

Оригинальная статья

Поведение V, Sc, Cr и Ni в кембрийских терригенно-карбонатных отложениях Сюльдюкарского кимберлитового поля (Западная Якутия)

П. А. Игнатов^{✉,1}, Р. У. Еременко¹, А. В. Толстов^{2,4},
П. Н. Илларионов³, И. М. Овчинников³

¹Российский государственный геологоразведочный университет
им. Серго Орджоникидзе, г. Москва, Российская Федерация

²Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация

³Акционерная компания «АЛРОСА» (ПАО), г. Мирный, Российская Федерация

⁴Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация

✉ petrignatov@gmail.com

Аннотация

В Сюльдюкарском кимберлитовом поле (Якутская алмазоносная провинция) на основании анализов (порядка 4000 РФА и 150 ICP AES) во вмещающих осадочных породах холмоложской свиты верхнего кембрия вблизи кимберлитовых тел выявлено нарушение корреляционных соотношений относительно фоновых концентраций при сохранении субкларковых содержаний V, Sc, Cr, Ni и других элементов. Для анализа выбраны элементы трех групп: типоморфные для кимберлитов (Cr, Ni, Co), карбонатитов (Ba, Sr, Nd, Zr) и базитов (V, Sc, Zn). Для фоновых содержаний установлены высокие положительные коэффициенты корреляции между указанными элементами. По ICP-анализам установлены существенные снижения корреляции между элементами разных групп в околокимберлитовом пространстве на участке сюльдюкарских кимберлитов. В секторах сжатия по РФА-анализам определены нарушения корреляционных связей ряда элементов относительно секторов растяжения. Установлено, что по РФА и ICP средние содержания элементов фонового и околотрубного пространства при исключении редких ураганных значений практически идентичны, а их различия лишь отражают флуктуацию. Положительная корреляция ряда элементов, очевидно, отражает фоновые геологические процессы – седиментацию в морском бассейне и последующие преобразования: гипер-, диа- и катагенез. Значительное снижение коэффициентов корреляции при сохранении фоновых содержаний, вероятно, связано с флюидным перераспределением элементов в связи с фреатомагматическими взрывами, сопровождавшими внедрение кимберлитов. Водно-хлоридные флюиды наиболее интенсивно перераспределяли элементы в экранирующих зонах локального тектонического сжатия. Выявленное нарушение корреляционных связей фоновых концентраций элементов во вмещающих кимберлиты осадочных породах может стать новым поисковым признаком при поисках скрытых алмазоносных кимберлитов.

Ключевые слова: Сюльдюкарское кимберлитовое поле, терригенно-карбонатные отложения, ванадий, скандий, хром, никель, соотношения, коэффициенты корреляции

Финансирование. Работа выполнена за счет гранта РНФ (№ 23-27-00280). Изучение кимберлитов выполнено в рамках государственного задания ИГАБМ СО РАН.

Для цитирования: Игнатов П.А., Еременко Р.У., Толстов А.В., Илларионов П.Н., Овчинников И.М. Поведение V, Sc, Cr и Ni в кембрийских терригенно-карбонатных отложениях Сюльдюкарского кимберлитового поля (Западная Якутия). *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2024;29(3):362–371. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-3-362-371>

The characteristics of V, Sc, Cr and Ni within the Cambrian terrigenous-carbonate deposits found in the Syuldyukar kimberlite field (Western Yakutia)

**Petr A. Ignatov^{✉1}, Ruslan U. Eremenko¹, Aleksandr V. Tolstov²,
Petr N. Illarionov³, Ilya M. Ovchinnikov³**

¹*Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting, Moscow, Russian Federation*

²*Diamond and Precious Metal Geology Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Yakutsk, Russian Federation*

³*ALROSA Joint Stock Company (PJSC), Mirny, Russian Federation*

⁴*V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy,
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation*

[✉]*petrignatov@gmail.com*

Abstract

The investigation of the Syuldyukar kimberlite field, located within the Yakut diamond-bearing province, involved approximately 4,000 X-ray fluorescence (XFA) analyses and 150 inductively coupled plasma atomic emission spectroscopy (ICP AES) analyses on the host sedimentary rocks of the Upper Cambrian Holomolokha formation in proximity to the kimberlite bodies. The results indicated a disruption in the correlation ratios when compared to background concentrations, while subclark levels of vanadium (V), scandium (Sc), chromium (Cr), nickel (Ni), and other elements remained consistent. The elements were divided into three categories: typomorphic elements for kimberlites (Cr, Ni, Co), elements associated with carbonatites (barium (Ba), strontium (Sr), neodymium (Nd), zirconium (Zr)), and elements characteristic of basalts (V, Sc, zinc (Zn)). High positive correlation coefficients were established for the specified elements in the background concentrations. However, ICP analyses indicated significant decreases in the correlation between elements from different groups in the near-kimberlite space at the Syuldyukar site. X-ray diffraction (XRD) studies showed that in the compression areas, the correlation ratios of various elements were inconsistent when compared to the stretching areas. The analysis of the XRF and ICP data revealed that the average elemental concentrations in the background and near-tube space were nearly identical, except for some unusual hurricane values, with variations showing only slight changes. The positive correlation of several elements likely reflects background geological processes, including sedimentation in a marine basin and subsequent transformations such as hypergenesis, diagenesis, and catagenesis. The significant decrease in correlation coefficients, even with background concentrations remaining stable, is likely due to the redistribution of elements in the fluid resulting from phreatomagmatic explosions linked to the intrusion of kimberlites. Aqueous chloride fluids were observed to most actively redistribute elements in areas experiencing local tectonic compression. The identified changes in the correlation ratios of background elemental concentrations in sedimentary rocks containing kimberlite could act as a new indicator for locating hidden diamond-bearing kimberlites.

Keywords: Syuldyukar kimberlite field, terrigenous carbonate deposits, vanadium, scandium, chromium, nickel, ratios, correlation coefficients

Funding. This study was funded by the Russian Science Foundation (Project No. 23-27-00280). The analysis of the kimberlites was interpreted within the state assignment for the DPMGI SB RAS.

