

УДК 550.4, 553.81

ВЕЩЕСТВЕННЫЙ СОСТАВ И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ГРУППЫ ПЛАТИНЫ В ЗЮВИТАХ ПОПИГАЙСКОЙ АСТРОБЛЕМЫ

© 2022 г. Е. В. Агашева^{1,*}, О. А. Козьменко¹, Е. В. Малыгина¹,
В. П. Афанасьев¹, академик РАН Н. П. Похиленко¹

Поступило 22.06.2022 г.
После доработки 27.06.2022 г.
Принято к публикации 07.07.2022 г.

Представлены данные по концентрациям главных и редких элементов, в том числе элементов платиновой группы (ЭПГ) и Re в образцах зювитов, отобранных в разных частях Попигойского метеоритного кратера. Изученные зювиты показывают идентичность валового состава; гнейсы Анабарского щита определены в качестве исходной породы. Установлено, что суммарные концентрации ЭПГ в зювитах неоднородны: они последовательно уменьшаются в образцах из западной, к южной и далее восточной части кратера. Результаты исследования показали, что обогащение зювитов ЭПГ является признаком примеси метеоритного вещества и не связано ни с коровыми, ни с мантийными породами основного и ультраосновного состава.

Ключевые слова: импактиты, элементы группы платины, импактные алмазы, зювит, тагамит

DOI: 10.31857/S2686739722700049

ВВЕДЕНИЕ

Один из крупнейших в мире по размеру (100 км в диаметре) Попигойский метеоритный кратер, образовавшийся 35.7 млн лет назад [1], расположен в северо-восточной части Анабарского щита Сибирской платформы. Отличительными особенностями этого кратера являются хорошая сохранность и обнаженность импактных пород и высокие запасы в них импактных алмазов (местами до 100 кар/т, среднее – 23 кар/т; [1, 2]). Считается [1], что эти алмазы образованы в результате твердофазного перехода из графита исходных гнейсов при ударном сжатии и приурочены к зонам распространения зювитов (разновидность импактной брекчии) и тагамитов (разновидность импактной расплавленной породы).

Зювиты Попигойской астроблемы изучены в той или иной степени [3–5], но в отличие от тагамитов [2, 6], для зювитов до сих пор отсутствуют опубликованные данные по концентрациям главных и редких элементов в комплексе с элементами платиновой группы (ЭПГ) и Re. Более того, в опубликованных ранее работах термин “зювит” применен к совершенно разным типам пород, не

все из которых соответствуют определению “зювит” по общепринятой международной классификации импактитов [7]. Например, в работе [4] выделены четыре разновидности зювитов, включающие в себя зювитовые пески и мегабрекчии, а также брекчии далдынской и парчанской серий. В работе [5] зювиты разделены на два главных семейства в зависимости от соотношения импактного стекла (витрокластов) и обломков пород и минералов (эпикластов), слагающих породу: витрокластические и эпикласто-витрокластические. Отсутствие систематических и представительных данных по составам зювитов в комплексе с применением термина “зювит” к разным типам пород затрудняет установить четкие петрогенетические отличия зювитов от других разновидностей импактитов Попигойской астроблемы, а также выявить различия в составах зювитов, расположенных в разных частях кратера.

Целью настоящей работы является определение вещественного состава образцов зювитов, соответствующих определению “зювит” согласно общепринятой международной классификации импактитов [7]. Определение концентраций главных и редких элементов, в том числе концентраций ЭПГ и Re, позволит выявить геохимические особенности зювитов и идентифицировать в их составах примесь метеоритного вещества.

¹ Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева
Сибирского отделения Российской академии наук,
Новосибирск, Россия

