

**ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОВКЛЮЧЕНИЙ МЕТАЛЛОВ И МИНЕРАЛОВ В ГОРНЫХ ПОРОДАХ: ПРОБЛЕМЫ ИНТЕРПРЕТАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ ПРИ ИЗУЧЕНИИ МАГМАТОГЕННЫХ СИСТЕМ КАМЧАТКИ И СТАНОВОЙ СКЛАДЧАТОЙ ОБЛАСТИ**

*В.О. Крутикова, Н.В. Бердников, П.К. Кебезинская*

*ФГБУН Институт тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН, Ким Ю Чена 65, г. Хабаровск, 680000;  
e-mail: nick@itig.as.khb.ru*

Поступила в редакцию 21 июля 2023 г.

В статье обсуждаются проблемы интерпретации результатов исследований микровключений металлов и минералов методом сканирующей электронной микроскопии с рентгеновским микроанализом с энергодисперсионным детектированием, связанные с влиянием материала матрицы. Показано, что метод хорошо работает в исследовании «относительно крупных» (5–10 мкм) микровключений с целью их фазовой идентификации и полуколичественного определения состава с нормированием на 100%. Обсуждаются возможности «очистки» результатов анализа от «добавок», привнесенных элементами матрицы, а также критерии оценки расстояния от границ микрообъекта, на котором влияние матрицы становится минимальным. Использование результатов, полученных с применением данных подходов, иллюстрируется примерами изучения петрологии и металлогении изверженных горных пород Камчатки и Становой складчатой области, в процессе которого получены новые данные о петрологических процессах в мантийно-коровом субстрате под активной вулканической дугой и об особенностях эволюции рудно-магматической системы под древней активной континентальной окраиной.

**Ключевые слова:** микроминералы, микровключения сплавов, сканирующая электронная микроскопия, энергодисперсионный рентгеновский микроанализ, микрометаллогения, Камчатка, Становая область.

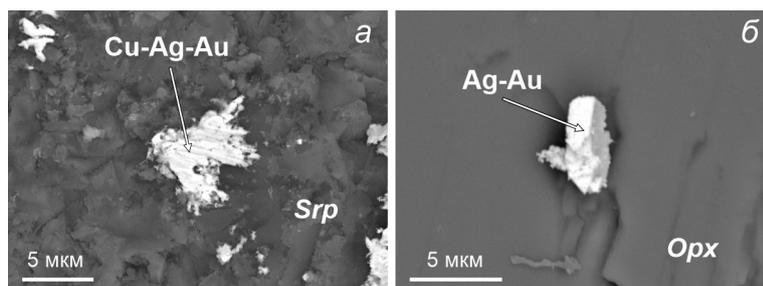
**ВВЕДЕНИЕ**

Микровключения (микроминералы, микросферы, частички самородных металлов и их сплавов размером от долей до первых десятков микрон) несут ценную информацию об условиях образования горных пород и об их металлогеническом потенциале [18, 19, 21, 28]. Для изучения таких микрообъектов широко используются методы сканирующей электронной микроскопии с рентгеновским микроанализом с волновым (СЭМ-ВДА) и энергодисперсионным (СЭМ-ЭДА) детектированием [22]. При этом СЭМ-ЭДА наиболее эффективен для быстрого поиска и идентификации микрофаз с полуколичественной оценкой состава, а СЭМ-ВДА – для детального количественного анализа их состава.

Одной из основных трудностей в определении состава микрообъектов в обоих вариантах метода является необходимость учета влияния на результаты анализа вмещающего минерала – матрицы. Эффек-

тивный размер области возбуждения рентгеновского излучения в твердых объектах определяется атомным номером исследуемого материала, диаметром и энергией первичного пучка электронов [37] и при рабочем ускоряющем напряжении 20 кВ составляет несколько микрон, что сопоставимо с размерами интересующих нас микрообъектов. В результате в область возбуждения обычно попадает материал матрицы, излучение элементов которой добавляется к излучению элементов микрообъекта, формируя комбинированный спектр. Исключение из результатов анализа элементов матрицы и нормировка к 100% не всегда могут быть корректными, так как в состав микровключения может входить элемент, содержащийся в матрице.

Эффективный способ оценки влияния матричных элементов на состав тонкодисперсных включений, размер которых сопоставим с размером области генерации рентгеновского излучения (1–2 мкм),



**Рис. 1.** Искусственное микровключение сплава Cu-Ag-Au на шлифовке перидотита Тарагайского массива (а); природное микровключение сплава Ag-Au в ортопироксене ультраосновной породы массива Ильдеус (б).

Орх – ортопироксен, Srp – серпентин. Здесь и далее названия минералов в соответствии с [59].