For citation: Ignatov P.A., Eremenko R.U., Tolstov A.V., Illarionov P.N., Ovchinnikov I.M. The characteristics of V, Sc, Cr and Ni within the Cambrian terrigenous-carbonate deposits found in the Syuldyukar kimberlite field (Western Yakutia). *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2024;29(3):362–371. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-3-362-371>

Введение

Поиски кимберлитов с использованием геохимических методов проводятся с конца прошлого века и доказали свою эффективность [1]. В настоящее время на закрытых территориях при поисковых работах с применением колонкового бурения выделяют концентрационные аномалии Cr, Ni и других элементов по результатам опробования керна в разрезах терригенно-кар-

бонатных пород нижнего палеозоя, однако, эта задача значительно усложнилась [2–4]. Анализ фоновых распределений элементов во вмещающих отложениях не проводился. Такое исследование проведено нами на примере геохимических данных по породам холомолокской свиты верхнего кембрия в Сюльдюкарском кимберлитовом поле Ыгыаттинского алмазоносного района Западной Якутии.

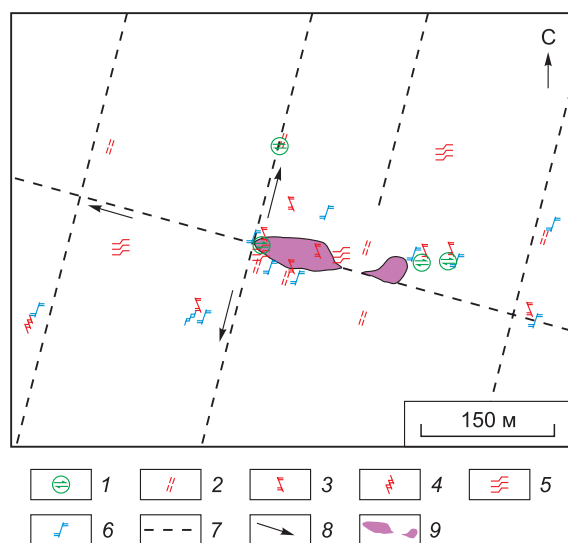


Рис. 1. Структурная схема участка Сюльдюкарского кимберлитового тела. 1 – зеркала скольжения с горизонтальными бороздами; 2 – расланцевание; 3 – микровзбросы; 4 – системы микровзбросов; 5 – микроскладки волочения; 6 – микросбросы; 7 – осевые части сдвиговых швов; 8 – направления движения сдвигов; 9 – кимберлиты

Fig. 1. Structural diagram of the Syuldyukar kimberlite body. 1 – sliding mirrors with horizontal furrows; 2 – slanting; 3 – microsurvey; 4 – microburst systems; 5 – drawing microbursts; 6 – microfault; 7 – axial parts of shear seams; 8 – directions of shear movement; 9 – kimberlites

Для анализа выбраны следующие элементы: Cr, Ni, Co, V, Sc, Zn, Ba, Sr, Zr и Nd. Cr, Ni и Co являются типоморфными элементами кимберлитов [5–9]. V, Sc и Zn типичны для базитов, обломки которых обнаружены в кимберлитовой брекчии Сюльдюкарского тела [10, 11]. Ba, Sr, Zr и Nd характерны для карбонатитов, сопровождающих кимберлитовый магматизм [7, 11]. Их средние высокие концентрации отмечены и в кимберлитах Якутии [5], считающихся некоторыми кимберлит-карбонатитами [12]. Помимо этого, V и Ni могут дополнительно указывать на разгрузку углеводородов нефтяного ряда в кимберлитовых телах.

Содержания этих элементов корректно определяются методами ICP AES и рентгено-флуоресцентного (РФА) анализов, которые используются в практике работ Вилпойской ГРЭ АК «АЛРОСА» (ПАО) [2, 13]. Для анализа отбирались породы, не затронутые гипергенными изменениями, а также не претерпевшие гидротермально-метасоматических изменений – перекристаллизации, скарирования и, как правило, не содержащие видимых прожилков кальцита, пирита и пр. Анализы

выполнены в ЦАЛ ВГРЭ: ICP AES производился на приборе iCAP 6300Duo (фирма Thermo Scientific (США)), РФА-анализ осуществлялся по методике SemiQuant.

Сюльдюкарское кимберлитовое поле является хорошим полигоном для исследования, поскольку оно относительно полно изучено по равномерной сети наблюдений. Убедительно определена структурная позиция одноименных кимберлитов [11, 14–16]. Имеется представительное количество анализов, включая десятки ICP и тысячи РФА по породам кембрия, в том числе вдали от кимберлитов и в околотрубочном пространстве.

Результаты и обсуждение

Кимберлиты Сюльдюкарского поля прорывают преимущественно горизонтально залегающую толщу холомолохской свиты кембрийской системы и перекрыты пермской угленосной толщей песчаников с пластами углистых алевролитов, аргиллитов и бурых углей боруллойской и ахтардинской свит. Последние во многих местах перекрыты грубозернистыми туфами основного состава и включают силлы триасовых траппов Холумолохской интрузии [17].

Кимберлиты локализованы в узле пересечения рудовмещающего крутопадающего запад-северо-западного сбрососдвига и также крутозалегающего север-северовосточного сдвига (рис. 1, 2). В результате картирования признаков тектонических нарушений, отражающих условия сжатия или растяжения [18], на участке Сюльдюкарского кимберлитового тела установлены сектора сжатия и растяжения.