*E-mail: shchukinalena@igm.nsc.ru

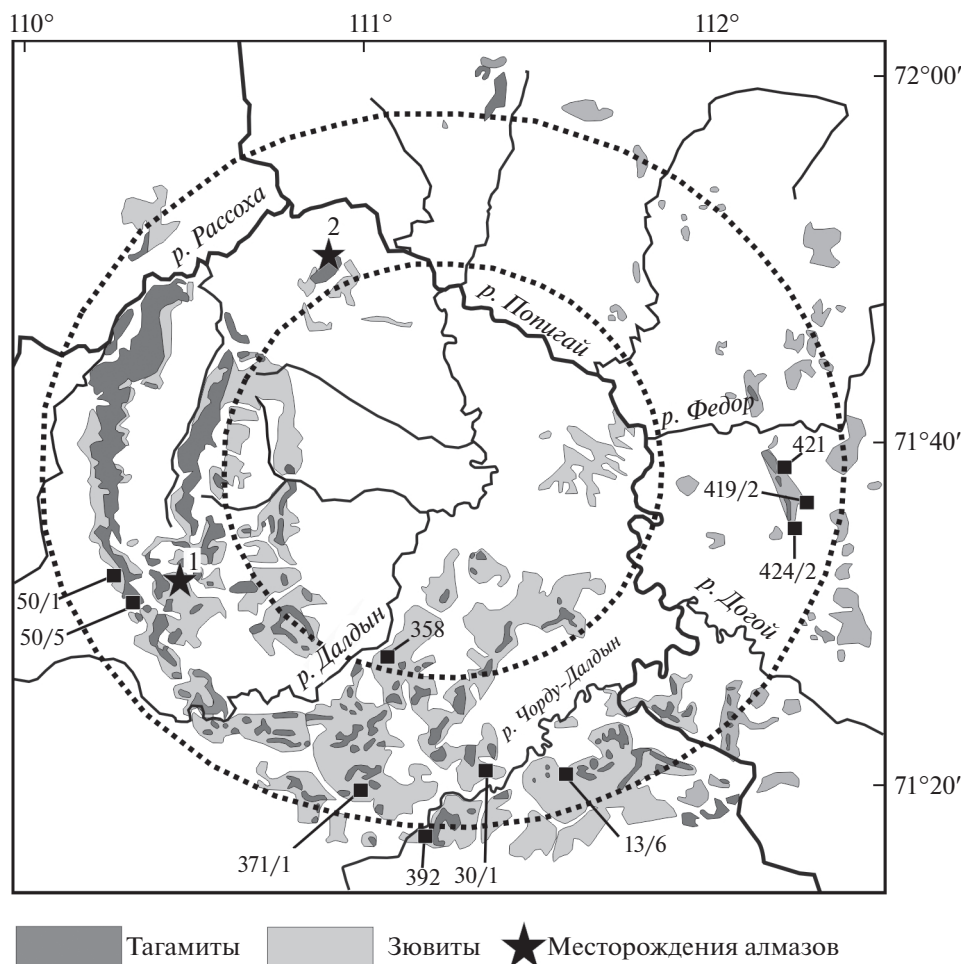


Рис. 1. Места отбора образцов зювитов на геологической схеме Попигайского метеоритного кратера. Месторождения алмазов: 1 – Скальное, 2 – Ударное.

ОБРАЗЦЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Образцы зювитов в количестве 10 штук были отобраны с поверхности в западной, южной и восточной частях кратера (рис. 1). Размер образцов составлял более 10*10 см. Все аналитические работы были сделаны в ЦКП Многоэлементных и изотопных исследований СО РАН (г. Новосибирск). Минералого-петрографические особенности зювитов были определены методами оптической (поляризационный микроскоп Axiolab 5 производства “CarlZeissMicroscopy”) и сканирующей (сканирующий микроскоп MIRA 3 LMU “Tescan Ltd.”, оснащенный системой микроанализа “INCA Energy” 450 XMax-80 “Oxford Instruments Ltd.”) микроскопии. Минеральный состав зювитов определен методом рентгеновской дифрактометрии на автоматизированном поршневом дифрактометре, с излучением CuK_2 . Съемку вели в режиме напряжение 40 кВ, ток 24 мА. Предел обнаружения минерала в породе 1 об. %. Силикатный анализ для определения 15 основных пороодообразующих оксидов зювитов выпол-

нен на рентгенофлуоресцентном спектрометре ARL-9900-XP. Определение концентраций 32 элементов-примесей, включая ЭПГ и Re, в валовых пробах выполнены на ИСП масс-спектрометре высокого разрешения ELEMENT фирмы “FinniganMat” (Германия) с ультразвуковым распылителем U-5000AT по методике, разработанной в ИГМ СО РАН [8]. Определение ЭПГ и Re было выполнено для шести образцов зювитов по методике [9, 10]. Полученные данные оценивались по стандартным образцам GP-13 и BHVO-2 и хорошо согласовались в пределах погрешности с литературными значениями [10], которая минимальна для Re – 2.6%, для остальных элементов – от 6.4 до 25%. Концентрации ЭПГ в контрольных опытах для Os и Pt составили 16 pg; Ir – 0.5; Ru – 2.1; Rh – 2.1; Pd – 10; Re – 1 pg.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Все изученные образцы зювитов представляют собой литифицированную полимиктовую брекчию, которая содержит обломки импактных сте-

кол (витрокласты), пород и минералов (в том числе имеющих признаки разных стадий ударного метаморфизма; эпикласты), сцементированные тем же тонкораздробленным материалом (матрикс), тем самым абсолютно соответствуя общепринятому термину “зювит” [5, 7, 11]. Соотношение (об. %) основных составляющих компонентов зювитов варьирует в различных образцах (рис. 2), но без каких-либо систематических отличий в зависимости от расположения в кратере: витрокласты – от 10 до 35 об. %; литокласты – до 10–15 об. %; кристаллокласты – 20–35 об. %; матрикс – от 20 до 65 об. %. Результаты рентгенофазового анализа показали, что преобладающими минеральными фазами в изученных зювитах являются кварц, плагиоклаз и калиевый полевой шпат; в меньшем количестве присутствуют смектиты, кристобалит, слюда, амфибол и пироксены. Методом сканирующей электронной микроскопии в зювитах дополнительно идентифицировано более двух десятков акцессорных минералов, в том числе гранат, ильменит, рутил, коэзит, циркон, монацит, апатит, сфен, шеелит, шпинелиды, редко сульфиды и единично самородное железо.

