями автора). Положение образца из скв. ОМ-24/589 показано черным прямоугольником

1-7 – вулканогенные породы трапповой формации, свиты (1 – моронговская; 2 – надеждинская; 3 – туклонская; 4 – хаканчанская; 5 – гудчихинская; 6 – сыверминская; 7 – ивакинская); 8, 9 – интрузивные комплексы (8 – норильский, 9 – ергалахский); 10 – геологические границы; 11 – границы между разновидностями пород; 12 – разломы; 13 – скважины и их номера

Таблица 3

Составы фаз в раскристаллизованном включении и экспериментально закаленного расплава, мас.%

Номер точки, фаза	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	FeO	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	P_2O_5	V_2O_5	Cr_2O_3	NiO	ZnO	S	Cl	H_2O	Сумма
1. Cpx2	51,69	0,9	3,17	12,68	0,33	13,45	19,39	0,3	–	–	0,08	–	–	–	–	–	–	101,99
2. Cpx1	52,53	0,52	2,24	9,46	0,23	15,75	20,47	0,26	–	–	0,14	–	–	–	–	–	–	101,6
3. USp	0,33	20,8	10,89	67,49	0,5	0,39	0,15	–	–	–	0,29	0,08	0,09	0,1	–	–	–	101,11
6. Gl	66,5	0,14	20,69	1,73	0,13	0	3,45	6,66	1,98	0,49	0	–	–	–	–	–	–	101,78
Расплав	49,2	1,73	10,82	14,9	0,26	7,15	11,51	2,68	0,54	0,17	–	–	–	–	0,11	0,15	0,44	99,87

Примечания. Номера точек и площадь (показана квадратом), на которой определялся состав стекла, обозначены на рис.4, *б*. Расплав – состав гомогенизированного включения при T = 1190 °С в пироксене (Mg#75) из обр. ОМ-24/676.8. Прочерк – элемент не определялся.

В полностью гомогенизированном включении, представленном закаленным расплавом, были определены концентрации редких элементов с помощью вторично-ионной масс-спектрометрии (SIMS) в ЯФ ФТИАН им. К.А.Валиева РАН (Ярославль) аналитиками С.Г.Симакиным, Е.В.Потаповым, ppm: 33 Rb, 187 Sr, 135 Zr, 188 Ba, 25 Ce, 5,30 Sm, 5,91 Gd, 5,41 Er, 9,0 Yb, 0,37 Ta, 1,04 Th, 0,40 U, 3,96 Pb, 3,55 Hf, 0,66 Lu, 7,00 Dy, 3,3 Eu, 18 Nd, 3,5 Pr, 11 La, 0,55 Cs, 6,0 Nb, 42 Y, 4,4 Yb, 4,4 Er. Нормированный к примитивной мантии спектр распределения редких элементов во включении приведен на рис.4, *в* (включение), где также показано распределение редких элементов в данной породе (обр. ОМ-24/676.7), и в базальтах мокулаевской свиты, с которой сопоставляются рудоносные интрузивы [23]. Последние два спектра практически не отличаются, в то время как спектр включения характеризуется более высокими содержаниями всех элементов, что обусловлено накоплением их во фракционированном расплаве, из которого кристаллизовался минерал-хозяин – пироксен. Этим же объясняется небольшая отрицательная аномалия стронция, отражающая несколько более раннюю кристаллизацию плагиоклаза.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

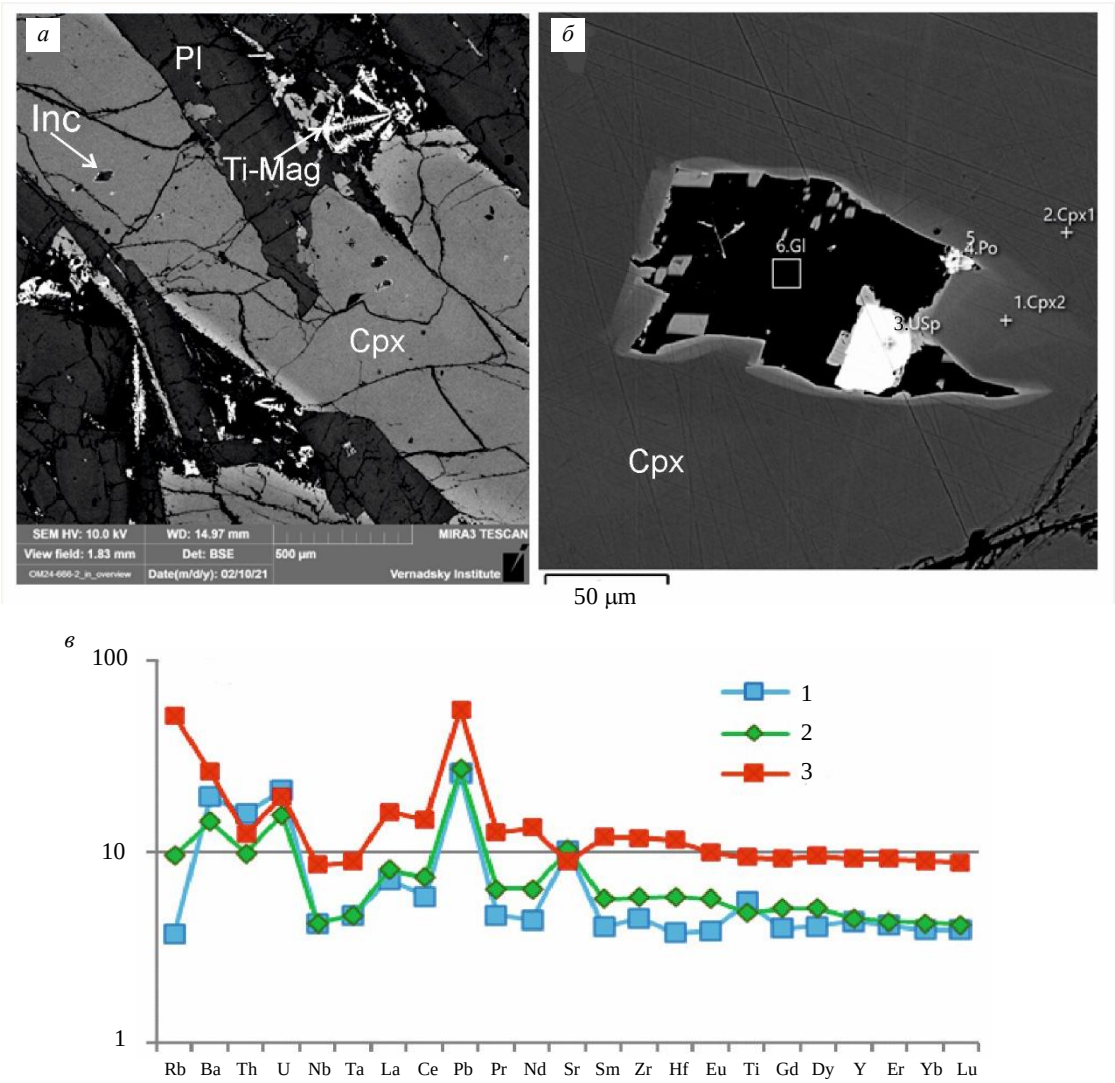


Рис.4. Морфология и состав расплавных включений в пироксенах Южно-Масловского месторождения (скв. ОМ-24, глубина 589 м, см. рис.3): *а* – общий вид; *б* – включение с точками, в которых проведены измерения (см. табл.3); *в* – спектры распределения редких элементов, нормированных к примитивной мантии [47], в базальтах мокулаевской свиты (1), вмещающих породах (2) и включениях (3); Cpx – клинопироксен; Pl – плагиоклаз; Ti-Mag – титаномагнетит; Inc – включение; Gl – стекло; USp – ульвошпинель; Po – пирротин