Терригенно-карбонатная толща холумолохской свиты в части, вскрытой поисковыми скважинами, представлена литогенетическими типами, накапливавшимися в мелководно-морских обстановках солоноватоводного бассейна. Они включают: серые со штриховой горизонтальной слоистостью или массивные пелитоморфные доломиты застойноводных зон; серые алевролитистые и песчаные доломиты и доломитистые песчаники массивные или со штриховой горизонтальной слоистостью; зеленовато-серые, пестроцветные и красноватые тонковолнисто-слоистые глинистые доломиты и доломитистые аргиллиты с варвоподобной слоистостью, в которой чередуются слойки аргиллитов и доломитов мощностью 1–5 см, предположительно накапливавшиеся в приливно-отливной зоне; комковатые светло-серые и светло-коричневые доломиты мел-

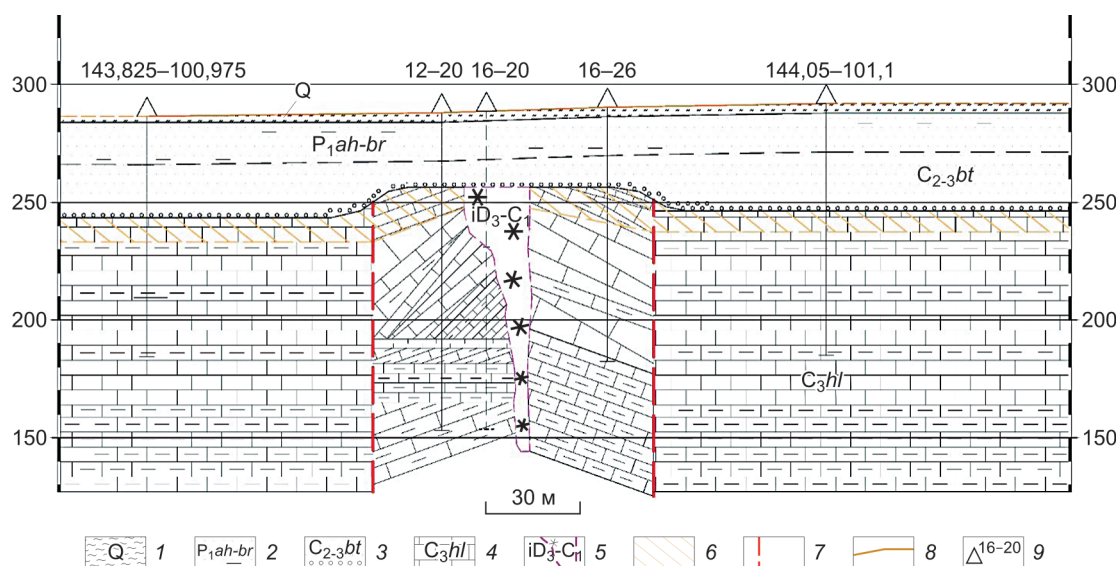


Рис. 2. Геологический профиль, поперечный к рудовмещающему сдвигу в районе Сюльдюкарского кимберлитового тела. 1 – четвертичные отложения; 2, 3 – терригенные угленосные отложения: 2 – нижнепермские ахтарандинской и боруллойской свит, 3 – каменноугольные ботубинской свиты; 4 – верхнекембрийские терригенно-карбонатные отложения холмолахской свиты; 5 – кимберлиты; 6 – древняя кора выветривания; 7 – разломы; 8 – рельеф; 9 – устья скважин и их номера. Нарушенное залегание и углы падения пород кембрия установлены по документации керна

Fig. 2. The geological profile, oriented perpendicular to the ore-bearing shift near the Syuldyukar kimberlite body. 1 – Quaternary deposits; 2, 3 – terrigenous coal-bearing deposits: 2 – Lower Permian Akhtarandinsky and Borulloy formations; 3 – carboniferous Botuobinsky formations; 4 – Upper Cambrian terrigenous-carbonate deposits of the Holomolokhsy formation; 5 – kimberlites; 6 – ancient weathering crust; 7 – faults; 8 – relief; 9 – well mouths and their numbers. The disturbed occurrence and angles of incidence of Cambrian rocks are established according to the core documentation

козернистой или оолитовой структуры, по-видимому, накапливавшиеся в условиях слабых течений; онколитовые постройки, сложенные тонколистоватыми пологоволнистыми образованиями, ассоциирующими с узловатыми формами строматолитов мощностью от 5 см до 0,5 м; красно-коричневые доломитистые глинистые алевролиты массивной структуры, вероятно, образованные в субаэральных условиях; прослои 5–10 см серых мелкокристаллических известняков, отражающих нормальную соленость бассейна. В мелко-волнисто-слоистых сероцветных породах часто присутствуют следы роющих организмов, в красноцветных и пестроцветных разностях – трещины высыхания осадков. В разрезах встречаются дециметровые слои с плоскими мелкими гальками доломитов и текстурами взмучивания осадков.

По данным ICP AES- и РФА-анализа макрокомпонентов, отложения холмолахской свиты относятся к карбонатно-глинистыми, алевролитистыми или песчанисто-карбонатным. Преобладают доломиты, имеются прослои известняков. Содержания Al_2O_3 колеблются от 1 до 14, SiO_2 – от 5 до 53, CaO – от 5 до 48,5, MgO – от 0,5 до 18,5 Fe_2O_3 – от 0,5 до 7,5 %.

Для определения фоновых содержаний взяты результаты штучного опробования. Частое прослаивание отмеченных литотипов предполагает использовать для геохимического анализа объединенные выборки, включающие как карбонатные, так и глинистые разности пород.

Из скважин, удаленных от кимберлитов более чем на 2 км и представляющих геохимический фон, проанализировано 77 анализов ICP AES проб, включающих 31 пробу по сероцветным терригенно-карбонатным породам и 46 – по красноцветным карбонатно-глинистым разностям. Из околотрубочного пространства использовано 58 анализов из скважин, отстоящих от кимберлитов от 20 до 140 м. При расчете средних значений из выборок были удалены пробы с ураганными концентрациями элементов.

Для определения сопоставимости результатов двух разных типов анализов рассчитаны средние содержания. Для рассматриваемых и других элементов они практически совпадают (табл. 1).