По содержанию главных элементов изученные зювиты достаточно однородны и близки к тагамитам Попигайского кратера [2], отличаясь от них слегка более высокими концентрациями SiO_2 и значительно более высоким показателем LOI (1.3–6.7 мас. % для зювитов и 0.03–2.7 мас. % для тагамитов), а также более низкими содержаниями Al_2O_3 , FeO, CaO и Na_2O (рис. 3). Изученные нами зювиты также отличаются от состава зювита, представленного в работе [6], который по концентрациям главных элементов идентичен тагамитам Попигайского кратера [2]. В целом на вариационных диаграммах составы зювитов занимают промежуточное положение между составами внутрикратерных гнейсов [2] и гнейсов Анабарского щита (рис. 3). В распределении Ni/Cr и Ni/Co в составах зювитов наблюдается неярко выраженная положительная корреляция (рис. 4); концентрации Ni (26–62 ppb) и Co (14–17 ppb) в зювитах соответствуют таковым в изученных ранее тагамитах [2], а содержания Cr систематически заметно более низкие (90–130 ppb в зювитах и 130–170 ppb в тагамитах). Необходимо отметить значительные отличия в составах тагамитов из работ [2] и [6]: тагамиты [6] содержат значительно более высокие концентрации Ni (63–147 ppb) и Co (23–32 ppb) при более низких, почти одинаковых для всех образцов содержаниях Cr (90–109 ppb; рис. 4). В целом по содержанию Ni, Co, Zn, V и Cu зювиты полностью соответствуют тагамитам и внутрикратерным гнейсам (по [2]) Попигайского кратера. Явных отличий зювитов от гнейсов Анабарского щита по концентрациям Ni, Cr и Co не наблюдается. По распределению редких (РЭ) и редкоземельных элемен-

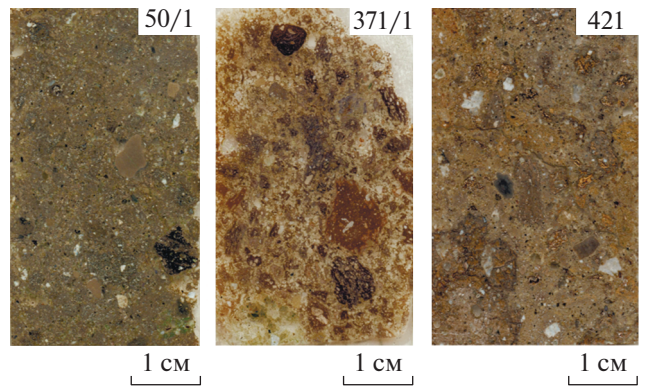


Рис. 2. Фотографии плоскополированных пластинок образцов зювитов, отобранных в западной (обр. № 50/1), южной (обр. № 371/1) и восточной (обр. № 421) частях Попигайского метеоритного кратера.

тов (РЗЭ), нормированных на хондрит C1 [12], зювиты абсолютно однородны и идентичны тагамитам и внутрикратерным гнейсам (рис. 5): наблюдаются обеднение Sr и отрицательная Eu-аномалия ($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.6\text{--}0.8$), обогащение в области легких РЗЭ ($\text{La}_n/\text{Yb}_n = 9\text{--}13$) и субгоризонтальный спектр в области тяжелых РЗЭ. По концентрациям главных и редких элементов составы изученных зювитов сопоставимы со средним составом верхней континентальной коры (УСС по [13]).

Концентрации ЭПГ и Re в зювитах представлены в табл. 1. Суммарные содержания ЭПГ и Re различны для зювитов, отобранных в восточной, западной и южной частях кратера. Зювиты восточной части кратера (образцы 419/2 и 421, табл. 1) содержат наименьшие суммарные концентрации ЭПГ + Re (1.71–1.96 ppb), из которых на долю ЭПГ Ir- группы (Os + Ir + Ru) приходится 0.27–0.36 ppb, а Pd-группы (Rh + Pt + Pd) – 1.0–1.4 ppb. Для сравнения с литературными данными [6] были использованы значения суммарных концентраций ЭПГ без Os и Re. По содержанию ЭПГ без Os и Re зювиты восточной части кратера идентичны образцу зювита из работы [6]. Для зювитов западной и южной частей кратера суммарные содержания ЭПГ + Re в 2–3 раза выше (3.05–5.37 ppb; Os + Ir + Ru = 0.73–1.91 ppb; Rh + Pt + Pd = 1.64–3.14 ppb), чем для образцов из восточной части, но суммарные концентрации ЭПГ без Os и Re (2.66–4.63 ppb) в два раза ниже, чем определенные ранее для тагамитов кратера (среднее 7.5 ppb; [6]). Суммарные значения ЭПГ без Os и Re в зювитах восточной части (1.46 ppb) в пять раз ниже по сравнению с таковыми в тагамитах [6]. Нормированные на хондрит C1 [12] спектры распределения ЭПГ и Re в шести образцах зювитов (рис. 6) показывают относительно плоское, подобное хондриту распределения ЭПГ, но обо-