Взаимоотношение рудоносных интрузивов с базальтами. Вопрос о соотношении рудоносных массивов с лавами закономерно возникает при анализе геологического строения района и активно обсуждается начиная с конца 1950-х годов [3, 13, 23]. Сложность заключается в том, что рудоносные интрузивы располагаются стратиграфически ниже туфолавовой толщи и редко имеют контакты с базальтами. Исключение составляют массивы, расположенные в Норильской мульде, прорывающие эффузивы ивакинской – гудчихинской свит (Норильск 1, Норильск 2) и ивакинской – надеждинской свит (Южно-Масловский интрузив) [36]. Однако в качестве предполагаемых комагматов рассматриваются залегающие значительно выше указанных свит мороновские и мокулаевские базальты [23], с которыми контакты рудоносных интрузивов отсутствуют. Поэтому единство этих образований обосновывается их близким редкоэлементным [6, 43] и изотопным составом (рис.5). В последние годы получен огромный объем геохимических данных по рудоносным интрузивам [7-9], который свидетельствует о сходстве многих параметров между ними и типичными траппами. К ним относятся и данные по изотопии Sr, Nd, Pb. Однако, несмотря на близость изотопных характеристик, например ε_{Nd} (рис.5, *б*), Ю.А.Костицыным с соавторами [10] было показано, что рудоносные интрузивы характеризуются очень узким диапазоном вариаций этого

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2024. Т. 269. С. 738-756
© Н.А.Криволуцкая, 2024

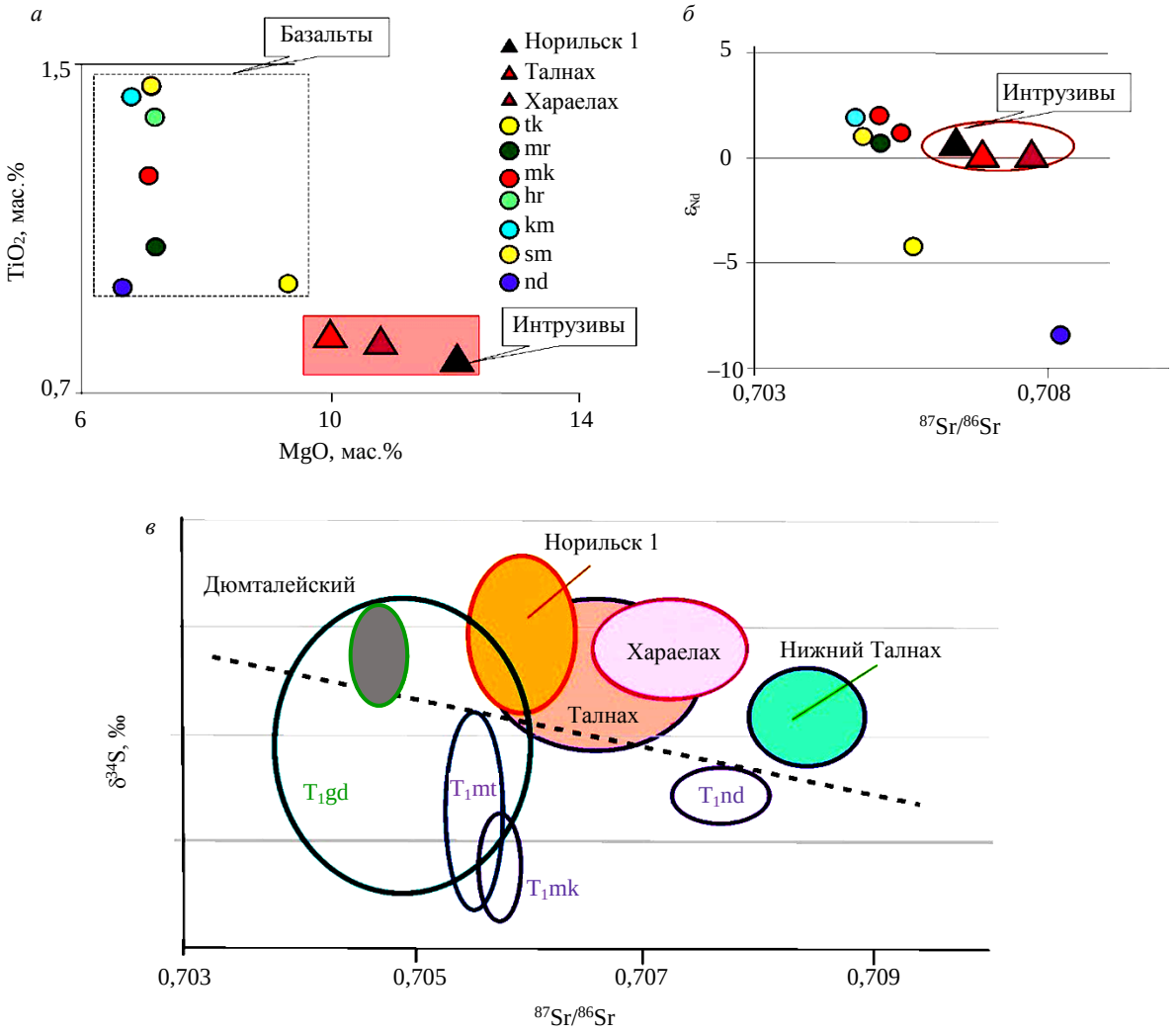


Рис.5. Диаграммы MgO –TiO_2 (*а*); $^{87}Sr/^{86}Sr$ – ε_{Nd} (*б*); $^{87}Sr/^{86}Sr$ – $\delta^{34}S$ (*в*) для интрузивных пород и платформенных базальтов [8, 36, 48-50].
Свиты: tk – туклонская; mr – мороновская; mk – мокулаевская; hr – хараелахская; km – кумгинская; sm – самоедская; nd – надеждинская; gd – гудчихинская

параметра в отличие от эффузивов. Но даже полная идентичность геохимических показателей (как изотопных, так и редкоэлементых) не может служить доказательством связи между интрузивами и базальтами, так как они могут кристаллизоваться из разных не связанных между собой порций магмы, образующихся в одном очаге, но поступающих либо на поверхность, либо кристаллизующихся на глубине даже в одно и то же время. Это продемонстрировано на рис.6, *а* (левая часть). Связь этих образований (рис.6, *а*, правая часть), которая может наблюдаться либо в непосредственной близости от разных внедрений, либо на значительном расстоянии от них (что условно показано разделяющей эти области вертикальной линией на рисунке), может быть доказана только геологическими исследованиями.

Отсутствие связи между интрузивами и лавами в первую очередь определяется их несоответствием по содержаниям главных оксидов (см. рис.5, *а*), а именно повышенными концентрациями магния и хрома в рудоносных интрузивах и пониженным – титана, что обычно игнорируется.

