

УДК 550.84

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2024-63-6-114-119

НАРУШЕНИЕ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ СВЯЗЕЙ Cr, Ni, Co, Ba, Sr, Zr, Zn, V И Sc В ОСАДОЧНЫХ ПОРОДАХ ОРДОВИКА, ВМЕЩАЮЩИХ КИМБЕРЛИТЫ МАЙСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ АЛМАЗОВ ЯКУТИИ

Петр Алексеевич Игнатов¹✉, Руслан Умарович Еременко², Николай Николаевич Акинфиев³, Александр Васильевич Толстов⁴, Илья Максимович Овчинников⁵, Павел Николаевич Илларионов⁶, Виктор Иванович Старостин⁷

¹ Российский государственный геологоразведочный университет (МГРИ), Москва, Россия; petrignatov@gmail.com ✉, <https://orcid.org/0000-0002-7956-580X>

² Российский государственный геологоразведочный университет (МГРИ), Москва, Россия; eremenko-ruslan@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0009-1997-8723>

³ Российский государственный геологоразведочный университет (МГРИ), Москва, Россия; nakinfiev@gmail.com

⁴ Институт геологии алмазов и благородных металлов СО РАН, Якутск, Россия; tols61@mail.ru

⁵ АК «АЛРОСА» (ПАО), Мирный, Республика Саха (Якутия), Россия; ovchinnikovilm@alrosa.ru

⁶ АК «АЛРОСА» (ПАО), Мирный, Республика Саха (Якутия), Россия; IllarionovPN@alrosa.ru

⁷ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; star@geol.msu.ru

Аннотация. Рассчитаны средние содержания и парные коэффициенты корреляции элементов для геохимического фона осадочных пород в центральной части Накынского кимберлитового поля, вмещающего Майское и другие месторождения алмазов, и на участке месторождения вблизи кимберлитов. Для анализа были выбраны элементы кимберлитов, карбонатитов и базитов: Cr, Ni, Co, Ba, Sr, Zr, Zn, V и Sc. Для фоновых содержаний установлены высокие положительные коэффициенты корреляции между указанными элементами. При этом в околокимберлитовом пространстве, при сохранении средних фоновых содержаний, установлены существенные снижения корреляции вплоть до ее отсутствия между элементами разных групп. Выявлены различия средних содержаний элементов в секторах сжатия и растяжения. Предложен механизм перераспределения элементов в высокотемпературных (100–600 °C) флюидах, сопровождающих взрывное формирование кимберлитов. Установленное нарушение корреляционных связей фоновых содержаний элементов во вмещающих кимберлиты осадочных породах может стать новым поисковым признаком скрытых алмазных месторождений.

Ключевые слова: геохимия, кимберлиты, корреляция, месторождения алмазов, фреатомагматизм, Западная Якутия

Для цитирования: Игнатов П.А., Еременко Р.У., Акинфиев Н.Н., Толстов А.В., Овчинников И.М., Илларионов П.Н., Старостин В.И. Нарушение корреляционных связей Cr, Ni, Co, Ba, Sr, Zr, Zn, V и Sc в осадочных породах ордовика, вмещающих кимберлиты Майского месторождения алмазов Якутии // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2024. № 6. С. 114–119.

DISRUPTION OF CORRELATION RELATIONSHIPS Cr, Ni, Co, Ba, Sr, Zr, Zn, V AND Sc IN ORDOVICIAN SEDIMENTARY ROCKS HOSTING KIMBERLITES OF THE MAISKOYE DIAMOND DEPOSIT OF YAKUTIA

Petr A. Ignatov¹✉, Ruslan U. Eremenko², Nikolay N. Akinfiev³, Aleksander V. Tolstov⁴, Ilya M. Ovchinnikov⁵, Pavel N. Illarionov⁶, Viktor I. Starostin⁷

¹ Russian State Geological Exploration University (MGRI), Moscow, Russia; petrignatov@gmail.com ✉

² Russian State Geological Exploration University (MGRI), Moscow, Russia; eremenko-ruslan@mail.ru

³ Russian State Geological Exploration University (MGRI), Moscow, Russia; nakinfiev@gmail.com