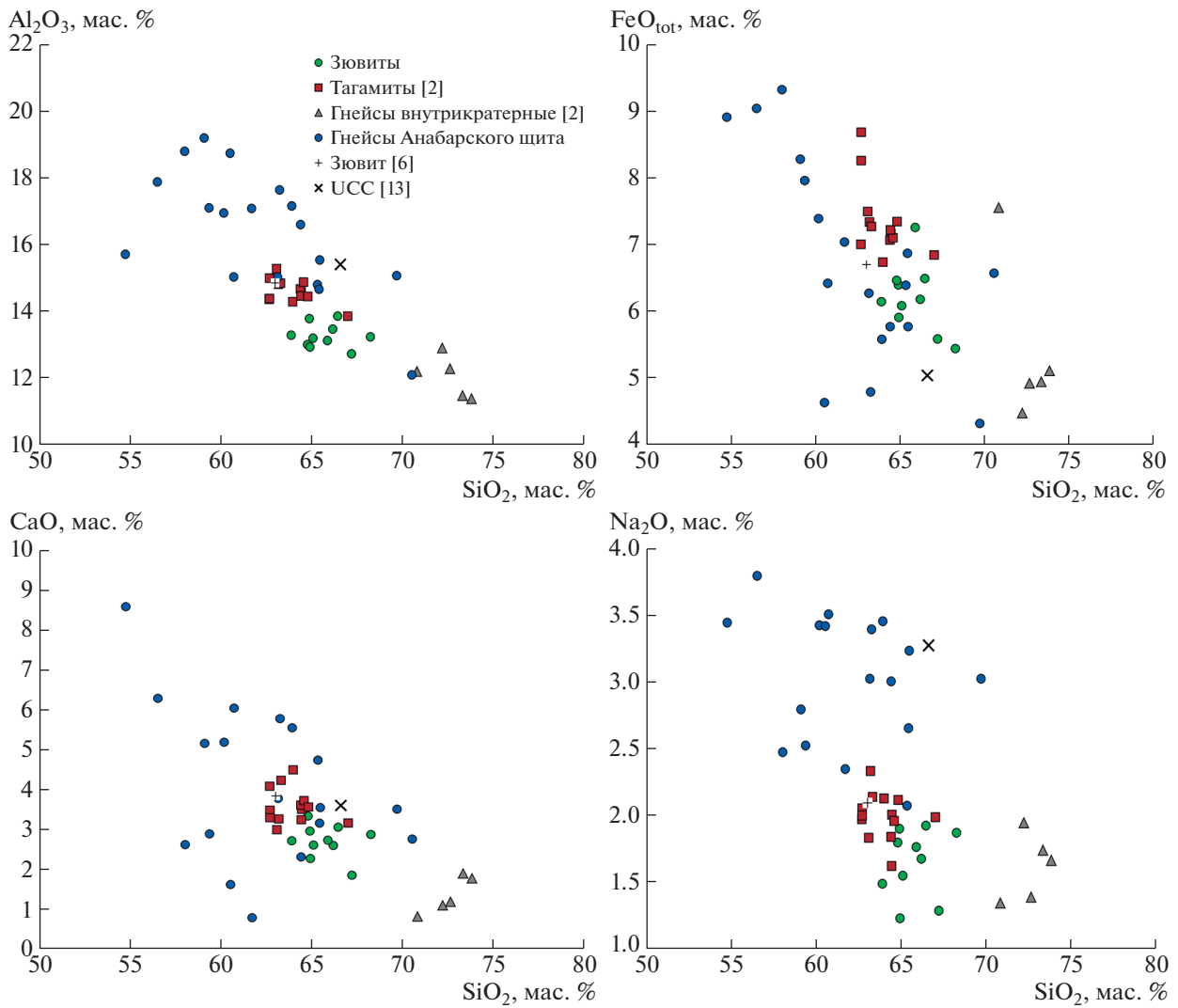


Рис. 3. Особенности валового состава (мас. %) зювитов Попигайского метеоритного кратера. Составы гнейсов Анабарского щита из [1, 3, 5, 6, 14, 16–20].

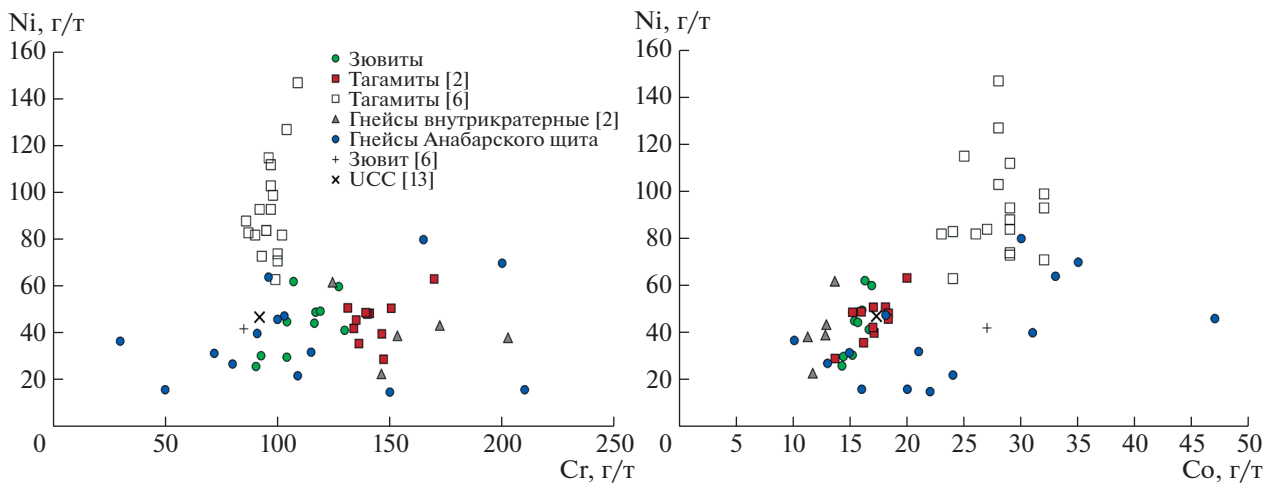


Рис. 4. Распределение Ni/Cr и Ni/Co (г/г) в зювитах Попигайского метеоритного кратера. Составы гнейсов Анабарского щита из [1, 3, 5, 6, 14, 16–20].