Важно отметить, что средние значения совпадают как для фоновых содержаний удаленных от кимберлитов участков, так и в ближайшем околотрубочном пространстве. Они соответствуют

Таблица 1

Средние содержания элементов в фоновых пробах Сюльдюкарского поля и вблизи кимберлита по данным РФА и ICP (без ураганных содержаний)

Table 1

Average elemental concentrations in the background samples from the Syuldyukar field and near kimberlite, based on XRF and ICP data (excluding hurricane contents)								
Анализ (к-во проб)	Cr	V	Co	Ni	Sr	Ba	Zn	Nd
Фоновое пространство								
ICP (93)	59,53	61,73	12,16	36,95	189,00	204,94	44,82	13,55
РФА (395)	58,52	62,14	10,65	31,52	105,62	278,58	45,33	25,14
Околотрубочное пространство								
ICP (48)	72,64	57,77	7,04	34,46	124,60	119,85	46,44	20,75
РФА (243)	59,77	41,02	7,15	31,41	126,76	244,61	41,74	23,54

кларковым значениям для осадочных пород. Для осадочных пород, удаленных от кимберлитов, установлена отчетливая положительная корреляция всех проанализированных элементов (рис. 3, а). Для пород из околотрубочного пространства, за исключением V со Sc, она существенно снижается вплоть до ее полного отсутствия (см.

рис. 3, 4). Особенно это интересно для соотношения Cr и Ni, элементов типичных для кимберлитов.

Однако, по РФА нарушение корреляции в околотрубочном пространстве далеко не так явно проявлено, что, вероятно, обусловлено особенно- стью отбора образцов, когда в них попадали ин-

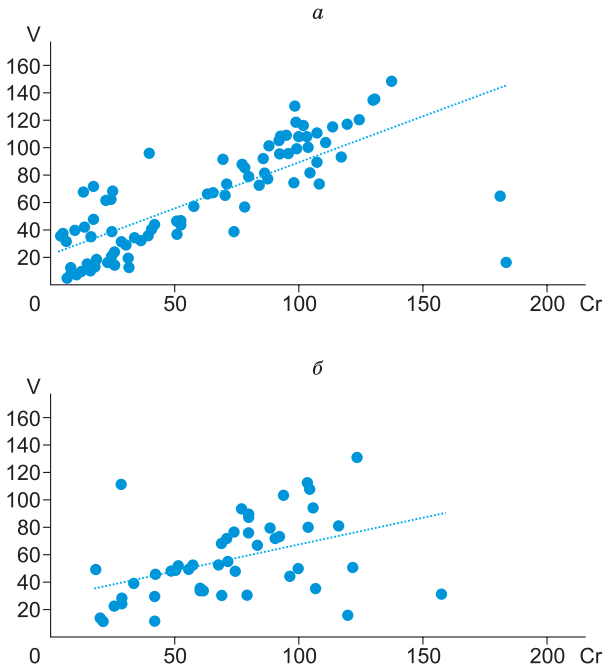


Рис. 3. Положительная корреляция фоновых содержаний V-Cr в осадочных породах кембрия в центральной части Сюльдюкарского кимберлитового поля (а) и ее отсутствия в околотрубочном пространстве кимберлитов (б)

Fig. 3. Positive correlation between background vanadium-chromium (V-Cr) contents in Cambrian sedimentary rocks located in the central part of the Syuldyukar kimberlite field (a) and a lack of such correlation in the near-tubular kimberlite area (b).

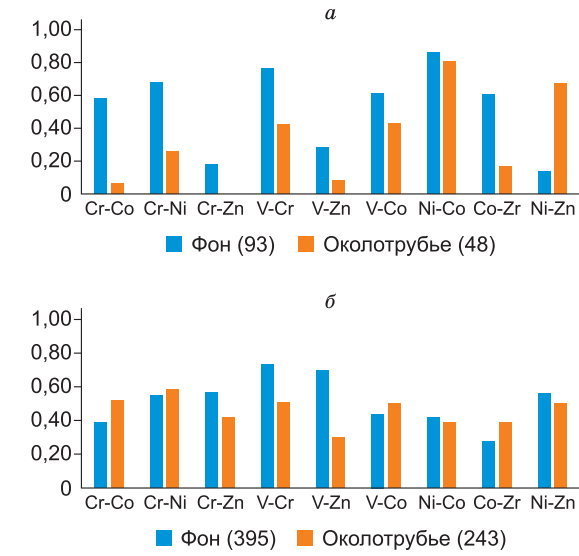


Рис. 4. Коэффициенты корреляции элементов в фоновом пространстве Сюльдюкарского поля и вблизи Сюльдюкарского кимберлита по результатам анализов ICP AES (а) и РФА (б)

Fig. 4. Correlation coefficients of elements in the background space of the Syuldyukar field and near the Syuldyukar kimberlite, based on the results of ICP AES (a) and XRF (b) analyses

Таблица 2

**Коэффициенты корреляции элементов
в секторах сжатия в околотрубном
пространстве сьюльдюкарских кимберлитов
по данным РФА (94 анализа по трем скважинам)**

Table 2

**Correlation coefficients of elements
in the compression sectors of the near-tube space
of the Syuldyukar kimberlites, based on XRF data
from 94 analyses across 3 wells**

	Cr	V	Co	Ni	Ba	Zn	Nd
Cr	—	0,56	0,15	0,45	0,32	0,25	0,42
V	0,56	—	0,38	0,48	0,44	0,21	0,14
Co	0,15	0,38	—	0,38	0,07	0,17	0,23
Ni	0,45	0,48	0,38	—	0,29	0,14	0,25
Ba	0,32	0,44	0,07	0,29	—	0,07	0,13
Zn	0,25	0,21	0,17	0,14	0,07	—	0,29
Nd	0,42	0,14	0,23	0,25	0,13	0,29	—

тервалы пород, содержащие вкрапленные и прожилковые минеральные новообразования. Такие пробы выявлены по ураганным значениям и не учитывались, но часть из них могла остаться. Отчетливое уменьшение корреляции вблизи кимберлитов установлено только по разрезам, которые попали в сектора сжатия, показанные на рис. 1. В породах из секторов растяжения корреляция сохраняется (табл. 2, 3, рис. 5).