⁴ IGABM SB RAS, Yakutsk, Russia; tols61@mail.ru

⁵ АК «ALROSA» (PJSC), Mirny, Republic of Sakha (Yakutia), Russia; ovchinnikovilm@alrosa.ru

⁶ АК «ALROSA» (PJSC), Mirny, Republic of Sakha (Yakutia), Russia; IllarionovPN@alrosa.ru

⁷ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; star@geol.msu.ru

Abstract. The average contents and paired correlation coefficients of elements for the geochemical background of sedimentary rocks in the central part of the Nakyn kimberlite field, which contains the Maiskoye and other diamond deposits, and in the area of the deposit near the kimberlites are calculated. Elements of kimberlites, carbonatites and basites were selected for analysis: Cr, Ni, Co, Ba, Sr, Zr, Zn, V and Sc. High positive correlation coefficients between the specified elements have been established for background contents. At the same time, in the near-kimberlite space, while maintaining the average background contents, significant decreases in correlation were found up to its absence between elements of different groups. Differences in the average contents of elements in the compression and

stretching sectors are revealed. A mechanism for the redistribution of elements in high-temperature (100–600 °C) fluids accompanying the explosive formation of kimberlites is proposed. The established violation of correlations of background element contents in the sedimentary rocks containing kimberlites may become a new search feature of hidden diamond deposits.

Keywords: geochemistry, kimberlites, correlation, diamond deposits, phreatomagmatism, Western Yakutia

For citation: Ignatov P.A., Eremenko R.U., Akinfiev N.N., Tolstov A.V., Ovchinnikov I.M., Illarionov P.N., Starostin V.I. Disruption of correlation relationships Cr, Ni, Co, Ba, Sr, Zr, Zn, V and Sc in ordovician sedimentary rocks hosting kimberlites of the maiskoye diamond deposit of Yakutia. *Moscow University Geol. Bull.* 2024; 6: 114–119. (In Russ.).

Введение. Геохимические методы поисков коренных месторождений алмазов применяются с 1980-х годов [Ягнышев, 1985]. Сегодня в условиях поисков на закрытых территориях с применением бурения геохимические работы основаны на опробовании керна. Они нацелены на обнаружение концентрационных аномалий Cr, Ni и других индикаторных элементов минералов кимберлитов, что дополняет шлихо-минералогические работы. Помимо этого, также по концентрационным аномалиям ряда редких элементов возможно выделение гидротермальной минерализации, указывающей на благоприятные для кимберлитов структурные обстановки [Кириллина и др., 2016; Симоненко и др., 2008; Vasilenko, et al., 2010]. Подобного рода анализ обычно проводится без изучения фоновое распределения элементов. В настоящей работе приведены результаты такого исследования на примере геохимических данных по породам олдондинской свиты ордовика, вмещающей кимберлиты Майского месторождения алмазов Накынского поля Средне-Мархинского района Якутии.

Фактический материал и методы исследования. Майское месторождение алмазов расположено в Накынском поле Средне-Мархинского района южной части Западно-Якутской алмазоносной провинции [Толстов и др., 2009]. Вместе с ним в центральной части поля имеются Нюрбинское и Ботуобинское месторождения трубчатого типа, которые находятся в отработке. В отличие от них, Майские кимберлиты слагают дайкообразное тело. Все кимберлиты прорывают терригенно-карбонатные осадочные породы нижнего палеозоя, включая олдондинскую свиту ордовика, и перекрыты юрскими тонкообломочными сероцветными отложениями и незначительным чехлом четвертичных образований. Олдондинская свита сложена частым переслаиванием глинистых доломитов и известняков, содержащих онколиты и строматолиты мелководно-морского генезиса. Пласты залегают преимущественно горизонтально, но нарушены многочисленными крутопадающими малоамплитудными разломами. Породы интродуцированы силлами и крутопадающими дайками среднепалеозойских траппов и вмещают взрывные образования в виде кимберлитов, брекчий базитов и карбонатного состава.