рассмотрен в работах [26, 35] на примере анализа искусственных микровключений золота в сульфидной матрице. На основе результатов анализа микровключений и окружающей их матрицы из уравнения линейной регрессии выводятся зависимости («тренды содержаний») концентраций элементов в микровключении от их содержаний в матрице. Тренды содержаний экстраполируются в область, где содержание матричного элемента стремится к нулю, и рассчитываются действительные содержания основных компонентов микровключений. Для корректного построения трендов содержания матрица, окружающая микровключение, должна быть однородной, а анализируемая поверхность микровключения находится на одном уровне с матрицей. Метод представляет весьма эффективным, в том числе для количественного определения состава «ультрамелких» (порядка 1 мкм) микровключений.

В статье рассматриваются подходы к оценке влияния состава матрицы на результаты СЭМ-ЭДА анализа, как правило, «относительно крупных» (5–10 мкм) микровключений с целью их фазовой идентификации и полуколичественного определения их состава с нормированием на 100 %. Обсуждаются возможности «очистки» результатов анализа от «добавок», привнесенных элементами матрицы, а также критерии оценки расстояния от границ микрообъекта, на котором влияние матрицы становится минимальным. Приводятся примеры использования результатов, полученных с применением данного подхода, при изучении петрологии и металлогении изверженных горных пород.

#### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Оценка влияния матричных элементов на результаты СЭМ-ЭДА анализа демонстрируется на примере представителей групп «рудных» микрообъектов, наиболее часто встречающихся при СЭМ-

ЭДА исследованиях горных пород. Это благородные металлы и их сплавы, другие металлы и их сплавы, а также микроминералы оксидов, галогенидов и сульфидов. Препараты для исследования готовились на основе горных пород (перидотит Тарагайского массива, Буреинский террейн [7]) и материалов искусственного (металлы, сплавы) и природного (минералы) происхождения известного состава. При соприкосновении шлифованной поверхности породы с металлом или минералом на ней формируются группы микрообъектов, среди которых можно выбрать микрочастицы, сходные по размерам с природными микровключениями. Такие искусственные микровключения, как правило, имеют шестоватые, хлопьеобразные очертания и сопровождаются россыпью включений того же состава (рис. 1, а), в то время как природные микровключения большей частью единичные, выглядят как компактные зерна с элементами огранки и фигурами роста на поверхности и часто приурочены к микрокавернам и трещинам (рис. 1, б).

Для исследования состава микрообъектов использовался электронный сканирующий микроскоп VEGA 3 LMN (TESCAN, Чехия) с энергодисперсионным спектрометром X-Max 80 (Oxford, Великобритания). Ускоряющее напряжение 20 кВ, ток пучка 530 пА, диаметр пучка 0.2 мкм. Для ежедневной калибровки применялся Co-standard Oxford Instruments/143100 no. 9864-15, в качестве стандартов состава – встроенная в ПО Aztec база данных о стандартах для всех элементов.

#### МИКРОВКЛЮЧЕНИЯ БЛАГОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ И ИХ СПЛАВОВ

Наиболее простой случай анализа микровключений химически чистых платины и платиноидов в силикатной матрице рассмотрен ранее в [5]. На примере искусственных включений этих металлов в

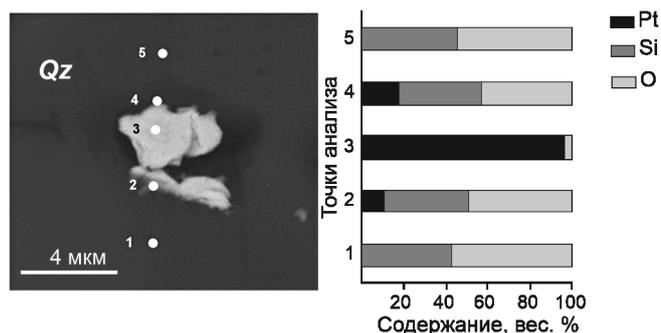


Рис. 2. СЭМ-ЭДА профиль через искусственное микровключение платины в кварце, по [5], с изменениями.

кварце экспериментально показано, что диаметр области генерации аналитического излучения в микровключениях благородных металлов составляет не более 2–4 мкм, а матрица не оказывает существенного влияния на результаты их анализа уже на расстоянии 1–2 мкм от края зерна (рис. 2).

Сходная ситуация наблюдается при анализе искусственного микровключения Ag-Au в матрице горной породы (рис. 3 а, б). Из рисунка видно, что

элементы матрицы Si и Mg, отсутствующие в составе использованного сплава и сформированного с его помощью микровключения, начинают проявляться в результатах его СЭМ-ЭДА анализа слева с точки 5 и справа с точки 16, которые отстоят от края микровключения на расстояние менее 1 мкм. В этих же точках резко снижается содержание железа и кислорода, обильных в матрице, а концентрация адсорбированного углерода по всему профилю остается практически неизменной, что объясняется его отсутствием в составе как микровключения, так и матрицы, а также примерно одинаковым уровнем адсорбции углерода этими веществами.