При этом следует отметить, что геохимическая неоднородность субфоновых содержаний элементов в секторах сжатия и растяжения околотрубного пространства различается и по средним значениям. Так, в секторах растяжения заметны изменения средних содержаний Sc, Pb и Zn, а в секторе сжатия – Ba и Sr (см. табл. 4). Остальные элементы не испытывают заметных колебаний фоновых содержаний.

Увеличение содержания Ba и Sr в зонах сжатия можно связать с прожилками и импрегнацией в связи с карбонатитовым процессом, для которого они типоморфны и встречаются в промышленных концентрациях [19]. Надо заметить, что некоторые исследователи относят кимберлиты Якутии к карбонатит-кимберлитам [12] и в них часто встречаются повышенные содержания этих металлов [5, 20, 21]. Рост содержаний Pb и Zn можно объяснить участием H₂S и соответствующим барьером их осаждения. Напомним, что между трубками Мир и Спутник закартирована крупнопадающая галенит-сфалеритовая жила [22]. Повышение концентрации Sc, возможно, связа-

Таблица 3

**Коэффициенты корреляции в секторах
растяжения в околотрубном пространстве
сьюльдюкарских кимберлитов по данным РФА
(151 анализ по трем скважинам)**

Table 3

**Correlation coefficients in the stretching sectors
of the near-tube space of the Syuldyukar kimberlites,
based on XRF data from 151 analyses
across three wells**

	Cr	V	Co	Ni	Ba	Zn	Nd
Cr	—	0,51	0,64	0,62	0,49	0,43	0,51
V	0,51	—	0,55	0,42	0,55	0,35	0,43
Co	0,64	0,55	—	0,39	0,48	0,26	0,35
Ni	0,62	0,42	0,39	—	0,32	0,61	0,56
Ba	0,49	0,55	0,48	0,32	—	0,24	0,40
Zn	0,43	0,35	0,26	0,61	0,24	—	0,38
Nd	0,51	0,43	0,35	0,56	0,40	0,38	—

но с концентрациями в железистом сфалерите, что отмечено для колчеданных руд района Печенги [23].

Высокая корреляция между элементами фоновых содержаний для осадочных пород, очевидно, обусловлена процессами выветривания, морской седиментации, диагенеза и катагенеза терригенно-карбонатных отложений. На всех стадиях литогенеза должно происходить выравнивание содержаний и установление прочных связей за счет однотипных процессов дифференциации элементов в литогенезе [24].

Для объяснения нарушения таких связей в околотрубном пространстве надо напомнить, что, по ряду представлений, формирование кимберлитов происходило в результате фреатомагматических взрывов [25–28]. Когда быстро поднимающаяся флюидизированная магма с температурой

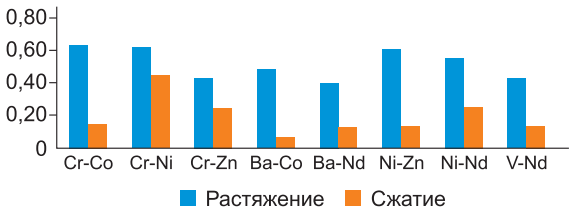


Рис. 5. Соотношения коэффициентов корреляции в секторах растяжения и сжатия в околотрубном пространстве сьюльдюкарских кимберлитов по данным РФА

Fig. 5. Correlation coefficients for tension and compression in the near-tube space of the Syuldyukar kimberlites based on XRF data

**Средние содержания элементов в неизмененных осадочных породах кембрия
в секторах сжатия и растяжения околотрубочного пространства сюльдюкарских кимберлитов**

Table 4

**Correlation coefficients of elements in the compression sectors of the near-tube space
of the Syuldyukar kimberlites, based on XRF data from 94 analyses across 3 wells**

Сектор (число анализов)	Ba	Sr	Cr	V	Ni	Co	Sc	Pb	Zn
Сектор сжатия (94)	262,4	173,7	52,1	39,8	27,0	6,6	4,4	9,5	34,6
Сектор растяжения (151)	233,6	97,7	64,5	41,8	34,2	7,5	8,0	10,3	46,3

порядка 1000 °С достигала на глубинах 1,0–1,5 км кембрийских рассолов, температура которых в позднем девоне вряд ли намного превышала 100 °С. В этих условиях при взрывах должен был формироваться сложный газовый флюид, часть которого захватывала вмещающую кимберлиты геологическую среду.

Очевидно, что в блоках сжатия газы существенно импрегнировали породы, а в блоках растяжения – диссипировали в атмосферу. Ореолы импрегнированного высокотемпературного CO₂ установлены в околотрубочном пространстве на участках Майского месторождения и Озерного рудопроявления алмазов в Накынском поле Якутии [29]. Помимо CO₂ во флюиде должны были быть CH₄, соединения хлора, S и H₂S. Вероятно, они могли экстрагировать элементы и в разной степени их переносить, что и предопределило нарушение корреляции между ними в околотрубочном пространстве. При этом возможно образование микроминералов, которые установлены в околотрубочном пространстве кимберлитов Архангельской субпровинции [20, 30]. Вследствие действия высокотемпературных флюидов и большого взрывного давления, вполне вероятно, происходили реакции газовых соединений хлора и водорода с рассматриваемыми металлами, многие из которых были в рассеянной не минеральной форме. Можно предположить, что хлориды и, возможно, гидриды тяжелых тугоплавких металлов, в частности Cr, должны были иметь короткий путь в породе. Напротив, хлориды и гидриды относительно легкого и менее тугоплавкого Ni и, тем более, металлоида V продвигались далее в твердой фазе горной породы.