Противоречит связи рудоносных массивов с базальтами любых свит и практически полное отсутствие сульфидов (< 0,1 мас.%) в последних, хотя при принадлежности пород к единой системе базальты должны были быть в той или иной мере обогащены сульфидными минералами, поскольку невозможно вообразить полную отсадку сульфидного расплава только в одном из подводящих каналов на огромной площади, покрываемой базальтами в Восточной Сибири. Важным фактором отсутствия прямой связи между базальтами и интрузивами является и несовпадение

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

изотопного состава серы: все рудоносные массивы характеризуются более тяжелым ее составом (рис.5, *в*). Изотопный состав вкрапленных сульфидных руд из пикритовых габбро-долеритов (номер образца соответствует номеру скважины/глубине, м) Октябрьского месторождения,

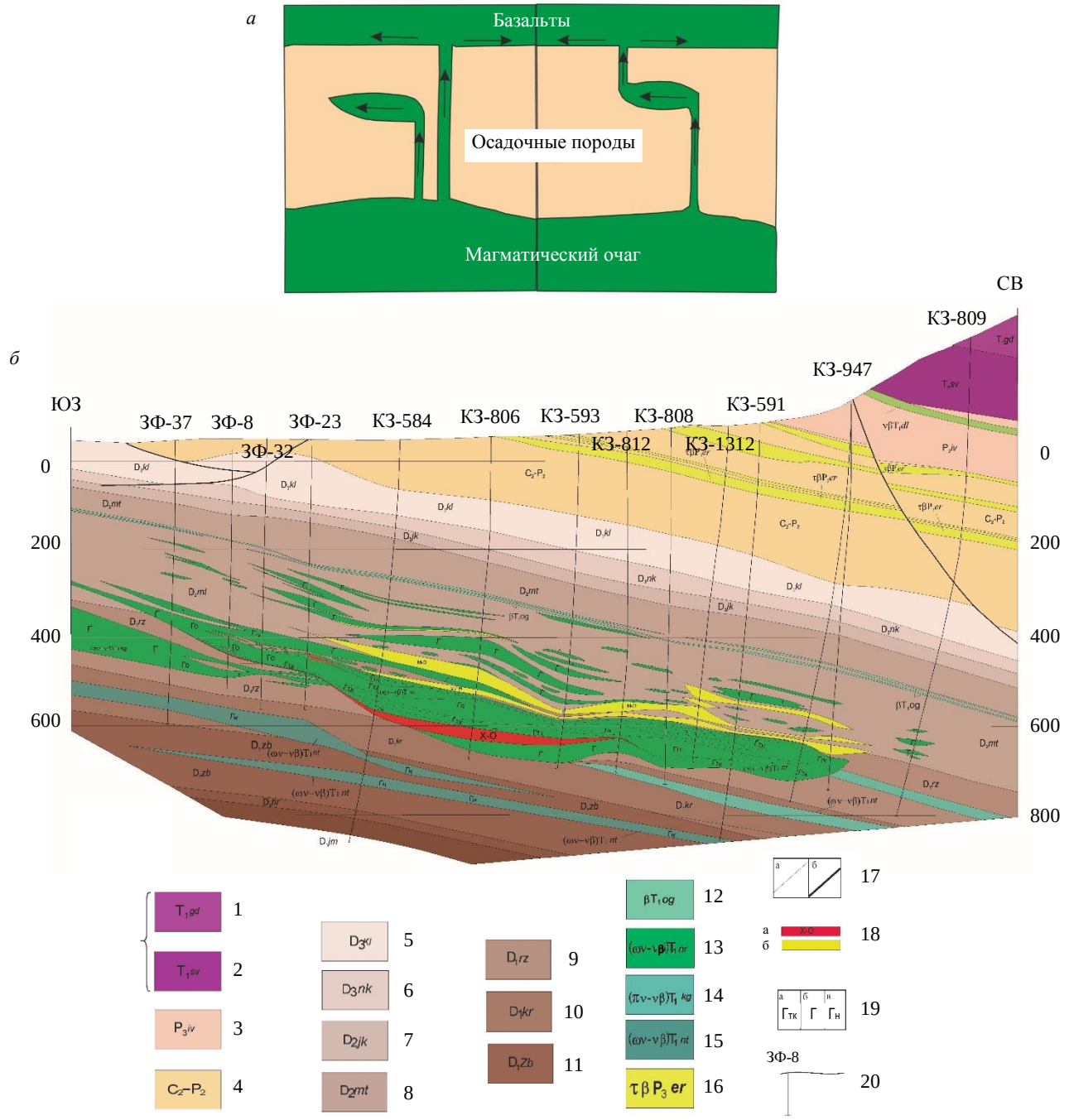


Рис.6. Принципиальная схема (*а*) образования закрытой (слева) и открытой (справа) магматических систем и строение западной части Октябрьского месторождения (*б*) (составлено автором с использованием материалов ООО «Норильскгеология»). Стрелками показано направление движения магмы

1-2 –триасовая система, свиты (1 – гудчихинская; 2 – сыверминская); 3 – пермская система, ивакинская свита нерасчлененная; 4 – каменноугольная система, тунгусская серия нерасчлененная; 5-11 – девонская система, свиты (5 – каларгонская; 6 – накохозская; 7 – юктинская; 8 – мантуровская; 9 – разведочнинская; 10 – курейская; 11 – зубовская); 12-16 – интрузивные образования, комплексы (12 – оганерский; 13 – норильский; 14 – круглогорский; 15 – нижнеталнахский; 16 – ергалахский); 17 – геологические границы (а) и разрывные нарушения (б); 18 – рудные тела: а – массивных руд (Х-О – основная хараелахская залежь), б – медистых руд; 19 – интрузивные породы: а – пикритовые, троктолитовые, такситовые и контактовые габбро-долериты; б – безоливиновые оливинсодержащие, оливиновые габбро-долериты; в – оливиновые и пикритовые габбро-долериты нижнеталнахского интрузива; 20 – буровые скважины и их номера

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

$\delta^{34}S$, ‰: +10,1 – PT-30/1532.2; +9,4 – PT-30/1540.5; +9,4 – PT-101/1668.9; +10,1 – PT-101/1709.2; +10,4 – PT-101/1715.9; +10,1 – PT-7/1473.8; +11.2 – PT-7/1625.

Многочисленные попытки использования U-Pb данных по цирконам и бадделеитам [8, 9] для решения вопроса о возрастных взаимоотношениях интрузивов между собой и лавами остаются до сих пор неудачными даже не в силу недостаточной точности метода (которая может быть очень высока – до 10 млн лет – и перекрывается с диапазоном образования пород), сколько с наличием в породах огромного числа указанных минералов, варьирующих по составу. Например, в образцах габбро-долеритов Хараелахского массива возраст цирконов меняется в диапазоне от 347±16 до 235±6,1 млн лет [39], что, как видно, не связано с точностью определений, а обусловлено присутствием в породах реальных разновозрастных минералов, не отражающих время кристаллизации пород.

Бурное развитие геохимических методов, в том числе локальных, за последние три десятилетия привело к тому, что их результаты часто оторваны от геологической основы. Единственным надежным критерием существования открытой магматической системы, в которой интрузивы являются частью подводящих каналов для лав на поверхность, могут быть только геологические данные, подтверждающие такое строение. Для интрузивов норильского комплекса в настоящий момент такие доказательства отсутствуют. Независимость рудоносных интрузивов от базальтов наиболее отчетливо проявляется на примере Хараелахского массива, содержащего крупнейшее из месторождений Норильского района – Октябрьское. Важный факт – его полная сохранность в ходе геологической истории, а именно отсутствие признаков эрозии в любых его частях. Это позволяет восстановить картину его взаимоотношения с вмещающими породами, полученную в ходе эксплуатации и детальной разведки (рис.6, *б*). Строение юго-западной части месторождения, важнейшей для понимания его генезиса, рассмотрено в ряде работ [5, 51]. На разрезе хорошо видно, что интрузивные породы выклиниваются в западном направлении и не имеют связи с базальтами: в случае наличия соединительных каналов между этими образованиями последние обнажались бы на дневной поверхности над интрузивом, поскольку предполагаемые комагматичные массивам эффузивы эродированы на этой площади. Лентовидная морфология большинства рудоносных интрузивов также, хотя и косвенно, подтверждает отсутствие прямой связи с лавами, которая иногда устанавливается в южной части Сибирской платформы, где широко распространены типичные силлы, имеющие лестничное строение.

Таким образом, вопрос о взаимоотношениях интрузивов и лав (в любых районах) не может быть решен только с помощью геохимии. Несомненно, что близость их геохимических характеристик свидетельствует о генетическом родстве между породами разных фаций, но не может быть доказательством прямой связи между ними, т.е. комагматичности – образования из одной и той же порции магмы. Идентичные по составу эффузивные и интрузивные породы (в случае отсутствия дополнительных процессов – ассимиляции, смешения и т.д.) могут кристаллизоваться как одновременно, так и с интервалом во времени. Трудность получения геологических свидетельств их связи между собой (а часто и невозможность прямого наблюдения в силу слабой обнаженности) и привела к тому, что в качестве доказательства единой магматической системы рассматриваются геохимические особенности пород.