Центральная часть Накынского поля до глубин 100–120 м хорошо изучена бурением с полным выходом керна, на ряде локальных участков сеть бурения составляет 100 × 100 м. На месторождениях

пройжены многочисленные наклонные разведочные скважины по сети 20 × 40 м. В Накынском поле, в том числе и на Майском месторождении изучен керн большинства поисковых и разведочных скважин по оригинальной методике, когда фиксируются признаки тектонических условий сжатия и растяжения, флюидоразрывов и гидротермальная минерализация [Игнатов, Новиков, 2019]. Это позволило закартировать рудовмещающий сдвиг, расположенный в узле пересечения других разломов также сдвигового типа. Обоснована цветочная тектоно-динамическая модель месторождения с симметричными секторами сжатия и растяжения, которым подчиняются раздувы и пережим кимберлитовой дайки (рис. 1).

Для геохимических исследований использованы результаты рядового опробования керна, проведенного геологами Вилуйской ГРЭ АК АЛРОСА (ПАО). Пробы отбирались из пород олдондинской свиты с интервалом порядка 5 м. Содержания элементов корректно определены методами рентгено-флюоресцентного анализа (РФА), который используется в практике работ Вилуйской ГРЭ [Кириллина и др., 2016; Симоненко и др., 2008; Толстов и др., 2009]. Анализы выполнены в Центральной аналитической лаборатории ВГРЭ с использованием рентгенофлуоресцентного спектрометра S8 TIGER «BRUKER» (Германия).

Результаты исследований. Для анализа выбраны следующие элементы: Cr, Ni, Co, V, Sc, Zn, Ba, Sr и Zr. Из них Cr, Ni и Co являются типоморфными элементами кимберлитов [Костровицкий и др., 2015, 2023; Lapin, et al., 2007a, 2007b; Vasilenko, et al., 2010 и др.], V, Sc и Zn типичны для базитов, а Ba, Sr и Zr характерны для карбонатитов, сопровождающих кимберлитовый магматизм [Фролов и др., 2005, Лапин и др., 2016]. Их средние высокие концентрации отмечены и в кимберлитах Якутии [Костровицкий и др., 2015], которые считают кимберлит-карбонатитами [Маршинцев, 1995]. Помимо этого, V и Ni могут дополнительно указывать на разгрузку углеводородов нефтяного ряда [Якуцени, 2005] в местах кимберлитовых тел. Для расчета средних содержаний элементов по центральной части Накынского поля использован 71 анализ из проб, взятых из серии скважин, вскрывших ордовикские породы. Среднее взято как среднеарифметическое. Также были рассчитаны средние значения для околотрубчатого пространства по 74 пробам, отобранным из разведочных скважин. При этом из выборок предварительно удалялись редкие ураганные содер-