Таким образом, на примере микровключения сплава Ag-Au подтверждается вывод о корректности СЭМ-ЭДА анализа микровключений благородных металлов уже на расстоянии первых микрон от края [5], что соответствует представлениям об обратной зависимости размера области возбуждения аналитического рентгеновского излучения от атомного веса анализируемого вещества [22].

Анализ микроминерала в благороднометаллической матрице выполнен нами при изучении микросферул в

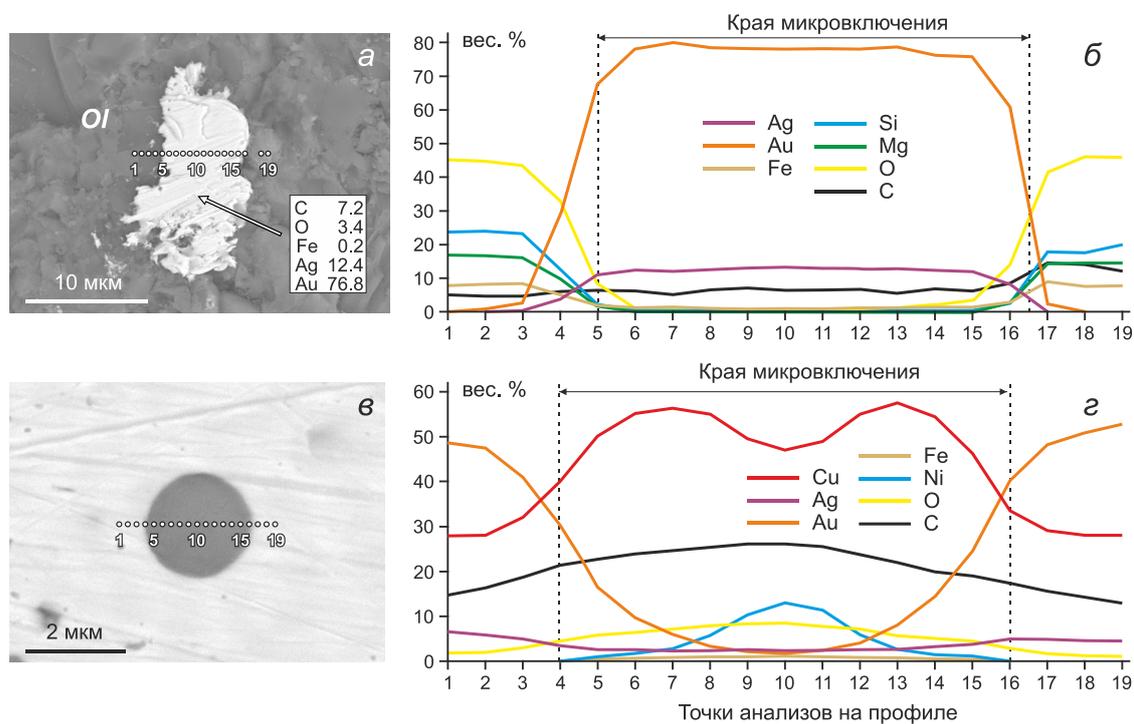
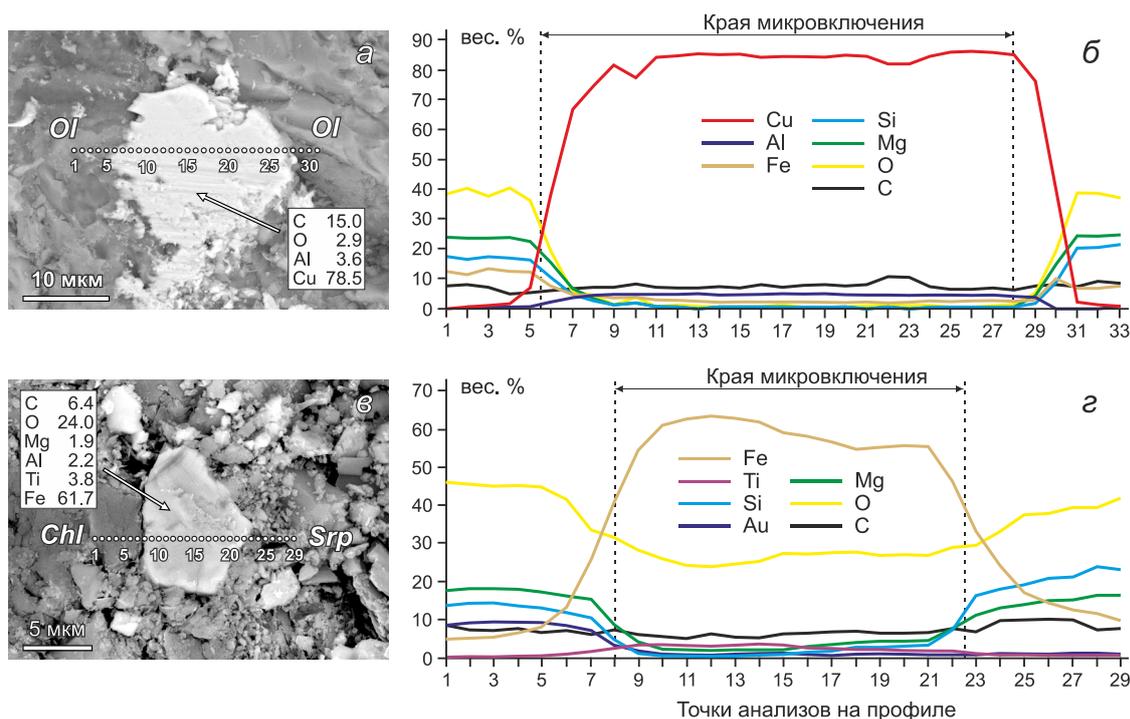