Процессы ассимиляции при внедрении рудоносных магм. Наличие огромных объемов сульфидных руд, связанных с маломощными телами силикатных пород, привело к постановке вопроса об источнике серы в месторождениях Норильского района. М.Н.Годлевским [3] было высказано предположение об ассимиляции ангидрита из вмещающих пород для получения ее необходимого количества в рудах. Для проверки этой гипотезы им совместно с Л.И.Гриненко [49] были начаты работы по изучению изотопного содержания серы в сульфидах. Первые полученные результаты продемонстрировали ее тяжелый состав (в среднем $\delta^{34}S$ = +12 ‰) по сравнению с другими медно-никелевыми месторождениями мира, в которых $\delta^{34}S$ близка к 0 ‰ и соответствует ее содержанию в метеоритах. Эти результаты воспроизводятся на протяжении многих лет [9, 26, 52] и рассматриваются как доказательство ассимиляции рудоносными магмами ангидритсодержащих пород, однако накопилось много аргументов, противоречащих этой идее:

• Быстрое остывание интрузивов препятствует не только предполагаемой длительной ассимиляции вмещающих пород [15], но и вообще масштабному взаимодействию магмы с окружающими

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

породами. О высокой скорости остывания расплава свидетельствует в первую очередь субвулканический характер интрузивных тел, сложенных габбро-долеритами – с характерными для таких тел офитовыми структурами, зональными породообразующими минералами и стекловатыми включениями в них [22, 28].

• Геохимия контактовых зон. О быстрой кристаллизации магм и остывании массивов свидетельствуют и геохимические особенности контактовых пород. Они были рассмотрены нами ранее на примере Южно-Масловского интрузива [36], залегающего в эффузивах: нижний контакт локализован в трахибазальтах ивакинской свиты, а верхний – в базальтах надеждинской свиты (ее нижней подсвиты). Вмещающие породы отличаются от габбро-долеритов по концентрациям и соотношению редких элементов, в частности повышенным La/Sm отношением, которое чутко реагирует на ассимиляцию магмой вмещающих пород. Значение (La/Sm)*n* либо растет в габбро-долеритах на расстоянии 1-2 м от верхнего контакта внутри интрузива (скв. ОМ-25), либо не меняется совсем (скв. ОМ-24), фиксируя полное отсутствие ассимиляции в зоне контакта. Аналогичные исследования выполнены и для Хараелахского интрузива.

• Средневзвешенные составы массивов, залегающих в разных по литологии толщах. Предполагаемая масштабная ассимиляция вмещающих пород должна отражаться на средневзвешенном составе интрузивов, залегающих в разных по составу отложениях и объеме содержащихся в них руд. Часто в качестве доказательства широкого проявления ассимиляционных процессов ссылаются на разный масштаб месторождений, связанных с главными интрузивными телами – Хараелахским, Талнахским и Норильском 1, залегающими полностью в породах девона (частично ангидритсодержащих), девона – терригенной Тунгусской серии (C_2-P_2) и Тунгусской серии и туфолавовой толще соответственно. Однако рассмотрение бóльшего количества массивов эту закономерность не подтверждает. В первую очередь автором статьи был изучен Пясино-Вологочанский интрузив. Его геологическое положение идентично Хараелахскому, но он не содержит массивные руды, и запасы металлов в нем на два порядка ниже, чем в Октябрьском месторождении. Несмотря на близость стратиграфической позиции Норильска 1 и Черногорского массивов, их рудоносность существенно отличается.

• Проблема источника серы. *Ангидрит.* Наиболее часто в качестве исходного материала для получения дополнительной серы при образовании руд рассматривается ангидрит, присутствующий в окружающих рудоносные массивы породах. Непосредственное его плавление невозможно, так как температура плавления минерала выше, чем температура магмы (1450 °С по сравнению с 1200 °С расплава). Об этом свидетельствуют редкие ксенолиты ангидрита в магматических породах [14, 15]. Чаще предполагается его разложение (T < 1100 °С) с выделением газов, которые могут растворяться в базитовом расплаве, но при этом возможный объем полученной серы не подсчитывается. Растворимость SO_3 и SO_2 низкая и не превышает 1 мас.%, и, таким образом, количество серы в расплаве не превышает 0,5 мас.%. Предполагаемая магматическая природа ангидрита, обнаруженного в пикритовых габбро-долеритах [53], и его кристаллизация непосредственно из расплава не доказана: приведенные только морфологические характеристики недостаточны для установления его магматического генезиса. Кроме того, оценка окислительно-восстановительных условий при кристаллизации рудоносных пород, выполненная с применением оливин-шпинелевого равновесия [36], свидетельствует о восстановительных условиях, при которых ангидрит в них не образуется. Поскольку в этих породах часто присутствует гидротермальный и метасоматический ангидрит, необходимы четкие критерии отнесения ангидритов к разным типам, среди которых важнейшую роль должны иметь изотопные данные. Но такие исследования автором выполнены не были, поэтому магматическая природа описанного ангидрита остается сомнительной.

Важной характеристикой ангидрита как предполагаемого источника серы в рудах является изотопный состав содержащейся в нем серы. Изотопный состав серы осадочного ангидрита, который рассматривается в качестве контаминанта, существенно отличается от изотопного состава серы сульфидов из руд норильских месторождений: $\delta^{34}S$ ангидрита из девонских отложений составляет +22-24 ‰, а наиболее типичное значение $\delta^{34}S$ для сульфидов +12,8 ‰ [52]. Первоначально в сульфидных рудах западной части Октябрьского месторождения значения изотопного состава серы сульфидов и ангидритов из вмещающих габбро-долериты пород были близки ($\delta^{34}S$ = 12-13 ‰). Это объясняется, по-видимому, тем, что проанализированные в этой части

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

месторождения ангидриты имели метасоматический генезис, так как в этой области широко проявлены процессы метасоматоза [44]. Полученные вариации характерны для преобразованных поздними гидротермальными процессами ангидритов, в то время как на удалении от интрузивов ангидриты из девонских пород имеют более тяжелый и отличный от руд состав серы [52].

Разница в изотопном составе вмещающих пород и руд часто объясняется поступлением серы в магму из двух источников: мантийного и корового. Хотя расчеты этого смешения не приводятся, предполагается примерно равное участие их в образовании сульфидов. Но в этом случае объем мантийной серы, которая должна содержаться в расплаве, намного превышает ее растворимость в базитовых магмах и не может быть получен *in situ*.

Еще одним предполагаемым механизмом обогащения серой базитовых магм является ее поступление из флюидов, циркулирующих во вмещающих породах при образовании рудоносных пород [9]. Конкретные детали этого процесса, такие как состав флюида (метеорные воды?), количество растворенной в нем серы, формы переноса серы, происходящие при этом изотопные эффекты и другие аспекты, не охарактеризованы в работе. Необходимо при этом учесть, что в ангидрите сера находится в окисленном состоянии (S^{6+}), а в расплаве – в восстановленном (S^{2-}), поэтому необходимо показать, на каком этапе осуществляется этот переход. Поскольку растворимость воды в платформенных магмах в близповерхностных условиях не превышает 1 %, а количество в ней серы также ограничено (автор исследования [9] не указывают возможное ее содержание), то даже при ее поступлении в расплав объем полученных сульфидов будет ничтожен по сравнению с наблюдаемым в месторождениях [23].