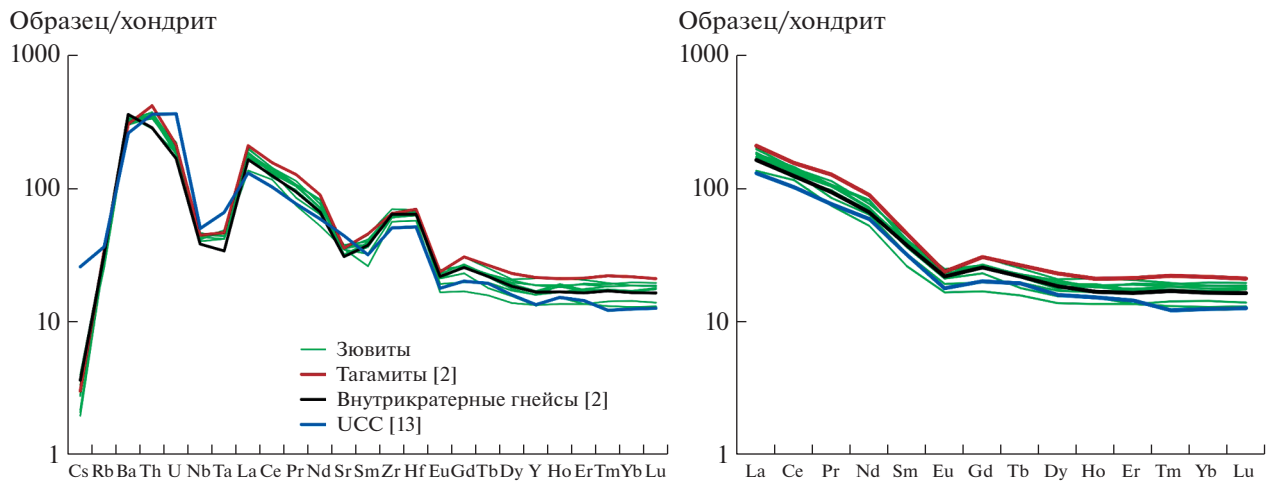


Рис. 5. Нормированные на хондрит [12] распределения редких и редкоземельных элементов в зювитах Попигайского метеоритного кратера.

гашение в области Re. В сравнении с гнейсами Анабарского щита [6] зювиты западной и южной части Попигайского кратера в два-три раза обогащены суммарными концентрациями Ir, Ru, Rh, Pt и Pd (рис. 6); в зювитах восточной части кратера такого обогащения не наблюдается (рис. 6). По сравнению со средним составом пород UCC [13] все изученные зювиты обогащены Os и Ir. Концентрации Re во всех образцах зювитов соответствуют таковым для UCC [13].

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Ранее [5] было установлено, что по сравнению с тагами валовый состав зювитов может по-

казывать более значительные вариации концентраций главных элементов, что связывается с присутствием разного количества и типа литокластов в образцах. Полученные нами данные по концентрациям главных и редких элементов в образцах зювитов из разных частей Попигайского кратера показывают абсолютное сходство их составов. Близкие значения валового состава и идентичность нормированных на хондрит спектров распределения РЭ и РЗЭ зювитов и тагами [2, 6, 14] позволяют установить для них одинаковый или близкий по составу тип исходной породы. Высокие содержания SiO_2 , соотношения концентраций FeO_{tot} , MgO и $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$, высокие значения La_n/Yb_n , обеднение по Sr, наличие

Таблица 1. Концентрации элементов платиновой группы и Re (ppb) в зювитах Попигайского метеоритного кратера. Ir-группа (Os, Ir, Ru); Pd-группа (Rh, Pt, Pd). ПО рассчитывался как три стандартных отклонения от процентурного вклада

Номер образца	50/1	358	371/1	13/6	419/2	421	ПО
Место отбора образца	западная часть		южная часть		восточная часть		
Os	0.42	0.25	0.15	0.18	0.08	0.07	0.03
Ir	0.53	0.32	0.20	0.20	0.12	0.09	0.00
Ru	0.97	0.52	1.52	0.35	0.16	0.11	0.01
Rh	0.20	0.12	0.20	0.12	0.06	0.05	0.01
Pt	1.51	1.01	0.69	1.43	0.74	0.48	0.03
Pd	1.43	0.70	0.75	0.81	0.60	0.51	0.02
Re	0.32	0.13	0.24	0.20	0.20	0.41	0.00
Σ ЭПГ	5.05	2.91	3.51	3.09	1.76	1.30	
Σ ЭПГ + Re	5.37	3.05	3.76	3.29	1.96	1.71	
Σ ЭПГ Ir группа	1.91	1.09	1.87	0.73	0.36	0.27	
Σ ЭПГ Pd группа	3.14	1.83	1.64	2.36	1.40	1.04	