При этом в условиях тектонического сжатия они должны были накапливаться, а в условиях растяжения все газы должны были уходить из околотрубочного пространства. Также можно предположить, что хлориды и гидриды быстро распадались при быстром последующем остыва-

нии флюида и появлении водной фазы. Повышение корреляции между Sc и V следует объяснить их весьма тесной связью в процессах магматизма, когда формируется скандиеносный ванадиеносный титаномагнетит.

Заключение

Выявленное нарушение корреляции V и Ni с Cr неизмененных хемогенно-осадочных отложений кембрия, слагающих околотрубочное пространство девонских трубочных и даечных тел Сюльдюкарского кимберлитового поля, относительно фоновых значений в разрезах может служить новым поисковым признаком коренных алмазных месторождений. Есть определенные основания полагать, что образование хлоридов и гидридов происходило в условиях локального тектонического сжатия. В моменты взрывных проникновений Cl и H именно породы, испытывавшие локальный тектонический стресс, могли служить экраном для Cl- и H-содержащих флюидов, которые перераспределяли металлы.

Гипотезу о влиянии высокобарических и высокотемпературных миллисекундных процессов образования газовых соединений хлора Cl и водорода с металлами, сопровождавших взрывные образования кимберлитов, как причину нарушения корреляции следует проверить на других алмазоносных объектах и с физико-химических позиций.

Список литературы / References

1. Ягнышев Б.С., Ягнышева Т.А., Андреев С.К. Вторичное минералообразование пород нижнего палеозоя как основа минералого-геохимического картирования при поисках кимберлитов. В кн.: Лазебник К.А., Давыдов Ю.В., Трунилина В.А. (ред.) *Типоморфизм и геохимические особенности минералов эндогенных образований Якутии*. Якутск: Изд. ЯФ АН СССР; 1985. С. 110–116.

Yagnyshev B.S., Yagnysheva T.A., Andreev S.K. Secondary mineralization of rocks of the Lower Paleozoic as

the basis of mineralogical and geochemical mapping in the search for kimberlites. In: Lazebnik K.A., Davydov Yu.V., Trunilina V.A. (eds.) *Typomorphism and geochemical features of minerals of endogenous formations in Yakutia*. Yakutsk.: YaF of the USSR Academy of Sciences; 1985, pp. 110–116. (In Russ.)

2. Кириллина А.В., Васильева В.И., Симоненко В.И. Геохимические методы поисков кимберлитов на закрытых территориях западной Якутии. В кн.: Спиридонов И.Г., Левченко Е.Н. (ред.) *Роль геохимии в развитии МСБ ТПИ. Прогноз, поиски, оценка инновационные технологии освоения редкометалльных объектов: Всероссийская научно-практическая конференция, 21–23 ноября 2016 г. М.: ИМГРЭ; 2016. С. 44–47.*

Kirillina A.V., Vasilyeva V.I., Simonenko V.I. Geochemical methods of kimberlite prospecting in the blocked areas of Western Yakutia. In: Spiridonov I.G., Levchenko E.N. (eds.) *The role of geochemistry in the advancement of the Raw Materials Base pertaining to Solid Mineral Deposits. Forecasting, exploration and assessment of innovative technologies aimed at the extraction and utilization of rare metal resources: Proceedings of the All-Russian scientific and practical conference, November 21–23, 2016. Moscow: IMGRE; 2016, pp. 44–47. (In Russ.)*

3. 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):108–112.

Simonenko V.I., Tolstov A.V., Vasilyeva V.I. New approach to geochemical search for kimberlite at overburden areas. *Exploration and protection of mineral resources*. 2008;(4-5):108–112. (In Russ.)

4. Симоненко В.И., Васильева В.И. Индикаторные свойства хлора при поисках кимберлитов по первичным геохимическим ореолам. В кн.: *Геологическое обеспечение минерально-сырьевой базы алмазов: проблемы, пути решения, инновационные разработки и технологии: Материалы IV Региональной научно-практической конференции, г. Мирный, 9–11 июня, 2014. Мирный; 2014. С. 209–211.*

Simonenko V.I., Vasilyeva V.I. Indicator properties of chlorine in the search for kimberlites by primary geochemical halos. In: *Geological support of the mineral resource base of diamonds; problems, solutions, innovative developments and technologies: Proceedings of the 4th Regional Scientific and Practical Conference, Mirny, June 9–11, 2014. 2014, pp. 209–211. (In Russ.)*

5. Костровицкий С.И., Специус З.В., Яковлев Д.А. и др. *Атлас коренных месторождений алмаза Якутской кимберлитовой провинции*. Мирный: Типография ООО «МГП»; 2015. 480 с.

Kostrovitsky S.I., Spezius Z.V., Yakovlev D.A., et al. *Atlas of the native diamond reserves in the Yakut kimberlite region*. Mirny: LLC “MGP”; 2015. 480 p.

6. Костровицкий С.И., Яковлев Д.А. *Происхождение кимберлитов Якутской провинции*. Иркутск: Ин-

ститут геохимии СО РАН им. А.П. Виноградова, Институт земной коры СО РАН; 2023. 478 с.

Kostrovitsky S.I., Yakovlev D.A. *The origin of kimberlites in the Yakut region*. Irkutsk: Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS, Institute of the Earth's Crust SB RAS; 2023. 478 p.

7. Lapin A.V., Kulikova I.M., Tolstov A.V. Distribution of REE, Y, SC, and Th in the unique complex rare-metal ores of the Tomtor Deposit. *Geochemistry International*. 2016;54(12):1061–1078. <https://doi.org/10.1134/S0016702916120065>

8. 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*. 2007;414(1):557–560. <https://doi.org/10.1134/S1028334X07040150>

9. 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*. 2007; 45(12):1197–1209. <https://doi.org/10.1134/S0016702907120026>

10. Мальцев М.В., Толстов А.В., Фомин В.М., Старкова Т.С. Новое кимберлитовое поле в Якутии и типоморфные особенности его минералов-индикаторов. *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2016;(3):86–94.