Кроме того, поступление флюида должно происходить на стадии существования расплава, когда сера связывается в сульфиды. Механизм движения холодного флюида в горячую магму в термоградиентном поле в работе не рассмотрен. Известно, что при внедрении базитовых магм в осадочные породы газы и флюидные компоненты вмещающих пород, в частности нефтеносных, «отжимаются» от места их внедрения и локализации [54]. В рассматриваемой модели не обсуждается состав пород, из которых удаляется ангидрит, и ореол их распространения. Судя по предполагаемому объему вынесенной серы, породы должны быть стерильны по отношению к ангидриту в обширной области. В действительности, ангидритсодержащие породы располагаются в ближайшем окружении рудоносных интрузивов. В частности, хорошо известно, что непосредственно в кровле в западной оконечности Хараелахского массива в породах мантуровской свиты располагаются конкреции осадочного красного ангидрита, не имеющие никаких признаков гидротермальной переработки. В.В.Ревердатто с соавторами [55] был оценен возможный масштаб термального воздействия на вмещающие породы, который в приповерхностных условиях (2 км) для габбро не превышает 500 м. Именно в этой ближайшей к контакту области мы должны наблюдать образования, оставшиеся после предполагаемого растворения и удаления ангидрита флюидами. Но фиксируемые в этой области породы не несут признаков его растворения и удаления сульфатов. Помимо Талнахского рудного узла существуют месторождения, связанные с массивами, залегающими не в осадочных породах, а в базальтах (Масловское), для которых трудно представить флюидный перенос серы из вмещающих пород.

Проблема происхождения серы в норильских рудах оказалась намного сложнее, чем она представлялась еще два-три десятилетия назад, до применения новых геохимических методов исследования, в частности изучения радиогенных изотопов. Во-первых, изотопы стронция не коррелирует с изотопией серы в рудоносных интрузивах. Например, их соотношения в Талнахском и Нижне-Талнахском интрузивах показывают обратные взаимоотношения с предполагаемой степенью ассимиляции: Талнахский массив с уникальными по запасу металлов рудами ($\delta^{34}S$ = +10,9), для которого предполагается существенная ассимиляция вмещающих пород, должен иметь более радиогенный состав стронциия в породах по сравнению с безрудным Нижне-Талнахским ($\delta^{34}S$ = +6,6) [9, табл.22]. В Талнахском интрузиве отношение $^{87}Sr/^{86}Sr$ = 0,706 существенно ниже, чем в Нижне-Талнахском, где предполагаемая ассимиляция отсутствует (0,709-0,710) [9, табл.56]. Во-вторых, автор книги [9] никак не объясняют появление тяжелой серы ($\delta^{34}S$ = +10,9) [9, табл.22] в породах мантийного происхождения, для которых типичны $^{87}Sr/^{86}Sr$ = 0,704-0,705 [9, табл.43] и ε_{Nd} = +4,5 [9, табл.32]. Данные по радиогенным изотопам осадочного ангидрита, особенно

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Pb [36], также свидетельствуют о том, что он не может рассматриваться в качестве контаминанта магмами при образовании руд.

Неоднородность изотопного состава сульфидов отдельных месторождений в Норильском районе рассматривается как доказательство существования открытой магматической системы и проявленной в ее пределах ассимиляции магмами вмещающих ангидритовых пород [26]. Однако предполагаемая в первом случае длительность нахождения сульфидов при высоких температурах никак не может влиять на изменение их изотопного состава, поскольку при этих температурах фракционирование практически отсутствует, а гетерогенность скорее отражает отсутствие достижения равновесия при кристаллизации сульфидов. Факт неоднородности сульфидов по $\delta^{34}S$ также не может являться доказательством корового источника серы, а не мантийного, как это объясняется в статье, поскольку природа тяжелой серы в мантии [56] пока не нашла адекватного объяснения. Радиогенные изотопы (Pb, Sr) в ангидритах свидетельствуют о том, что их соотношения сильно отличаются от таковых в рудоносных интрузивах [36], что не позволяет конкретный минерал и содержащие его породы рассматривать в качестве источника серы.

Существуют идеи обогащения расплава сульфидами за счет взаимодействия магм с вмещающими породами в более глубинных условиях, чем это наблюдается для Норильского района [57]. Но в пределах Сибирской платформы обнажены все возможные стратиграфические уровни локализации базит-ультрабазитовых массивов – от кембрия до туфолавовой толщи, особенно в ее южной части, но нигде не наблюдается образование сульфидов на контакте их с вмещающими породами. Важное значение при этом имеет степень обводненности вмещающих пород: в сухих условиях образуются высокотемпературные метаморфические породы спуррит-мервинитовой фации [58], а в случае их обводненности – метасоматиты различного состава, как это имеет место в пределах Талнахского рудного узла. Если бы локальное обогащение серой из ангидрита в результате любого процесса – ассимиляции, привноса флюидами – имело место, оно проявлялось бы в разных районах Восточной Сибири, где широко распространены эвапориты и базитовые интрузивы, фиксируя образование сульфидных руд. Тем не менее месторождения локализованы только в определенных тектонических зонах.

Другие источники серы. Предположение о поступлении серы не из ангидрита (или не только из ангидрита), а из сероводородных залежей или битумов палеозойских отложений Восточной Сибири были сделаны еще Л.И.Гриненко [49]. Даже не рассматривая механизм их поступления в расплав, можно констатировать, что этот механизм в целом не может являться ведущим в образовании руд, так как палеозойские месторождения углеводородов непосредственно в Норильском районе не известны, а главное – все нефти и битумы Восточной Сибири являются низкосернистыми (< 1 мас.%) и не могут поставить необходимое количество серы в магму, учитывая их объем.

• Масс-балансовые расчеты кальция. Наиболее значимым для понимания роли ассимиляции в образовании руд являются масс-балансовые расчеты кальция в этом процессе. Огромный объем серы, сконцентрированный в норильских месторождениях [23] в случае ее поступления из ангидрита, требует высвобождения практически такого же объема кальция, который должен входить в минералы либо окружающих пород, либо в габбро-долериты. Поскольку никакого обогащения Ca вмещающих пород не наблюдается, то ряд исследователей [26, 52] предполагает его концентрацию в виде лейкогаббро внутри рудоносных тел. Однако при этом среднезвешенный состав интрузивов с разными запасами руд не различается между собой (см. табл.2), как можно было бы ожидать в случае обогащения рудоносных массивов этим элементом. Поскольку такие подсчеты были сделаны на большом количестве скважин для Норильска 1 и Талнаха, то предполагаемое обогащение было бы выявлено и могло бы служить одним из поисковых критериев рудоносных интрузивов. Состав рудоносных массивов соответствует типичному габбро с концентрациями CaO = = 9-10 мас.%, а горизонты лейкогаббро наблюдаются и во многих нерудоносных плутонах мира.

Таким образом, приведенные данные свидетельствуют о том, что месторождения были сформированы в условиях закрытой системы; состав родоначальных расплавов не имел принципиальных отличий от составов расплавов, сформировавших безрудные массивы и вулканиты платформенного этапа Сибирской провинции, за исключением несколько повышенной магнезиальности

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2024. Т. 269. С. 738-756
© Н.А.Криволуцкая, 2024

и хромистости; процессы ассимиляции магмами вмещающих пород *in situ* были проявлены очень локально и не влияли на образование руд. Следовательно, сульфиды были привнесены в камеру кристаллизации родоначальной магмой. Рассмотрение состава руд помогает понять только эволюцию сульфидного расплава во внутрикамерных условиях (или на подходе к ним), но не решает проблему его происхождения. Остается вопрос о закономерностях появления сульфидов в магмах. Его решение возможно только при понимании развития магматизма в Восточной Сибири на границе перми и триаса и занимаемого в нем места рудообразования. Поэтому чрезвычайно важно рассмотреть особенности строения и состава изверженных пород Норильского рудного района по сравнению с другими территориями.