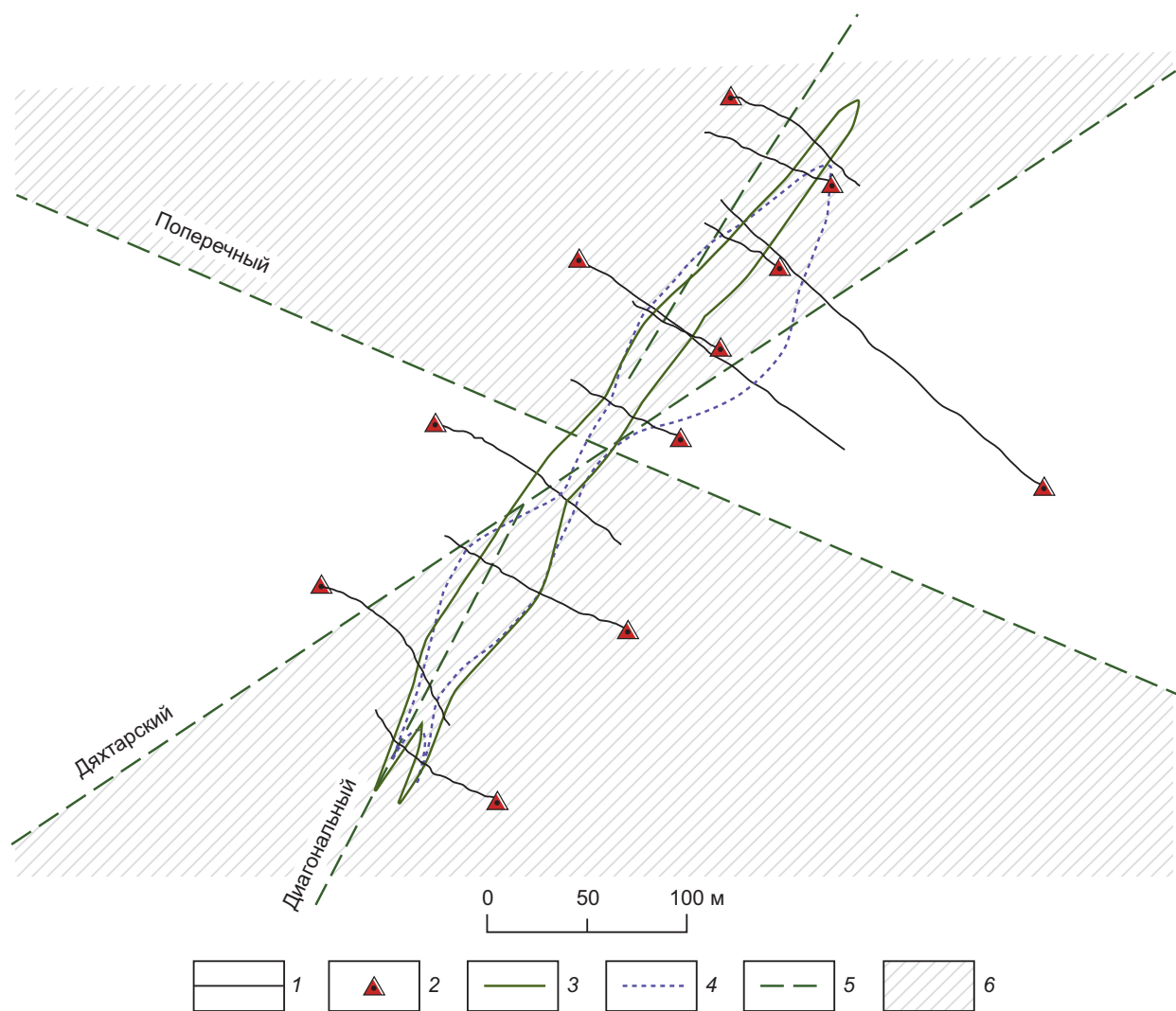


Рис. 1. Структурная модель локализации кимберлитов участка Майского месторождения алмазов при крутом падении разломов. 1 — горизонтальное проложение стволов скважин; 2 — устья скважин; сечения кимберлита на глубинах: 3 — 80 м и 4 — 280 м; 5 — проекции основных швов Дяхтарского, Поперечного и Диагонального разломов; 6 — сектора растяжения

жания, отличавшиеся от медианных значений на порядок и больше. Такие пробы, очевидно, содержали прожилковую или вкрапленную сульфидную или сульфатную минерализацию, например сфалерита или барита. Полученные средние значения фона в околоскверитовом пространстве и в осадочных породах ордовика практически совпадают и в целом соответствуют их кларкам (табл. 1).

Интересными оказались результаты расчета парных коэффициентов корреляции отмеченных элементов в породах олдондинской свиты в геохимическом фоне и вблизи кимберлитов (табл. 2, рис. 2). Для этого использованы выборки по 115 анализам по фону и 61 анализу из пород, вмещающих кимберлиты.

Во-первых, необходимо подчеркнуть высокую положительную связь отмеченных пар для геохимического фона осадочных терригенно-карбонатных пород: коэффициенты корреляции колеблются от 0,71 до 0,88. Во-вторых, для всех пар элементов имеет место снижение корреляции при переходе от фона к околоскверитов. Особенно это очевидно

Таблица 1
Средние содержания элементов (в г/т) в олдондинской свите ордовика фона в центральной части Накынского поля и в околоскверитовом пространстве Майского месторождения алмазов

Элемент	Cr	V	Co	Ni	Sr	Ba	Zn	Zr
Расположение								
Фон (71 анализ)	47,7	50,1	5,3	26,4	114,9	149,6	40,3	53,3
Вблизи кимберлита (74 анализа)	49,9	44,6	5,6	31,9	185,7	152,4	40,8	68,7
Кларки для карбонатных пород	11	19	1	20	370	50	20	20
Кларки для глин	90	150	19	70	260	550	95	200