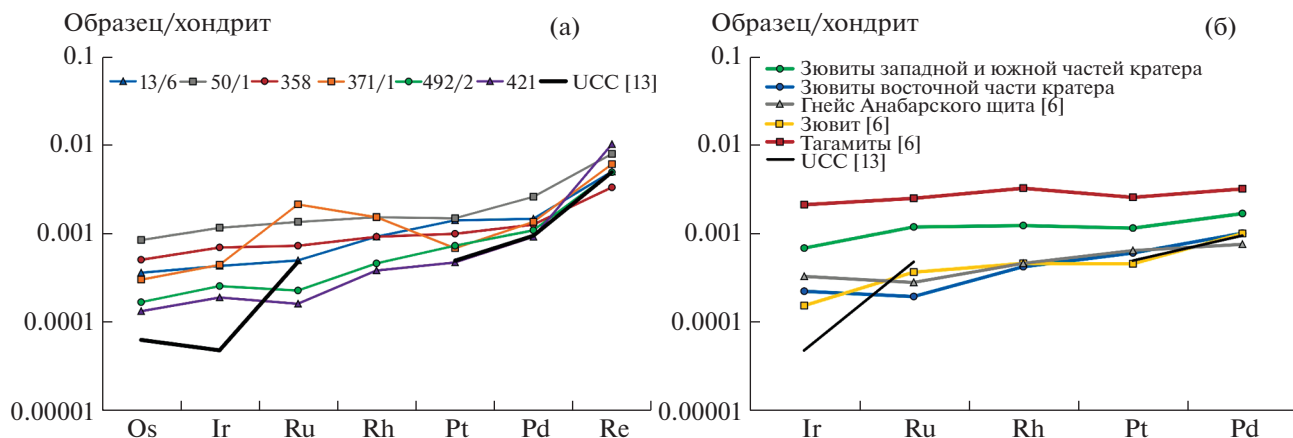


Рис. 6. Нормированные на хондрит [12] распределения (а) элементов группы платины и Re в зювитах Попигайского метеоритного кратера и (б) средних концентраций Ir, Ru, Rh, Pt, Pd в зювитах западной, южной и восточной частей кратера.

ярко выраженной отрицательной Eu-аномалии, а также значения соотношений Zr/TiO_2 (0.03–0.04) и Nb/Y (0.3–0.5) исключают основной и ультраосновной состав исходной породы как для изученных зювитов, так и для тагамитов из работ [2, 6, 14] и подтверждают, что гнейсы верхнеанабарской и хапчанской серий Анабарского щита были исходными породами для изученных импактитов.

Все изученные образцы зювитов обогащены Ir относительно UCC (рис. 6), что является одним из свидетельств того, что ЭПГ не были унаследованы от коровых пород. Дополнительно, такой плоский спектр распределения ЭПГ (рис. 6) не характерен для коровых пород, которые обеднены Ir и Ru относительно Pd. Подобный C1-хондриту стиль распределения ЭПГ типичен для мантийных пород [6], но рассматривать их в качестве источника ЭПГ для зювитов невозможно, так как концентрации главных и редких элементов в зювитах исключают какую-либо примесь пород этого типа в их составах. Более того, концентрации Re в зювитах сопоставимы с таковыми для UCC (0.2 ppb) и ниже, чем определенные для базальтов (0.5 ppb [15]). Концентрации ЭПГ в зювитах показывают хорошую положительную корреляцию (рис. 7), что свидетельствует об их одинаковом источнике [6]. Таким образом, обогащение ЭПГ в зювитах западной и южной части Попигайского кратера относительно пород мишени может быть интерпретировано только как примесь метеоритного вещества. Согласно [6], максимальная примесь метеоритного вещества (источник определен как L-хондрит) в тагамитах кратера составляет ~0.2 мас. %; очевидно, что в изученных зювитах количество примеси метеорита-ударника предполагается в несколько раз меньше.

Полученные ранее данные по концентрациям ЭПГ в тагамитах Попигайского кратера, точно определенные как примесь метеоритного вещества, а не пород основного-ультраосновного состава, показывают их неоднородность: например, содержания Ir варьируют в пределах 0.08–1.56 ppb [16], 0.4–2.3 ppb [6] и ~0.06 ppb [17]. Анализ данных из [16] показал, что наибольшие концентрации Ir (1.49–1.55 ppb) зафиксированы в тагамитах, отобранных в западной и северо-западной части Попигайского кратера, в районе обнажения импактитов вдоль реки Рассоха. Образцы тагамитов из [6], показывающие наибольшее обогащение Ir, Ru, Rh, Pt и Pd относительно пород мишени, также были отобраны из крупного обнажения импактитов вдоль реки Рассохи, по-видимому, вблизи места отбора образцов из [16]. При этом наименьшие содержания Ir (0.08 ppb) в тагамитах из [16] идентифицированы в образцах восточной части кратера, вблизи мест отбора образцов зювитов 419/2 и 421, которые показывают наименьшие концентрации ЭПГ среди всех изученных нами образцов. Несмотря на то что концентрации Ir и ЭПГ в целом в изученных в настоящей работе зювитах ниже, чем таковые, определенные ранее для тагамитов, тенденция в уменьшении концентраций ЭПГ в образцах от западной, к южной и далее восточной части Попигайского кратера, подобная тагамитам, в зювитах также наблюдается. Приведенные данные свидетельствуют о неравномерном распределении примеси метеоритного вещества в импактных породах Попигайского кратера. Интересен тот факт, что наибольшие концентрации ЭПГ в импактитах обнаружены в образцах, отобранных в тех районах кратера, где в больших количествах обнаружены импактные алмазы: западная и северо-западная часть кратера, в том числе вдоль долины реки Рассохи (по [16]), и район месторождения Скаль-