Новый подход к генезису месторождений. Исследование *P-T*-магматических пород в Восточной Сибири осуществляется в течение почти вековой истории [29, 58]. Сложность в построении общей схемы их эволюции как в пространстве, так и во времени – основы для создания адекватной модели формирования – обусловлена огромными размерами территории, на которой распространены эти образования, а также труднодоступностью многих площадей, изученных разными организациями. Это привело к появлению множества частных схем расчленения как эффузивных, так и интрузивных пород, отраженных в серийных легендах карт 1:200000 и 1:1000000 масштабов. Корреляция их между собой с помощью современных геохимических методов – одна из важнейших задач современной геологии.

Особая позиция Норильского района в структуре Сибирской магматической провинции была отмечена еще в публикациях 1950-х годов [3, 12]. Этот район был выделен как необычная петрографическая провинция [3], отличающаяся большим разнообразием магматических пород по сравнению с другими частями платформы. На основании полученного нами представительного набора аналитических данных (XRF + ICP + изотопы Sr, Nd и Pb) из ключевых районов Восточной Сибири (см. рис.1) было также продемонстрировано, что этот район представляет собой и особую геохимическую провинцию [27].

Анализ полученных аналитических данных позволил сопоставить магматические породы ключевых районов [27] и сделать ряд выводов. Главным из них является установление большого разнообразия пород в Арктической зоне Восточной Сибири, к которой можно отнести Таймыр, Норильский и Маймеча-Котуйский районы, по сравнению с Тунгусской синеклизой и ее обрамлением. На севере провинции распространены породы, как характеризующиеся типичными коровыми метками (отрицательная Ta-Nb, положительная Pb аномалии; высокое La/Sm и низкое Gd/Yb отношения, $^{87}Sr/^{86}Sr$ = 0,705-0,710, ε_{Nd} от –7 до +1), так и более редкие продукты мантийных магм без Ta-Nb и Pb аномалий с высоким Gd/Yb отношением ($^{87}Sr/^{86}Sr$ = 0,703, ε_{Nd} = 5), свидетельствующем о присутствии граната в источнике и больших глубинах магмогенерации. Такая ситуация объясняется сложным тектоническим строением северной части территории, определяемым заложением и развитием на ней Енисей-Хатангского прогиба и более мелких оперяющих его палеорифтовых зон (включая Норильско-Игаркинскую), в которых наряду с типичными траппами (мощными покровами толеитовых базальтов, покрывающими древнюю платформу) распространены и рифтогенные породы, приуроченные только к узким локальным грабенам и характеризующиеся большими вариациями строения и состава. Особенно типична эта ситуация для северо-запада территории, отличающегося крупными линейными магнитными и гравитационными аномалиями, где локализованы уникальные норильские месторождения (рис.7). В пределах этих рифтовых зон (как внутри них, так и на их крыльях) происходила активная длительная магматическая

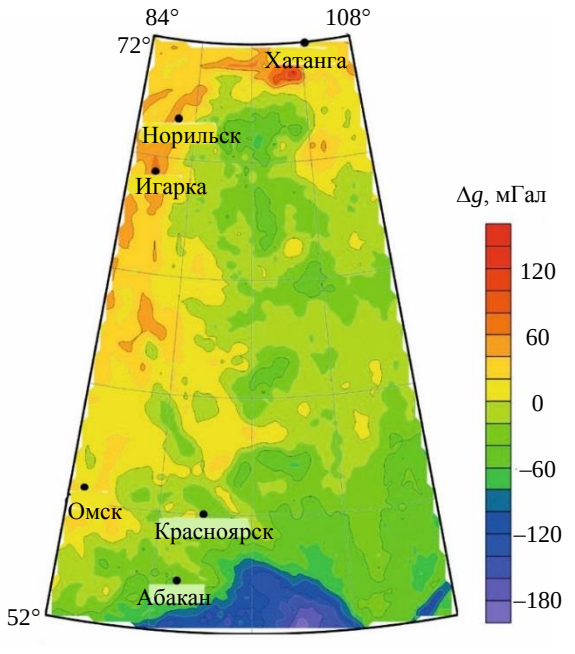


Рис.7. Карта изоаномал силы тяжести в редукции Буге Восточной Сибири [59]

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

деятельность, проявленная во внедрении магм различного состава и образованных на разных глубинах литосферы и земной коры. Поэтому мы полагаем, что специфика геологического развития этой территории способствовала накоплению сульфидов, приведших к формированию крупных месторождений.

Заключение. История формирования рудных месторождений в Восточной Сибири включает два этапа: образование сульфидсодержащих магм и их поступление в верхнюю кору; кристаллизацию этих магм и эволюцию сульфидного вещества в современных камерах. Как правило, при изучении норильских месторождений доминируют исследования, отражающие заключительный этап их образования. Они предполагают детальное изучение минералов с применением локальных методов [22, 43, 60], которые дают информацию о процессах кристаллизации силикатного и сульфидного расплавов и их последующих преобразований *in situ*. Эти результаты могут быть использованы для совершенствования технологии переработки руд [61, 62]. Однако на основании этих работ делаются выводы обо всем рудообразующем процессе. Условия зарождения и эволюции рудоносных магм рассматриваются значительно реже. Несомненно, что позиция уникальных месторождений в пределах Норильско-Игарской палеорифтовой зоны играет важнейшую роль в генезисе месторождений, поскольку близкие к рудоносным по геохимии магмы внедрялись и в других районах провинции, однако они не содержат промышленных скоплений сульфидов [30]. Дальнейшее развитие теории магматического рудообразования на севере Восточной Сибири должно базироваться на знании эволюции тектоники и магматизма в поздней перми – раннем триасе на Сибирской платформе, в особенности развития Енисей-Хатангского прогиба, играющего ключевую роль в магмо-и рудогенезе на севере провинции.

Автор выражает благодарность за постоянную помощь в работе д-ру геол.-минерал. наук Б.И.Гонгальскому (*ИГЕМ РАН*), *младшему научному сотруднику Н.М.Свирской* (*ГЕОХИ РАН*), *канд. геол.-минерал. наук А.А.Конышеву* (*Институт геологии КарНЦ*), *геологам В.Н.Михайлову, К.В.Шишаеву, Л.И.Трофимовой, И.Н.Тушенцовой* (*ООО* «*Норильскгеология*»). *Большую помощь в аналитических работах оказал академик, д-р геол.-минерал. наук А.В.Соболев.*

ЛИТЕРАТУРА

1. *Менделеев Д.И.* Изоморфизм в связи с другими отношениями кристаллической формы к составу. Диссертация, представленная при окончании курса в Главном педагогическом институте студентом Д.Менделеевым. СПб: Типография И.И.Глазунова и компании, 1856. 234 с.

2. *Менделеев Д.И.* Нефтяная промышленность в Северо-Американском штате Пенсильвании и на Кавказе. СПб: Типография товарищества «Общественная польза», 1877. 304 с.

3. *Годлевский М.Н.* Траппы и рудоносные интрузии Норильского района. М.: Госгеолтехиздат, 1959. 68 с.

4. *Нестеренко Г.В., Альмухамедов А.И.* Геохимия дифференцированных траппов (Сибирская платформа). М.: Наука, 1973. 298 с.

5. Proceedings of the Sudbury-Norilsk Symposium / Ed. by P.C.Lightfoot, A.J.Naldrett. Sudbury: Ontario Ministry of Northern Development and Mines, Ontario Geological Survey, 1994. Spec. vol. 5. 423 p.

6. *Hawkesworth C.J., Lightfoot P.C., Fedorenko V.A. et al.* Magma differentiation and mineralisation in the Siberian continental flood basalts // Lithos. 1995. Vol. 34. Iss. 1-3. P. 61-81.