Рис. 3. СЭМ-ЭДА профили через искусственное микровключение Ag-Au в перидотите Тарагайского массива (а, б, расстояние между точками анализа 0.5 мкм) и через медно-оксидное микровключение в микросфере Cu-Ag-Au из взрывной брекчии Костеньгинского месторождения [6] (в, з, расстояние между точками анализа 0.2 мкм).

а, в – микрофото с положением точек анализа на профиле; б, з – результаты анализа в точках профиля. Ol – оливин. Здесь и далее в табличках приведен результат СЭМ-ЭДА анализа (вес. %, нормирован на 100 %) материала, использованного для формирования искусственных микровключений.



**Рис. 4.** СЭМ-ЭДА профили через искусственное микровключение меди (*а, б*, расстояние между точками анализа 1.0 мкм) и магнетита (*в, з*, расстояние между точками анализа 0.5 мкм) в перидотите Тарагайского массива.

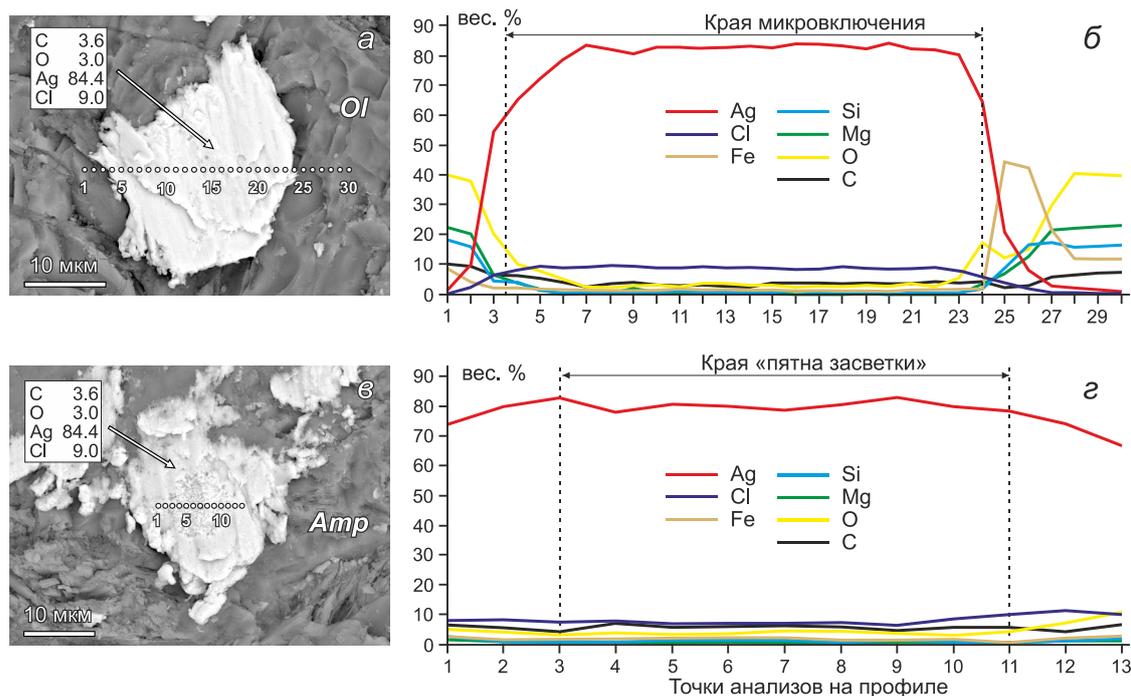
*а, в* – микрофото с положением точек профиля, *б, з* – результаты анализа в точках профиля). Ol – оливин, Chl – хлорит, Srp – серпентин.