Примечание. Средние содержания химических элементов в главных типах горных пород, почвах и земной коре. Кларки указаны на основании таблицы, составленной в отделе «Геоэкологии и геохимического картирования» ИМГРЭ [Средние..., 2010]

Таблица 2

Коэффициенты корреляции элементов в породах олодондинской свиты геохимического фона центральной части Накынского поля и вблизи кимберлитов Майского месторождения алмазов

Элемент \ Расположение	Cr–Co	Cr–Ni	Cr–Zn	V–Cr	V–Zn	V–Co	Ni–Zn	Ni–Co	Co–Zr	Ba–Zn
Фон	0,75	0,81	0,74	0,88	0,76	0,77	0,78	0,72	0,73	0,71
Вблизи кимберлита	0,57	0,65	0,06	0,69	0,04	0,59	0,23	0,68	0,47	0,09

Таблица 3

Коэффициенты корреляции элементов в породах олодондинской свиты в зонах сжатия и растяжения Майского месторождения алмазов

Элемент \ Режим	Cr–Co	Cr–Ni	Cr–Zn	V–Cr	V–Zn	V–Co	Ni–Zn	Ni–Co	Co–Zr	Ba–Zn
Растяжение	0,73	0,81	0,70	0,76	0,64	0,82	0,76	0,86	–0,03	–0,05
Сжатие	0,65	0,74	0,08	0,81	0,06	0,69	0,20	0,67	0,19	0,02

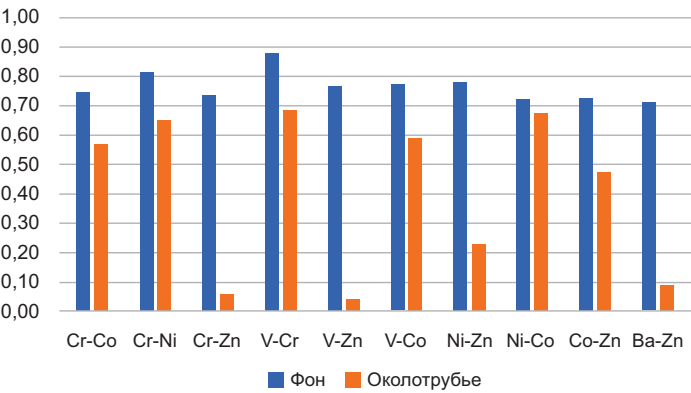


Рис. 2. Диаграммы соотношения коэффициентов корреляции элементов в породах олодондинской свиты геохимического фона центральной части Накынского поля и вблизи кимберлитов Майского месторождения алмазов

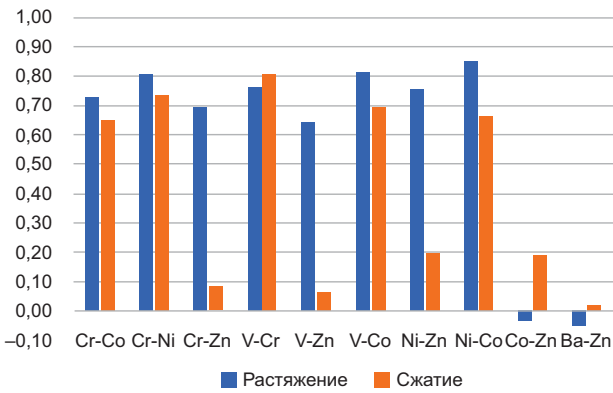


Рис. 3. Коэффициенты корреляции элементов в породах олодондинской свиты в секторах растяжения и сжатия вблизи кимберлитов Майского месторождения

для корреляций Zn с Cr, V и Ni. Также значительное снижение связи получилось между кобальтом и цирконием. В-третьих, надо отметить небольшие нарушения положительных связей между однотипными элементами-индикаторами кимберлитов (Cr, Co и Ni) и базитофильным V. На участке Майского месторождения установленные локальные сектора растяжения и сжатия, вероятно, существовали во время внедрения кимберлитов [Игнатов и др., 2015]. В этой связи стало возможным дифференцировать окол kimберлитовое пространство по этим секторам. Для этого рассчитаны коэффициенты корреляции отмеченных элементов в секторах растяжения по 51 и сжатия по 92 пробам. (табл. 3, рис. 3).