7. *Keays R.R., Lightfoot P.C.* Crustal sulfur is required to form magmatic Ni-Cu sulfide deposits: evidence from chalcophile element signatures of Siberian and Deccan Trap basalts // Mineralium deposita. 2010. № 45. Iss. 3. P. 241-257. DOI: 10.1007/s00126-009-0271-1

8. *Malich K.N., Belousova E.A., Griffin W.L. et al.* New insights on the origin of ultramafic-mafic intrusions and associated PGE-Cu-Ni sulphide deposits of the Norilsk and Taimyr provinces, Russia: evidence from radiogenic and stable isotopes // Processes and ore deposits of ultramafic-mafic magmas through space and time. Amsterdam: Elsevier, 2018. P. 197-238.

9. *Petrov O.V.* Isotope Geology of the Norilsk Deposits. Berlin, Heidelberg: Springer, 2019. 306 p.

10. *Kostitsyn Y., Krivolutskaya N., Somsikova A.V. et al.* Geochemical Features of Potentially Ore-Bearing Mafic Intrusions at the Eastern Norilsk Region and Their Relationships with Lavas (NW Siberian Traps Province) // Minerals. Vol. 13. Iss. 2. № 213. DOI: 10.3390/min13020213

11. *Урванцев Н.Н.* Северо-Сибирская никеленосная провинция // Геология и геофизика. 1974. Т. 15. № 3. С. 3-11.

12. *Котульский В.К.* К вопросу о происхождении магматических медно-никелевых месторождений // Доклады АН СССР. 1946. Т. 51. № 5. С. 381-384.

13. Geology and Metallogeny of Sulfide Deposits Norilsk Region U.S.S.R. / Ed. by O.A.Dyuzhikov, V.V.Distler. Littleton: Society of Economic Geologists, Inc., 1992. Special Publication, № 1. 242 p.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

14. *Лихачев А.П.* Платино-медно-никелевые и платиновые месторождения. М.: Эслан, 2006. 495 с.

15. *Naldrett A.J.* Magmatic Sulfide Deposits. Geology, Geochemistry and Exploration. Berlin, Heidelberg: Springer, 2004. 728 p. DOI: 10.1007/978-3-662-08444-1

16. *Lightfoot P.C.* Nickel Sulfide Ores and Impact Melts. Origin of the Sudbury Igneous Complex. Elsevier, 2016. 680 p.

17. *Зотов И.А.* Трансмагматические флюиды в магматизме и рудообразовании. М.: Наука, 1989. 214 с.

18. *Золотухин В.В.* Базитовые пегматоиды норильских рудоносных интрузивов и проблема генезиса оруденения норильского типа. Новосибирск: Изд-во Сибирского отделения РАН, НИЦ ОИГГМ, 1997. Вып. 834. 90 с.

19. *Kullerud G., Yund R.A., Moh G.H.* Phase Relations in the Cu-Fe-S, Cu-Ni-S, and Fe-Ni-S systems // Magmatic Ore Deposits: A Symposium. Society of Economic Geologists. 1969. Vol. 4. P. 323-343. DOI: 10.5382/Mono.04.23

20. *Sinyakova E.F., Vasilyeva I.G., Oreshonkov A.S. et al.* Formation of Noble Metal Phases (Pt, Pd, Rh, Ru, Ir, Au, Ag) in the Process of Fractional Crystallization of the $CuFeS_2$ Melt // Minerals. 2022. Vol. 12. Iss. 9. № 1136. DOI: 10.3390/min12091136

21. *Brovchenko V.D., Sluzhenikin S.F., Kovalchuk E.V. et al.* Platinum Group Element Enrichment of Natural Quenched Sulfide Solid Solutions, the Norilsk 1 Deposit, Russia // Economic Geology. 2020. Vol. 115. № 6. P. 1343-1361. DOI: 10.5382/econgeo.4741

22. *Ryabov V.V., Shevko A.Ya., Gora M.P.* Trap Magmatism and Ore Formation in the Siberian Noril'sk Region. Dordrecht: Springer, 2014. Vol. 1. Trap Petrology. 390 p. DOI: 10.1007/978-94-007-5022-7

23. *Радько В.А.* Фации интрузивного и эффузивного магматизма Норильского района. СПб: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2016. 226 с.

24. *Naldrett A.J.* Fundamentals of Magmatic Sulfide Deposits // Magmatic Ni-Cu and PGE Deposits: Geology, Geochemistry, and Genesis. Society of Economic Geologists. 2011. Vol. 17. P. 1-50. DOI: 10.5382/Rev.17

25. *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. 2009. Vol. 104. № 2. P. 291-301. DOI: 10.2113/gsecongeo.104.2.291

26. *Кетров А.А., Юдовская М.А., Шелухина Ю.С. и др.* Источники и эволюция изотопного состава серы сульфидов Хараелахского и Пясино-Вологочанского интрузивов (Норильский рудный район) // Геология рудных месторождений. 2022. Т. 64. № 6. С. 657-686. DOI: 10.31857/S0016777022050057

27. *Krivolutskaya N.A., Latyshev A.V., Dolgal A.S. et al.* Unique PGE–Cu–Ni Noril'sk Deposits, Siberian Trap Province: Magmatic and Tectonic Factors in Their Origin // Minerals. 2019. Vol. 9. Iss. 1. № 66. DOI: 10.3390/min9010066

28. *Krivolutskaya N.A., Konyshev A.A., Kuzmin D.V. et al.* Is the Permian–Triassic Mass Extinction Related to the Siberian Traps? // Geochemistry International. 2022. Vol. 60. Iss. 13. P. 1321-1349. DOI: 10.1134/S0016702922130067

29. *Kamo S.L., Czamanske G.K., Amelin Y. et al.* Rapid eruption of Siberian flood-volcanic rocks and evidence for coincidence with the Permian–Triassic boundary and mass extinction at 251 Ma // Earth and Planetary Science Letters. 2003. Vol. 214. Iss. 1-2. P. 75-91. DOI: 10.1016/S0012-821X(03)00347-9

30. *Золотухин В.В., Виленский А.М., Дюжиков О.А.* Базальты Сибирской платформы. Особенности геологии, состава и генезиса пермотриасовых эффузивов. Новосибирск: Наука, Сибирское отделение, 1986. 245 с.

31. *Reichow M.K., Saunders A.D., White R.V. et al.* Geochemistry and petrogenesis of basalts from the West Siberian Basin: An extension of the Permo-Triassic Siberian Traps, Russia // Lithos. 2005. Vol. 79. Iss. 3-4. P. 425-452. DOI: 10.1016/j.lithos.2004.09.011

32. *Reichow M.K., Pringle M.S., Al'Mukhamedov A.I. et al.* The timing and extent of the eruption of the Siberian Traps large igneous province: Implications for the end-Permian environmental crisis // Earth and Planetary Science Letters. 2009. Vol. 277. Iss. 1-2. P. 9-20. DOI: 10.1016/j.epsl.2008.09.030

33. *Васильев Ю.Р., Прусская С.Н., Мазуров М.П.* Новый тип крупнообъемных проявлений внутриплитного интрузивного траппового магматизма (запад Сибирской платформы) // Доклады Академии наук. 2007. Т. 413. № 2. С. 213-217.

34. *Альмухамедов А.И., Медведев А.Я., Золотухин В.В.* Вещественная эволюция пермотриасовых базальтов Сибирской платформы во времени и пространстве // Петрология. 2004. Т. 12. № 4. С. 339-353.

35. *Sluzhenikin S.F., Yudovskaya M.A., Barnes S.J. et al.* Low-Sulfide Platinum Group Element Ores of the Norilsk-Talnakh Camp // Economic Geology. 2020. Vol. 115. № 6. P. 1267-1303. DOI: 10.5382/econgeo.4749

36. *Krivolutskaya N.A.* Siberian Traps and Pt-Cu-Ni Deposits in the Norilsk Area. Cham: Springer, 2015. 364 p. DOI: 10.1007/978-3-319-17205-7

37. *Криволуцкая Н.А., Арискин А.А., Служеникин С.Ф., Туровцев Д.М.* Геохимическая термометрия пород Талнахского интрузива: оценка состава расплава и степени раскристаллизованности исходной магмы // Петрология. 2001. Т. 9. № 5. С. 451-479.