эксплозивных брекчиях Костеньгинского месторождения (рис. 3, *в, з*). Как показано в [30], микроминерал здесь представлен купритом с примесью Ni и Fe, его сферическая форма обусловлена ликвационными процессами при окислении Cu-Ag-Au сплава и экстремально быстром остывании микросферулы. Из рис. 3, *з* видно, что максимально достоверные результаты анализа такого относительно мелкого (порядка 2 мкм в диаметре) включения могут быть получены только при СЭМ-ЭДА анализе его центральной части, где влияние состава матрицы минимально, на что указывают наиболее низкие содержания Ag и Au. Анализ этого микровключения осложняется неравномерным распределением в нем меди и никеля: в центре содержание меди снижается, а никеля увеличивается. Возможно, это является следствием ликвации более высокого порядка, характерной для таких включений в Cu-Ag-Au микросферулах [30]. Содержания кислорода (компонент куприта, оксидов железа и никеля), железа и никеля (компоненты включения, отсутствующие в матрице) закономерно возрастают к центру включения. Концентрация углерода также достигает максимума в результатах анализа центральных областей микровключения, что может быть связано как с его входением в состав микровключения, так и с

повышенной интенсивностью его адсорбции материалом последнего.

#### МИКРОВКЛЮЧЕНИЯ ДРУГИХ МЕТАЛЛОВ И ИХ СПЛАВОВ, ОКСИДОВ, ГАЛОГЕНИДОВ И СУЛЬФИДОВ

Профили анализов включений окисляющихся металлов (рис. 4 *а, б*) принципиально не отличаются от профилей включений благородных металлов (рис. 3, *а, б*). Но здесь нужно внимательно следить за вариациями содержания кислорода: если оно резко снижается в анализах материала включения (рис. 3, *б*, 4, *б*), то, вероятнее всего, включение представлено самородным металлом или сплавом; если же содержание кислорода в материале включения достаточно высокое, то возможно, что микровключение представлено оксидом, в составе которого кислород самого включения «дополняется» кислородом матрицы, как это происходит в случае микровключения магнетита (рис. 4, *в, з*). Профили содержания анализируемых элементов на рис. 4, *б, з* имеют «плато» стабильных содержаний основных элементов, в пределах которого можно получить результаты анализа с минимальной матричной «добавкой». Как видно из профиля рис. 4, *б*, «плато» содержаний начинается в точке анализа 28, непосредственно на краю микровключения и все анализы левее этой точки будут максимально



**Рис. 5.** СЭМ-ЭДА профили через искусственное микровключение AgCl (*а, б*) в перидотите Тарагайского массива и через микровключение того же состава (*в, г*) после экспозиции его центральной части под электронным пучком в течение 400 с.

*а, в* – микрофото с положением точек профиля, *б, г* – результаты анализа в точках профиля. Расстояние между точками анализа 1.0 мкм. Ol – оливин, Amp – амфибол.

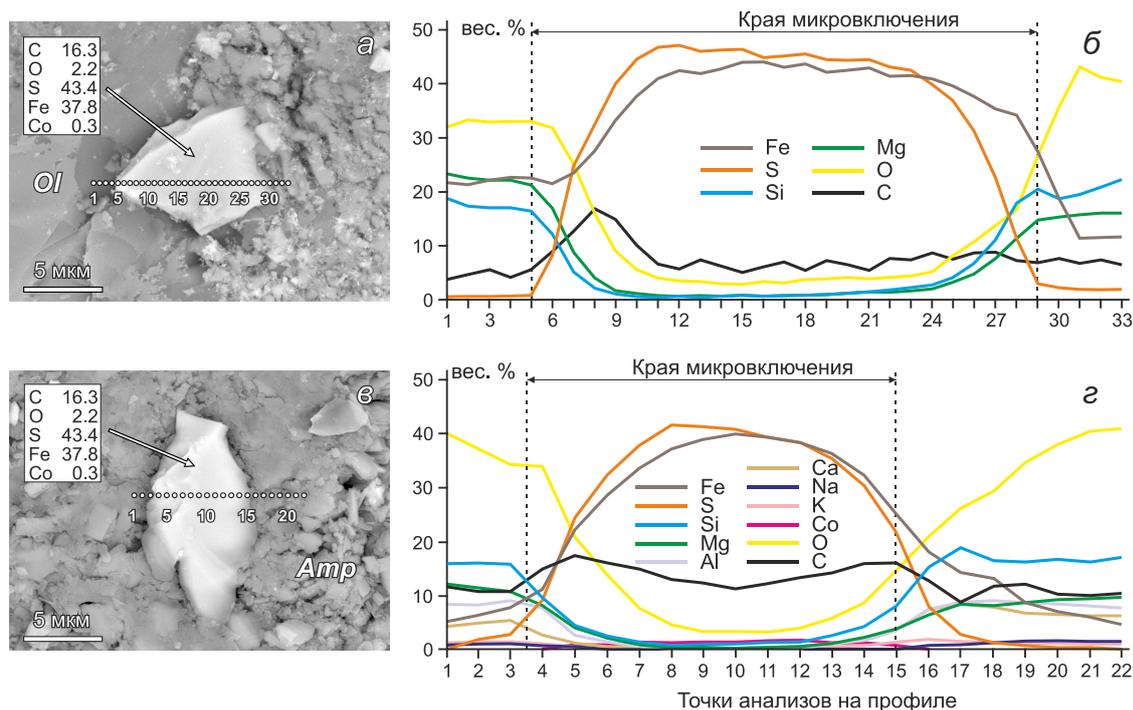
«безматричными». В то же время другой край микровключения располагается значительно левее края «плато», что, вероятнее всего, является следствием уменьшенной толщины этого края микровключения. Эти наблюдения говорят о том, что на практике следует с осторожностью использовать правило «максимально свободный от влияния матрицы анализ можно получить на расстоянии от края микровключения, сопоставимом с полу диаметром области возбуждения», т.к. в случае малой толщины микровключения на результат анализа будет влиять подстилающая его матрица. В случае рис. 4 *а, б* максимально свободные от влияния матрицы результаты анализа состава микровключения могут быть получены только правее точки 11. Таким образом, при оценке состава микровключений целесообразно по нескольким точкам анализа выявить область с наименьшим влиянием матрицы.