Maltsev M.V., Tolstov A.V., Fomin V.M., Starkova T.S. New kimberlite field in Yakutia and typomorphic especially its indicators minerals. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*. 2016;(3):86–94. (In Russ.)

11. Толстов А.В., Минин В.А., Василенко В.Б. и др. Новое тело высокоалмазных кимберлитов в Накынском поле Якутской кимберлитовой провинции. *Геология и геофизика*. 2009;50(3):227–240.

Tolstov A.V., Razumov A.N., Minin V.A., et al. A new body of highly diamondiferous Kimberlites in the Nakyn field of the Yakutian kimberlite province. *Russian Geology and Geophysics*. 2009;50(3):162–173.

12. Маршинцев В.К. *Кимберлитовые породы Якутии*. Якутск: Изд. Якутского гос. ун-та; 1995. 34 с.

Marshintsev V.K. *Kimberlite rocks of Yakutia. Yakutsk: The yakut state. univ*; 1995. 34 p. (In Russ.)

13. Кременецкий А.А., Карась С.А., Толстов А.В. Геохимические поиски кимберлитовых трубок на закрытых территориях. Проблемы и решения. *Региональная геология и металлогения*. 2006;(27):126–139.

Kremenetsky A.A., Karas S.A., Tolstov A.V. Geochemical searches of kimberlite pipes in closed territories. Problems and solutions. *Regional geology and metallogeny*. 2006;(27):126–139. (In Russ.)

14. Игнатов П.А., Зарипов Н.Р., Толстов А.В. и др. Гидротермальная минерализация в осадочных породах кембрия как индикатор рудовмещающей структуры кимберлитов Сюльдюкарского поля Якутии. *Руды и металлы*. 2021;(1):93–105.

- Ignatov P.A., Zaripov N.R., Tolstov A.V., et al. Hydrothermal mineralization in Cambrian sedimentary rocks as an indicator of the ore-containing structure of kimberlites of the Syuldukhar field of Yakutia. *Ores and metals*. 2021; (1):93–105. (In Russ.)
15. Игнатов П.А., Колесник А.Ю., Толстов А.В., Мальцев М.В. Геологические признаки рудовмещающих структур Сюльдюкарского кимберлитового поля Якутии. *Горный журнал*. 2019;(10):67–71.
- Ignatov P.A., Kolesnik A.Yu., Tolstov A.V., Maltsev M.V. Geological features of ore-containing structures of the Syuldukhar kimberlite field of Yakutia. *Mining magazine*. 2019;(10):67–71. (In Russ.)
16. Овчинников И.М., Толстов А.В. Новые возможности обработки геолого-геофизической информации на примере Сюльдюкарского кимберлитового поля (Якутия). *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2022;27(3):335–345.
- Ovchinnikov I.M., Tolstov A.V. New possibilities of processing geological and geophysical information on the example of the Syuldukhar kimberlite field (Yakutia). *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2022;27(3):335–345. (In Russ.)
17. Блажкун Д.В. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:200 000. Серия Верхневилуйская (новая серия). Лист Р-50-І. Объяснительная записка. М.: МФ ВСЕГЕИ; 2013. 142 с.
- Blazhkun D.V. State geological map of the Russian Federation on a scale of 1:200 000. Verkhnevilyuyskaya series (new series). Sheet P-50-I. Explanatory note. Moscow: MF VSEGEI; 2013. 142 p.
18. Игнатов П. А., Новиков К. В. Полевая диагностика тектонических нарушений и флюидоразрывных образований в кимберлитовмещающих отложениях нижнего палеозоя. *Методическое руководство*. Мирный; 2019. 76 с.
- Ignatov P. A., Novikov K. V. Field diagnostics of tectonic disturbances and fluid-fracturing formations in kimberlite-bearing sediments of the Lower Paleozoic. *Methodological guide*. Mirny; 2019; 76 p.
19. Фролов А. А., Лапин А. В., Толстов А. В. и др. Карбонаты и кимберлиты (взаимоотношения, минерогенез, прогноз). М.: НИИ-Природа; 2005. 540 с.
- Frolov A. A., Lapin A. V., Tolstov A. V., et al. Carbonates and kimberlites (relationships, minerageny, prognosis). Moscow: NIA-Nature; 2005. 540 p. (In Russ.)
20. Sobolev N.V., Tomilenko A.A., Kuz'min D.V., et al. Prospects of search for diamondiferous kimberlites in the northeastern Siberian platform. *Russian Geology and Geophysics*. 2018;59(10):1365–1379.
21. Vasilenko V.B., Kuznetsova L.G., Minin V.A., Tolstov A.V. Petrochemical evaluation of the Diamond potentials of Yakutian kimberlite fields *Geochemistry International*. 2010;48(4):346–354.
22. Харьков А.Д., Зинчук Н.Н., Крючков А.И. *Коренные месторождения алмазов*. М.: Недра;1998. 555 с.
- Kharkiv A.D., Zinchuk N.N., Kryuchkov A.I. *Indigenous diamond deposits*. Moscow: Nedra;1998; 555 p. (In Russ.)
23. Компанченко А.А. Хром-скандий-ванадиевая минерализация в колчеданных рудах палеопротерозойских супракрустальных комплексов Кольского региона: Автореф. дисс. ... канд. геол.-минерал. наук. Москва: ИГЕМ РАН; 2019.
- Companchenko A.A. Chromium-scandium-vanadium mineralization in pyrite ores of Paleoproterozoic supracrustal complexes of the Kola region: Abstr. ... Diss. Cand. Sci., Moscow. 2019. (In Russ.)
24. Летникова Е.Ф. Геохимическая специфика карбонатных отложений различных геодинамических обстановок северо-восточного сегмента палеоазиатского океана. *Литосфера*. 2005;(1):70–81.
- Letnikova E.F. Geochemical specificity of carbonate deposits of various geodynamic settings of the northeastern segment of the Paleosianic ocean. *Lithosphere*. 2005;(1):70–81. (In Russ.)
25. Игнатов П.А., Новиков К.В., Зарипов Н.Р. и др. Эруптивные флюидоразрывные образования Накынского алмазоносного поля Якутии. *Вестник Московского университета. Серия 4. Геология*. 2018;(6):37–44.
- Ignatov P.A., Novikov K.V., Zaripov N.R., et al. Eruptive fluid-fracturing formations of the Nakyn diamond-bearing field of Yakutia. *Bulletin of the Moscow University. Series 4. Geology*. 2018;(6):37–44. (In Russ.)
26. Ходня М.С., Игнатов П.А., Лисковская Л.В. Вещественные признаки карбонатных флюидовзрывных образований Накынского алмазоносного поля Якутии. *Отечественная геология*. 2018;(6):38–42.
- Khodnya M.S., Ignatov P.A., Liskovaya L.V. Material signs of carbonate fluid-explosive formations of the Nakyn diamond-bearing field of Yakutia. *Domestic Geology*. 2018;(6):38–42. (In Russ.)
27. Lorenz V., Kurszlaukis S. Root zone processes in the phreatomagmatic pipe emplacement model and consequences for the evolution of maar-diatreme volcanoes. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2007; (159): 4–32.
28. Porritt L.A., Russell J.K., McLean H., et al. A Phreatomagmatic Kimberlite: The A418 Kimberlite Pipe, Northwest Territories, Canada. In: *Proceedings of 10th International Kimberlite Conference*. New Delhi 6 Springer; pp. 97–108. https://doi.org/10.1007/978-81-322-1173-0_7.
29. Игнатов П.А., Шмонов А.М., Новиков К.В. и др. Ореолы углекислого газа в карбонатных породах, вмещающих дайково-жильные кимберлитовые тела Накынского поля Якутии. *Руды и металлы*. 2014; (3):39–46.
- Ignatov P.A., Shmonov A.M., Novikov K.V., et al. Carbon dioxide halos in carbonate rocks containing dike-vein kimberlite bodies of the Nakynsky field of Yakutia. *Ores and metals*. 2014;(3):39–46. (In Russ.)