В секторах растяжения установлены высокие положительные связи Cr-Co, Cr-Ni, Cr-Zn, V-Cr, V-Zn, V-Co, Ni-Zn и Ni-Co и практическое отсутствие таковых для Co-Zr и Ba-Zn. В секторах сжатия по большинству пар снижается корреляция, за исключением V-Cr, для которой она растет. При этом для Cr-Zn, V-Zn и Ni-Zn связи снижаются весьма существенно. Сравнивая данные по фону и вблизи кимберлитов с цифрами по тектоническим усло-

виям, надо отметить сходство фоновых значений с секторами растяжения.

Обсуждение результатов. Сохранение средних субкларковых содержаний во вмещающих кимберлиты осадочных породах ордовика представляется естественным и отражает фоновые геологические процессы.

Высокая положительная корреляция для рассмотренных пар элементов в неизмененных осадочных породах ордовика в геохимическом фоне согласуется с выравниванием геохимических связей в процессах распределения элементов в литогенезе: формирования сначала кор выветривания, затем седиментации, диагенеза и катагенеза [Летникова, 2005 и др.]. Нарушение корреляции элементов для таких же пород из ближнего к кимберлитам пространства при сохранении средних фоновых содержаний является парадоксальным. Также как и похожий тренд для зон локального сжатия в рудовмещающих структурах на участке кимберлитов.

Для объяснения обнаруженного феномена следует привлечь фреатомагматическую модель образования кимберлитов [Игнатов и др., 2018; Por-

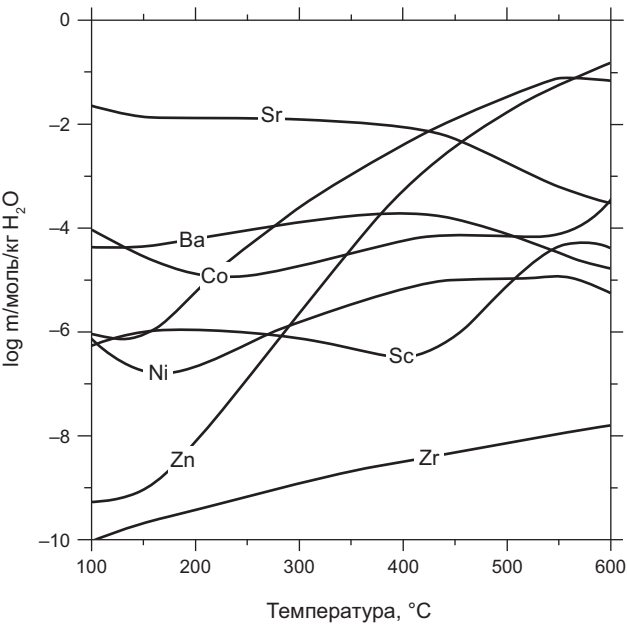


Рис. 4. Предельные концентрации элементов в водно-хлоридном флюиде в диапазоне температур 600–100 °С и модельном давлении 2 кбар по результатам расчета взаимодействия модельного флюида с ассоциацией минералов

ritt, 2013]. Согласно данной модели формирование кимберлитов сопровождалось взрывами, которые получались за счет взаимодействия захороненных кембрийских рассолов с быстро поднимающейся градусной флюидизированной ультраосновной магмой. Состав древних формационных вод был сульфатно-хлоридный, поскольку такие рассолы регионально распространены в Западной Якутии [Дзюба, 1984; Дроздов и др., 2008].

В этих условиях в моменты взрывов горячий восстановительный водно-хлоридный флюид мог растворять металлы и их перераспределять на небольшое расстояние, поскольку он быстро остывал и окислялся. При этом следует учитывать, что подвижность компонентов флюида разных свойств металлов была различной. Условия тектонического стресса и сжатия были благоприятны задержке флюида и служили своего рода экраном. В условиях локального растяжения проницаемость была высокой и геохимической дифференциации не было при диссипации флюида.

Для проверки изложенной гипотезы выполнены термодинамические расчеты взаимодействия модельного флюида с ассоциацией минералов (табл. 4).