Типичными микровключениями рудных минералов в горных породах являются хлораргирит и пирит. Результаты СЭМ-ЭДА исследований их искусственных микровключений приведены на рис. 5 и 6.

Результаты наших СЭМ-ЭДА анализов как природных, так и искусственных микровключений AgCl всегда обнаруживают нестехиометричность этого

соединения. В отличие от стехиометричного отношения  $Ag/Cl = 3.05$  (75.26 вес. % Ag и 24.74 вес. % Cl) СЭМ-ЭДА определения их состава показывают существенное обогащение серебром с  $Ag/Cl = 7.66-11.25$ . В [16] показано, что такое обогащение происходит за счет фоторазложения хлораргирита после вскрытия образца. По данным [55], фоторазложение сопровождается удалением хлора и образованием на поверхности AgCl наночастиц серебра, которые, обладая хорошей отражательной способностью, эффективно «экранируют» основную массу хлорида от последующего фотовосстановления. Это касается и экспозиции микровключений AgCl под пучком СЭМ-электронов. Как видно из рис. 5, *б, в*, экспозиция в течение 400 с под пучком СЭМ-электронов в режиме ЭДА хотя и привела к изменению рельефа поверхности микровключения, существенно не отразилась на результатах его анализа.

Микровключения пирита также весьма часто встречаются при СЭМ-исследованиях горных пород. В его составе присутствует сера, содержание которой в составе матрицы обычно стремится к нулю, поэтому можно считать, что вся сера в результатах анализов таких микровключений принадлежит исключительно



**Рис. 6.** СЭМ-ЭДА профиль через «крупное» (а, б) и «мелкое» (в, г) искусственные микровключения пирита в перидотите Тарагайского массива.

а, в – микрофото с положением точек профиля, б, г – результаты анализа в точках профиля. Расстояние между точками анализа 1 мкм. ОI – оливин, Amp – амфибол.

им. Второй основной компонент пирита – железо – входит в состав большинства породообразующих минералов, являющихся матрицей для микровключений. В этом случае представляется возможным скорректировать результаты СЭМ-ЭДА анализов железосодержащих микровключений путем учета влияния матрицы.

В результатах СЭМ-ЭДА анализа искусственного микровключения пирита (рис. 6, а, б) отношение содержаний Fe/S составляет 1.00, в то время как в исходном пирите оно равно 0.87 (табл.), что, по-видимому, обусловлено добавлением в результат анализа микровключения железа, «наведенного» из матрицы.

Для расчета количества «наведенного» Fe оцениваем «коэффициент наведения» (Кн), который отражает степень захвата областью возбуждения рентгеновского излучения материала матрицы. Делаем это по элементам, заведомо отсутствующим во включении – Mg и Si (Al и Ca на пределе обнаружения, их не используем).  $K_{n_{Mg}} = Mg_{вкл} / Mg_{матр} = 0.22$ , а  $K_{n_{Si}} = Si_{вкл} / Si_{матр} = 0.19$  – близки, что говорит о примерно одинаковом «уровне наведения» этих элементов. Это подтверждается сходными значениями отношений содержаний этих элементов в матрице и во включении:  $Mg / Si_{матр} = 1.12$ ,  $Mg / Si_{вкл} = 1.28$ . Учитывая вычисленный