38. *Дюжиков О.А., Шарков Е.В.* Гипербазит-базитовые вулканогенно-плутоногенные ассоциации Северо-Азиатского кратона и Балтийского щита / Геодинамика, магматизм, седиментогнез и минералгения Северо-Запада России: Материалы Всероссийской конференции, 12-15 ноября 2007, Петрозаводск, Россия. Петрозаводск: Институт геологии КарНЦ РАН, 2007. С. 126-129.

39. *Malitch K.N., Belousova E.A., Griffin W.L. et al.* Magmatic evolution of the ultramafic–mafic Kharaelakh intrusion (Siberian Craton, Russia): insights from trace-element, U–Pb and Hf-isotope data on zircon // Contributions to Mineralogy and Petrology. 2010. Vol. 159. Iss. 6. P. 753-768. DOI: 10.1007/s00410-009-0452-z

40. *Днепровская М.Б., Френкель М.Я., Ярошевский А.А.* Количественная модель формирования расслоенности Талнахского интрузива // Построение моделей рудообразующих систем. Новосибирск: Наука, Сибирское отделение, 1987. С. 96-106.

41. *Арискин А.А., Бармина Г.С.* Моделирование фазовых равновесий при кристаллизации базальтовых магм. М.: Наука, МАИК «Наука/Интерпериодика», 2000. 363 с.

42. *Chayka I.F., Kamenetsky V.S., Zhitova L.M. et al.* Hybrid Nature of the Platinum Group Element Chromite-Rich Rocks of the Norilsk 1 Intrusion: Genetic Constraints from Cr Spinel and Spinel-Hosted Multiphase Inclusions // Economic Geology. 2020. Vol. 115. № 6. P. 1321-1342. DOI: 10.5382/econgeo.4745

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

43. *Barnes S.J., Yudovskaya M.A., Iacono-Marziano G. et al.* Role of volatiles in intrusion emplacement and sulfide deposition in the supergiant Norilsk-Talnakh Ni-Cu-PGE ore deposits // Geology. 2023. Vol. 51. № 11. P. 1027-1032. DOI: 10.1130/G51359.1

44. *Туровцев Д.М.* Контактовый метаморфизм норильских интрузий. М.: Научный мир, 2002. 318 с.

45. *Покровский Б.Г., Служеникин С.Ф., Криволуцкая Н.А.* Условия взаимодействия норильских трапповых интрузий с вмещающими породами по изотопным (O, H, C) данным // Петрология. 2005. Т. 13. № 1. С. 58-60.

46. *Наумов В.Б., Дорофеева В.А., Гирнис А.В., Ярмолюк В.В.* Среднее содержание летучих компонентов, петрогенных и редких элементов в магматических расплавах главных геодинамических обстановок Земли. I. Расплавы основного состава // Геохимия. 2017. № 7. С. 618-643. DOI: 10.7868/S0016752517070081

47. *Hofmann A.W.* Chemical differentiation of the Earth: the relationship between mantle, continental crust, and oceanic crust // Earth and Planetary Science Letters. 1988. Vol. 90. Iss. 3. P. 297-314.

48. *Lightfoot P.C., Keays R.R.* Siderophile and Chalcophile Metal Variations in Flood Basalts from the Siberian Trap, Norilsk Region: Implications for the Origin of the Ni-Cu-PGE Sulfide Ores // Economic Geology. 1995. Vol. 100. № 3. P. 439-462. DOI: 10.2113/gsecongeo.100.3.439

49. *Grinenko L.I.* Sources of sulfur of the nickeliferous and barren gabbro-dolerite intrusions of the northwest Siberian platform // International Geology Revew. 1985. Vol. 27. Iss. 6. P. 695-708. DOI: 10.1080/00206818509466457

50. *Ripley E.M., Lightfoot P.C., Li C., Elswick E.* Sulfur isotopic studies of continental flood basalts in the Noril'sk region: implications for the association between lavas and ore-bearing intrusions // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2003. Vol. 67. Iss. 15. P. 2805-2817. DOI: 10.1016/S0016-7037(03)00102-9

51. *Золотухин В.В., Рябов В.В., Васильев Ю.Р., Шатков В.А.* Петрология Талнахской рудоносной дифференцированной трапповой интрузии. Новосибирск: Наука, Сибирское отделение, 1975. Вып. 186. 436 с.

52. *Рябов В.В., Симонов О.Н., Снисар С.Г., Боровиков А.А.* Источник серы сульфидных месторождений в траппах Сибирской платформы по изотопным данным // Геология и геофизика. 2018. Т. 59. № 8. С. 1176-1194. DOI: 10.15372/GiG20180804

53. *Li C., Ripley E.M., Naldrett A.J. et al.* Magmatic anhydrite-sulfide assemblages in the plumbing system of the Siberian Traps // Geology. 2009. Vol. 37. № 3. P. 259-262. DOI: 10.1130/G25355A.1

54. *Полянский О.П., Ревердатто В.В.* Роль флюида в тепломассопереносе при эволюции осадочных бассейнов с траповым магматизмом / Флюиды и геодинамика: Материалы Всероссийского симпозиума «Глубинные флюиды и геодинамика», 19-21 ноября 2003, Москва, Россия. М.: Наука, 2006. С. 219-243.

55. *Ревердатто В.В., Бабичев А.В., Коробейников С.Н., Полянский О.П.* Определение глубины становления магматического интрузива на основании данных о распределении изоград в окружающей метаморфической зональности (модельное приближение) // Доклады Академии наук. 2010. Т. 430. № 6. С. 802-805.

56. *Криволуцкая Н.А.* Мантийная природа изотопно-тяжелой серы в рудах Норильских месторождений // Доклады Академии наук. 2014. Т. 454. № 3. С. 319-321. DOI: 10.7868/S0869565214030207

57. *Zhuo-sen Yao, Mungall J.E.* Linking the Siberian Flood Basalts and Giant Ni-Cu-PGE Sulfide Deposits at Norilsk // Journal of Geophysical Research: Solid Eart. 2021. Vol. 126. Iss. 3. № e2020JB020823. DOI: 10.1029/2020JB020823

58. *Соболев В.* Петрология траппов Сибирской платформы / Труды Арктического института. Л.: Изд-во главного управления Северного морского пути, 1936. Т. 43. 224 с.

59. *Долгаль А.С., Костицын В.И., Новикова П.Н. и др.* Аппроксимация аномалий силы тяжести при региональных исследованиях с учетом шарообразной формы Земли // Геофизика. 2021. № 5. С. 35-43.

60. *Gritsenko Y.D., Kondrikova A.P., Gilbricht S. et al.* Quantitative assessment of the relative roles of sulfide liquid collection, magmatic degassing and fluid-mediated concentration of PGE in low-sulfide ores of the Norilsk intrusions // Ore Geology Reviews. 2022. Vol. 148. № 105042. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2022.105042

61. *Александрова Т.Н., О'Коннор С.* Переработка платинометалльных руд в России и Южной Африке: состояние и перспективы // Записки Горного института. 2020. Т. 244. С. 462-473. DOI: 10.31897/PMI.2020.4.9

62. *Александрова Т.Н., Афанасова А.В., Кузнецов В.В., Абурова В.А.* Выбор параметров флотации сульфидных медно-никелевых руд на основе анализа распределения компонентов по флотируемости // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. № 1. С. 131-147. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_1_0_131

***Автор* Н.А.Криволуцкая,** *д-р геол.-минерал. наук, ведущий научный сотрудник, nakriv@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-5709-7785* (*Институт геохимии и аналитической химии им. В.И.Вернадского РАН, Москва, Россия*).

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0