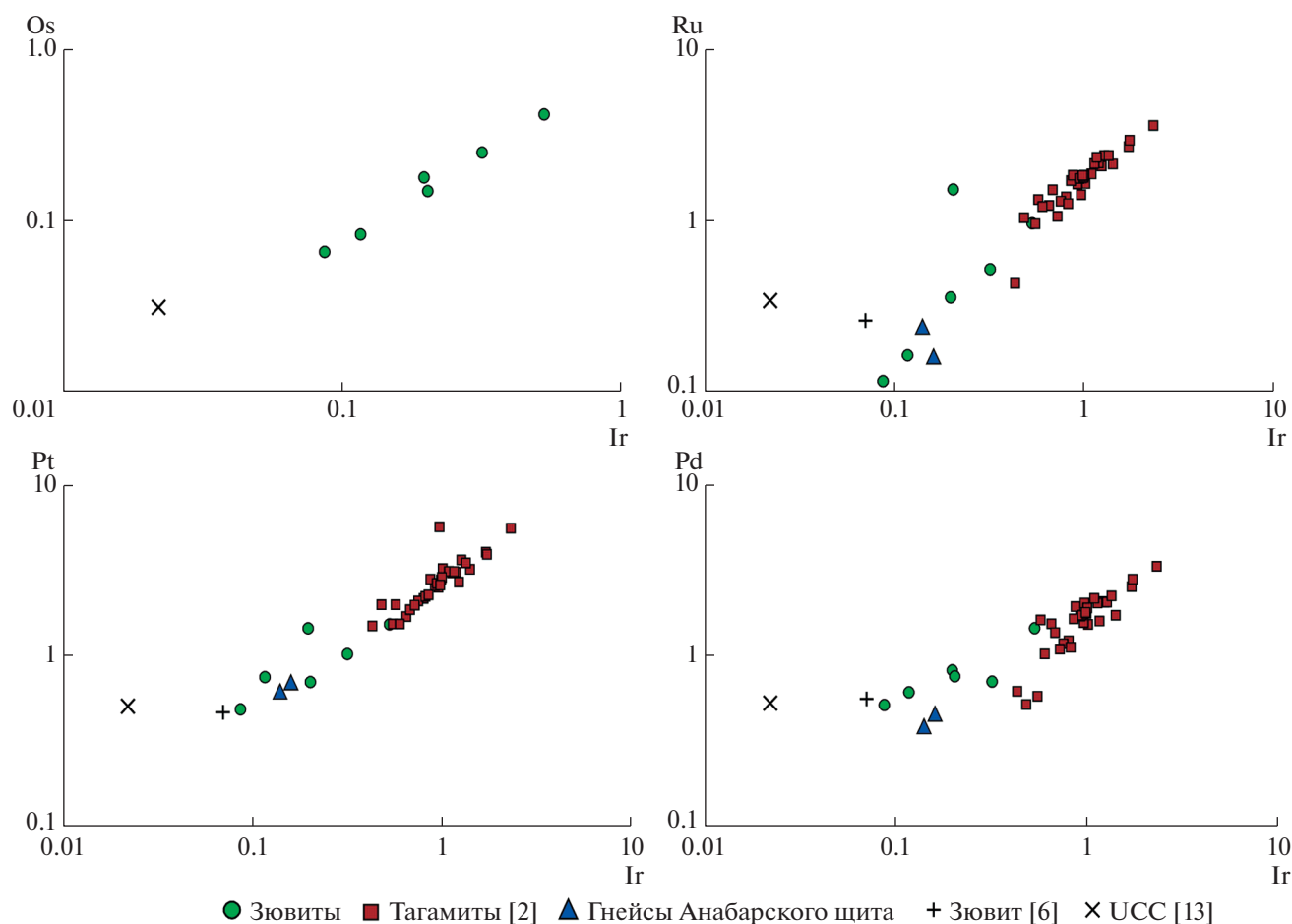


Рис. 7. Корреляции Os, Ru, Pt и Pd относительно Ir в зювитах Попигайского метеоритного кратера.

ное (по [1]). В восточной же части кратера, где импактиты содержат наименьшие концентрации ЭПГ, концентрации алмазов значительно меньше. Тем не менее этот факт, безусловно, в будущем должен быть подтвержден (или опровергнут) более масштабным изучением концентраций ЭПГ в импактитах, отобранных в районах кратера с разными как установленными содержаниями алмазов, так и с предварительно оцененными (по [1]).