Моделирование проводилось с помощью программного комплекса NCh [Shvarov, Bastrakov, 1999; Shvarov 2008]. Результаты расчета представлены на рис. 4 и соответствуют предельным концентрациям элементов во флюиде в диапазоне температур 600–100 °С и некотором модельном давлении 2 кбар. Состав флюида при каждой температуре подбирался так, чтобы обеспечить его примерную нейтральность при достижении равновесия.

Выводы. На основе сотен рентген-флуоресцентных анализов результатов рядового опробова-

Таблица 4

Принятый модельный минеральный состав породы и взаимодействующего с ней водного флюида

Минерал/компонент	Количество	Единицы	Минерал/компонент	Количество	Единицы
гематит Fe ₂ O ₃		pmc	сфалерит ZnS	1,00	mol
магнетит Fe ₃ O ₄		pmc	кварц SiO ₂	5,00	mol
миллерит NiS	1,00	mol	Sc ₂ O ₃	1,00	mol
катьерит CoS ₂	1,00	mol	H ₂ O	1,00	kg
пирит FeS ₂	3,00	mol	NaCl	1,00	mol
циркон ZrSiO ₄	1,00	mol	H ₂ S	0,05	mol
барит BaSO ₄	1,00	mol	HCl	var	mol
целестин SrSO ₄	1,00	mol	NaOH	var	mol

Примечание: гематит и магнетит приняты как вполне подвижные компоненты (pmc), обеспечивающие окислительно-восстановительный потенциал системы. Концентрации HCl и NaOH варьировались в некоторых пределах (var), обеспечивающих pH флюида, близкий к нейтральному.

ния ордовикских терригенно-карбонатных пород олдондинской свиты, вмещающей алмазоносные тела кимберлитов Накынского поля, установлены высокие положительные коэффициенты корреляции ряда элементов, характерных для кимберлитов, карбонатитов и базитов Cr, Ni, Co, Ba, Sr, Zr, V, Zn, что следует считать отражением процессов выравнивания субкларковых содержаний микроэлементов в процессах литогенеза.

Выявлено значимое снижение корреляционных связей для пар ряда элементов в породах рассматриваемой свиты вблизи кимберлитов Майского месторождения алмазов. При этом средние содержания элементов фона и вблизи кимберлитов не изменяются.

Такая же закономерность отмечена для проб, отобранных из локальных зон сжатия околокимберлитового пространства. Особенно явные нарушения отмечены для соотношений цинка с хромом, кобальтом и барием. В зонах растяжения корреляционные связи не нарушены.

Предположено, что снижение корреляционных связей между разными элементами вблизи кимберлитов обусловлено явлениями переотложения элементов в водно-хлоридных флюидах, которые формировались в результате фреатомагматического взрывного контакта кимберлитового расплава и формационных сульфатно-хлоридных рассолов.

Приведены результаты модельных термодинамических расчетов различного поведения отмеченных элементов в хлоридных флюидах при температурах 600–1007 °С и давлении 2 кбар, что подтверждает сделанные предположения.