таким образом  $K_{n_{Si}} = 0.21$  (среднее между 0.19 и 0.22), определяем количество Fe, «наведенного» из матрицы:  $21.16 \times 0.21 = 4.44$ . Таким образом, реальное содержание Fe в микровключении будет  $29.51 - 4.44 = 25.07$ . Определяем количество «наведенного» кислорода:  $30.23 \times 0.21 = 6.35$ . Тогда реальное содержание кислорода в анализе включения будет  $17.51 - 6.35 = 11.16$ . Сера вся принадлежит микровключению, поэтому, нормируя на сумму элементов (Co исключаем, т.к. его в анализе микровключения нет), можем рассчитать состав пирита во включении (табл.). Отметим значительно более близкое значение отношения Fe/S в пересчитанном составе микровключения к этому отношению в «исходном» пирите, что говорит в пользу правомерности такого подхода к коррекции результата СЭМ-ЭДА анализа изученного микровключения.

Углерод в наших построениях не рассматривается, т.к. его концентрация при СЭМ-ЭДА анализе существенно зависит от различной интенсивности адсорбции «аппаратного» углерода на различных минералах. Так, по данным [22], «аппаратная добавка» углерода при анализе пирита достигает 13.68 вес. %.

Принципиально справедливость приведенных выше расчетов не должна зависеть от величины микровключений, однако наши эксперименты показы-

**Таблица. Результаты СЭМ-ЭДА анализа (вес.%) пирита, использованного для создания микровключения, и искусственного микровключения пирита в перидотите Тарагайского массива.**

Элемент	Состав исходного пирита по СЭМ-ЭДА анализу	Состав микровключения по СЭМ-ЭДА анализу	Состав матрицы по СЭМ-ЭДА анализу	Состав микровключения после пересчета
C	16.31	14.63	7.86	18.22
O	2.19	17.51	30.23	13.90
Mg	0.00	4.72	21.46	0.00
Al	0.00	0.36	0.13	0.00
Si	0.00	3.70	19.17	0.00
S	43.42	29.45	0.00	36.67
Ca	0.00	0.12	0.00	0.00
Fe	37.83	29.51	21.16	31.22
Co	0.25	0.00	0.00	0.0
Fe/S	0.87	1.00		0.85
$K_{Mg}$		0.22		
$K_{Si}$		0.19		
Mg/Si		1.12	1.28	
$Fe_{нав}$		4.44		
$Fe_{реал}$		25.49		
$O_{нав}$		6.65		
$O_{реал}$		10.86		

*Примечание.*  $K_{Mg}$  и  $K_{Si}$  – «коэффициенты наведения» Mg и Si, соответственно.  $Fe_{нав}$ ,  $Fe_{реал}$ ,  $O_{нав}$  и  $O_{реал}$  – «наведенные» и реальные концентрации железа и кислорода в СЭМ-ЭДА анализе искусственного микровключения пирита.

вают, что с уменьшением их размеров неопределенности в расчетах возрастают. Это, в первую очередь, выражается в увеличении разницы между отношениями концентраций компонентов в модельном составе минерала и их отношениями в пересчитанном СЭМ-ЭДА анализе синтезированного на основе этого минерала микровключения. Поэтому место точки анализа целесообразно выбирать ближе к центру микровключения, где результаты анализов выходят на «плато» концентраций (рис. 6, б), что реализуется в относительно «крупных» (> 5–10 мкм) микровключениях, в то время как относительно «мелкие» (< 5 мкм) микровключения практически целиком состоят из «краев», в результатах анализа которых сильно влияние матрицы (рис. 6, г).