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Министерства науки и высшего образования РФ (проект 075-15-2020-781).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Масайтис В.Л., Кириченко В.Т., Мащак М.С., Федорова И.Г. Коренные месторождения и россыпи импактных алмазов Попигайского района (Северная Сибирь) // Региональная геология и металлогения. 2013. № 54. С. 89–98.
2. Шукина Е.В., Афанасьев В.П., Лобов К.В., Малыгина Е.В., Похиленко Н.П. Новые данные о составе тагамитов Попигайской астроблемы // ДАН. 2017. Т. 473. № 2. С. 205–209.
3. Masaitis V.L. Popigai crater: origin and distribution of diamond-bearing impactites // Meteoritics and Planetary Science. 1998. V. 33. P. 349–359.
4. Вишневецкий С.А. Астроблемы, Новосибирск, ООО “Нонпарель”, 2007, 288 с.
5. Масайтис В.Л., Мащак М.С., Райхлин А.И., Селивановская Т.В., Шафрановский Г.И. Алмазоносные импактиты Попигайской астроблемы. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 1998. 179 с.
6. Tagle R., Claeys P. An ordinary chondrite impactor for the Popigai crater, Siberia // Geochimica and Cosmochimica Acta. 2005. V. 69 (15). P. 2877–2889.
7. Stöffler D., Hamann C., Metzler K. Shock metamorphism of planetary silicate rocks and sediments: proposal for an updated classification system // Meteorit. Planet. Sci. 2018. V. 53. P. 5–49.
8. Николаева И.В., Палесский С.В., Козьменко О.А., Аношин Г.Н. Определение редкоземельных и высокозарядных элементов в стандартных геологических образцах методом масс-спектрометрии с ин-

- дуктивно-связанной плазмой (ИСП-МС) // Геохимия. 2008. № 7. С. 1–6.
9. Козьменко О.А., Палесский С.В., Николаева И.В., Томас В.Г., Аношин Г.Н. Усовершенствование методики химической подготовки геологических образцов в трубках кариуса для определения элементов платиновой группы и рения // Аналитика и контроль. 2011. № 15. С. 378–384.
 10. Nekrylov N., Kamenetsky V.S., Savelyev D.P., Gorbach N.V., Kontonikas-Charos A., et al. Platinum-group elements in Late Quaternary high-Mg basalts of eastern Kamchatka: Evidence for minor cryptic sulfide fractionation in primitive arc magmas // Lithos. 2022. V. 412–413. 106608.
 11. Максименко Н.И., Шумилова Т.Г., Ковальчук Н.С. Петрологическая характеристика разновидностей зювитов Карской астроблемы (Пай-Хой, Россия) // Петрология. 2020. Т. 38. № 6. С. 628–649.
 12. McDonough W.S., Sun S.S. The Composition of the Earth // Chem. Geol. 1995. V. 120. P. 223–253.
 13. Rudnick R.L., Gao S. Composition of the continental crust. In: Holland, H.D., Turekian, K.K. (Eds.), Treatise on Geochemistry. Elsevier-Pergaman, Oxford, 2003. P. 1–64.
 14. Masaitis V.L. Impactites from Popigai crater // Geological Society of America Special Paper. 1994. V. 293. P. 153–162.
 15. Chu Z., Yan Y., Chen Z., Guo J., Yang Y., Li C., Zhang Y. A comprehensive method for precise determination of Re, Os, Ir, Ru, Pt, Pd concentrations and Os isotopic compositions in geological samples // Geostandarts and Geoanalytical Research. 2015. V. 39 (2). P. 151–169.
 16. Vishnevsky S., Montanari A. Popigai Impact Structure (Arctic Siberia, Russia): Geology, Petrology, Geochemistry, and Geochronology of Glass-Bearing Impactites. 1999 // Geol. Soc. Amer. Spec. Pap. 1999. V. 339. P. 19–59.
 17. Масайтис В.Л., Райхлин А.И. Попига́йский кратер образован ударом обыкновенного хондрита // Доклады Академии Наук СССР. 1986. Т. 286. № 6. С. 1476–1478.
 18. Розен О.М., Андреев В.П., Белов А.Н. и др. Архей Анабарского щита и проблемы ранней эволюции Земли. М.: Наука, 1988. 253 с.
 19. Рабкин М.И. Геология и петрология Анабарского кристаллического щита. М., 1959. 164 с.
 20. Лутц Б.Г. Магматизм подвижных поясов ранней Земли. М.: Наука, 1985. 215 с.

COMPOSITION AND PLATINUM GROUP ELEMENTS DISTRIBUTION OF THE SUEVITES OF THE POPIGAI ASTROBLEME

E. V. Agasheva^{a, #}, O. A. Kozmenko^a, E. V. Malygina^a,
V. P. Afanasiev^a, and Academician of the RAS N. P. Pokhilenko^a

^aV.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Novosibirsk, Russian Federation

[#]E-mail: shchukinalena@igm.nsc.ru

The paper presents data on the concentrations of major and trace elements, including platinum group elements (PGE) and Re, in suevite samples collected in different parts of the Popigai meteorite crater. The studied suevites show the identity of the bulk composition; gneisses of the Anabar Shield are identified as the protolith. It has been found that the total concentrations of PGE in suevites are not uniform: they consistently decrease in samples from the western, to the southern, and further to the eastern part of the crater. The results of the study showed that the enrichment of PGE suevites is a sign of meteoritic contamination and is not associated with either crustal or mantle rocks of basic and ultrabasic composition.

Keywords: impactites, platinum group elements, impact diamonds, suevite, tagamite