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного фонда (Проект № 23-27-00280).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Дзюба А.А. Разгрузка рассолов Сибирской платформы. Новосибирск: Наука, 1984. 156 с.
- Дроздов А.В., Иост Н.А., Лобанов В.В. Криолитогеология алмазных месторождений Западной Якутии. Иркутск: Изд-во ИГГУ, 2008. 507 с.
- Игнатов П.А., Новиков К.В. Полевая диагностика тектонических нарушений и флюидоразрывных образований в кимберлитомещающих отложениях нижнего палеозоя: Методическое руководство. Мирный, 2019. 76 с.
- Игнатов П.А., Новиков К.В., Заринов Н.Р. и др. Эруптивные флюидоразрывные образования Накынского алмазоносного поля Якутии // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2018. № 6. С. 37–44.
- Игнатов П.А., Шмонов А.М., Новиков К.В. и др. Сравнительный анализ рудомещающих структур Майского, Мархинского и Озерного кимберлитовых тел Накынского поля Якутии // Геология рудных месторождений. 2015. Т. 57, № 2. С. 125–131.
- Кириллина А.В., Васильева В.И., Симоненко В.И. Геохимические методы поисков кимберлитов на закрытых территориях западной Якутии // Роль геохимии в развитии мсбтп: прогноз, поиски, оценка инновационные технологии освоения редкометалльных объектов. М.: ИМГРЭ, 2016. С. 44–47.
- Костровицкий С.И., Спеццис З.В., Яковлев Д.А. и др. Атлас коренных месторождений алмаза Якутской кимберлитовой провинции. Мирный: Типография ООО «МГП», 2015. 480 с.
- Костровицкий С.И., Яковлев Д.А. Происхождение кимберлитов Якутской провинции. Иркутск: Институт геохимии СО РАН им. А.П. Виноградова, Институт земной коры СО РАН. 2023. 478 с.
- Латин А.В., Толстов А.В., Куликова И.М. Особенности распределения лантаноидов, иттрия, скандия и тория в уникальных рудах месторождения Томтор // Геохимия. 2016. № 12. С. 1104–1121.
- Летникова Е.Ф. Геохимическая специфика карбонатных отложений различных геодинамических обстановок северо-восточного сегмента палеоазиатского океана // Литосфера. 2005. № 1. С. 70–81.
- Маршинцев В.К. Кимберлитовые породы Якутии. Якутск: Изд. ЯГУ, 1995. 34 с.
- Симоненко В.И., Толстов А.В., Васильева В.И. Новый подход к геохимическим поискам кимберлитов на закрытых территориях // Разведка и охрана недр. 2008. № 4–5. С. 108–112.
- Средние содержания химических элементов в главных типах горных пород, почвах и земной коре. Таблица составлена в отделе «Геоэкология и геохимическое картирование» ИМГРЭ». <https://www.geokniga.org/geowiki/средние-содержания-химических-элементов> (дата обращения: 03.02.2022).
- Толстов А.В., Минин В.А., Василенко В.Б. и др. Новое тело высокоалмазоносных кимберлитов в Накыньском поле Якутской кимберлитовой провинции // Геология и геофизика. 2009. Т. 50, № 3. С. 227–240.
- Фролов А.А., Латин А.В., Толстов А.В. и др. Карбонатиты и кимберлиты (взаимоотношения, минералогия, прогноз). М.: НИИ- Природа, 2005. 540 с.
- Ягнышев Б.С. Вторичное минералообразование пород нижнего палеозоя как основа минералого-геохимического картирования при поисках кимберлитов. // Типоморфизм и геохимические особенности минералов эндогенных образований Якутии. Якутск: Изд. ЯФ АН СССР, 1985. С. 110–116.
- Якуцени С.П. Распространенность углеводородного сырья, обогащенного тяжелыми элементами-примесями. Оценка экологических рисков. СПб.: Недра, 2005. 372 с.
- Lapin A. V., Tolstov A. V., Antonov A. V. Sr and Nd isotopic compositions of kimberlites and associated rocks of the Siberian craton // Doklady Earth Sciences. 2007a. Т. 414. № 1. С. 557–560.
- Lapin A. V., Tolstov A. V., Vasilenko V. B. Petrogeochemical characteristics of the kimberlites from the Middle Markha region with application to the problem of the geochemical heterogeneity of kimberlites // Geochemistry International. 2007b. Т. 45, № 12. С. 1197–1209.
- Porritt L. A. A Phreatomagmatic Kimberlite: The A418 Kimberlite Pipe, Northwest Territories, Canada / L. A. Porritt, J. K. Russell, H. McLean, G. Fomradas, D. Eichenberg Proceedings of 10th International Kimberlite Conference. Springer. New Delhi, 2013. P. 97–108.
- Shvarov Yu. V. HCh: New potentialities for the thermodynamic simulation of geochemical systems offered by Windows // Geochemistry Int. 2008. Vol. 46 (8). P. 834–839.
- Shvarov Yu. V., Bastrakov E. N. HCh: a Software Package for Geochemical Equilibrium Modelling. User's Guide. Canberra: Australian Geol. Survey Organization. Record 1999.
- Vasilenko V. B., Kuznetsova L. G., Minin V. A., Tolstov A. V. Petrochemical evaluation of the Diamond potential of Yakutian kimberlite field // Geochemistry International. 2010. Vol. 48. № 4. P. 346–354.

Статья поступила в редакцию 17.10.2024,
одобрена после рецензирования 30.10.2024,
принята к публикации 25.01.2025