30. Соболев В.К., Макеев А.Б., Кисель С.А. и др. *Новые индикаторные признаки пород, вмещающих кимберлиты*. Сыктывкар: Геопринт; 2003. 60 с.

Sobolev V.K., Makeev A.B., Kisel S.A., et al. *New indicator signs of rocks containing kimberlites*. Syktyvkar. Geoprint; 2003. 60 p. (In Russ.)

Об авторах

ИГНАТОВ Петр Алексеевич, доктор геолого-минералогических наук, профессор, <https://orcid.org/0000-0002-7956-580X>, Scopus AuthorID: 14624021100, SPIN: 7893-1477, e-mail: petrignatov@gmail.com

ЕРЕМЕНКО Руслан Умарович, аспирант, инженер-исследователь, <https://orcid.org/0009-0009-1997-8723>, SPIN: 3885-1807, e-mail: eremenko-ruslan@mail.ru

ТОЛСТОВ Александр Васильевич, доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0003-3863-5071>, ResearcherID: O-2643-2013, Scopus Author ID: 6603548567, SPIN: 7895-6601, e-mail: tols61@mail.ru

ИЛЛАРИОНОВ Павел Николаевич, руководитель направления, e-mail: IllarionovPN@alrosa.ru

ОВЧИННИКОВ Илья Максимович, эксперт, SPIN: 1014-6140, e-mail: ovchinnikovim@alrosa.ru

Вклад авторов

Игнатов П.И. – разработка концепции, методология, проведение исследования, редактирование рукописи; **Еременко Р.У.** – проведение исследования, верификация данных, проведение статистического анализа; **Толстов А.В.** – разработка концепции, методология, проведение исследования; создание черновика и редактирование рукописи; **Илларионов П.И.** – методология, проведение исследования, верификация данных; **Овчинников И.М.** – руководство исследованием, верификация данных, редактирование рукописи

Конфликт интересов

Один из авторов – д-р геол.-мин. наук А.В. Толстов является членом редколлегии журнала «Природные ресурсы Арктики и Субарктики». Авторам неизвестно о каком-либо потенциальном конфликте интересов, связанном с этой статьей.

About the authors

IGNATOV, Petr Alekseevich, Dr. Sci. (Geol. and Mineral.), Professor, <https://orcid.org/0000-0002-7956-580X>, Scopus AuthorID: 14624021100, SPIN: 7893-1477, e-mail: petrignatov@gmail.com

EREMENKO, Ruslan Umarovich, Graduate Student, <https://orcid.org/0009-0009-1997-8723>, SPIN: 3885-1807, e-mail: eremenko-ruslan@mail.ru

TOLSTOV, Alexandr Vasilievich, Dr. Sci. (Geol. and Mineral.), Leading Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-6057-5987>, ResearcherID: O-2643-2013, SPIN: 7895-6601, e-mail: tols61@mail.ru

ILLARIONOV, Pavel Nikolaevich, Head of the Department, e-mail: IllarionovPN@alrosa.ru

OVCHINNIKOV, Ilya Maksimovich, Expert, SPIN: 1014-6140, e-mail: ovchinnikovim@alrosa.ru

Authors' contribution

Ignatov P.A. – conceptualization, methodology, investigation, writing – review & editing; **Eremenko R.U.** – investigation, validation, formal analysis; **Tolstov A.V.** – conceptualization, methodology, investigation, writing – original draft, writing – review & editing; **Illarionov P.N.** – methodology, investigation, validation; **Ovchinnikov I.M.** – supervision, validation, writing – review & editing

Conflict of interest

One of the authors, Tolstov A.V. Dr. Sci. (Geol. And Mineral.), Chief Researcher is a member of editorial board of “Arctic and Subarctic Natural Resources”. The authors are not aware of any other potential conflict of interest relating to this article.

Поступила в редакцию / Submitted 08.04.2024

Поступила после рецензирования / Revised 11.06.2024

Принята к публикации / Accepted 28.06.2024