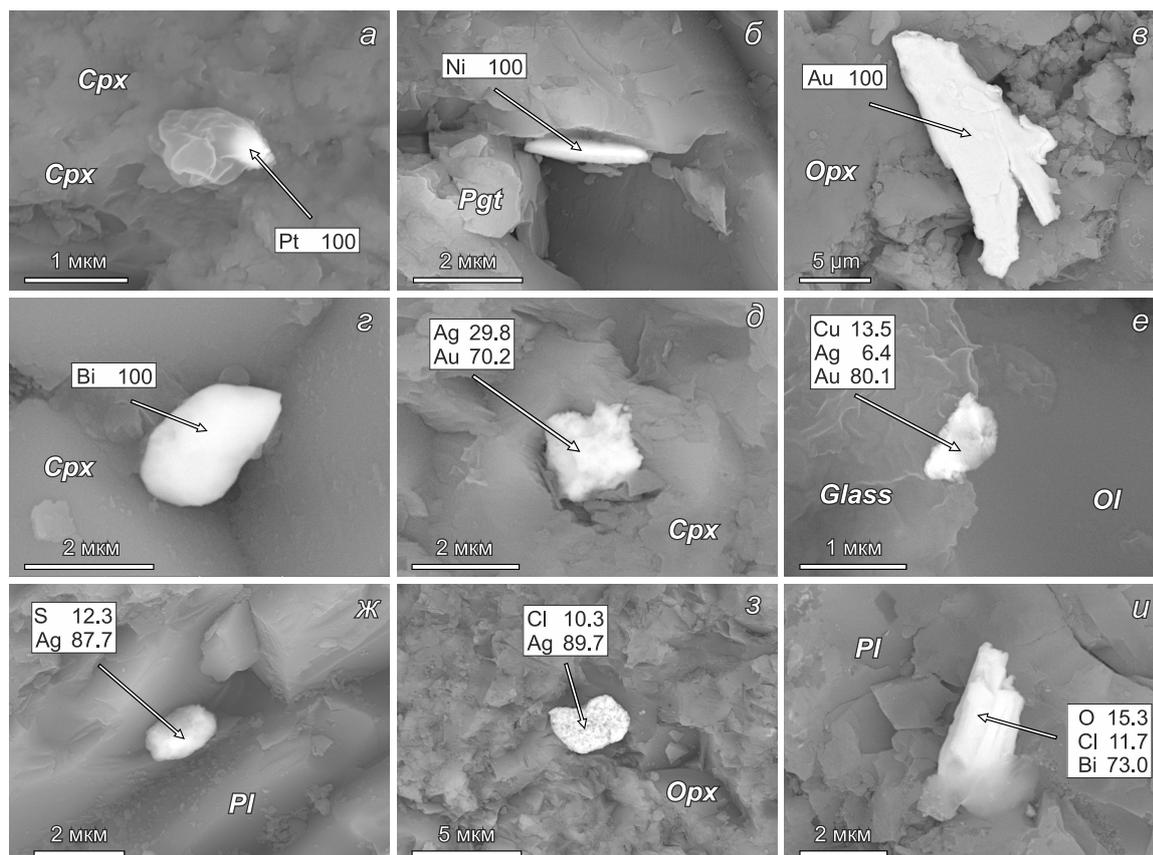
#### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СЭМ-ЭДА ИССЛЕДОВАНИЙ МИКРОВКЛЮЧЕНИЙ ПРИ ИЗУЧЕНИИ ПЕТРОЛОГИИ И МЕТАЛЛОГЕНИИ ИЗВЕРЖЕННЫХ ГОРНЫХ ПОРОД

СЭМ-ЭДА исследования микро-включений металлов и минералов с учетом изложенных выше подходов использованы нами для выявления новых пе-

трологических и металлогенических характеристик ассоциации мантийных перидотитовых ксенолитов и вмещающей их анкарамитовой лавы современного Авачинского вулкана на Камчатке, по сути, отражающей петрологические процессы в мантийно-коровом субстрате под активной вулканической дугой [20, 44], а также пород зонального массива Ильдеус в Становой складчатой области, который является представителем долгоживущей (триас–ранний мел) рудно-магматической системы под древней активной континентальной окраиной [16, 45].

Ультраосновные ксенолиты, содержащиеся в анкарамитах и андезидацитовых пирокластике Авачинского вулкана, представлены шпинелевыми гарцбургитами и дунитами с жилами ортопироксенитового, клинопироксенитового и вебстеритового (часто с высокоглиноземистым амфиболом) состава и являются отторженцами вещества слабо окисленного мантийного клина ( $T = 887–1043$  °C;  $P = 27.4–30.5$  кбар;  $\Delta QFM =$  от -1 до +1) под южной Камчаткой [41, 44]. В мантийных ксенолитах Авачинского вулкана диагностированы микровключения самородных платины, железа (в том числе хромистого), золота, меди, медистого серебра, висмута, свинца, цинка; сплавов W-Fe-Mn, Ag-Au, Cu-Ag, Cu-Ag-Au, Ni-Cu-Ag-Au, Cu-Sn и Sn-Cu-Au [44]. В ассоциации с ними зафиксированы многочисленные включения сульфидов, представленные пентландитом, пирротинном, галенитом, акантином, нестехиометрическими сульфидами меди, серебра, сурьмы, висмута и свинца, а также хлоридом серебра с примесями меди и платины [43, 44]. Присутствие самородных металлов и сплавов в Авачинских ксенолитах хорошо согласуется с пониженной фугитивностью кислорода ( $\Delta QFM =$  от -1 до +1), оцененной по минеральным оксибарометрам [41], а также с широким развитием в минералах перидотитовых ксенолитов флюидных включений, богатых метаном и другими углеводородами [29].

Анкарамиты Авачинского вулкана представляют собой оливин-клинопироксенпорфировые вулканы с широкими вариациями модальных содержаний вкрапленников оливина и клинопироксена, которые выражаются в колебаниях содержания MgO в валовых анализах от 10 до 20 вес. %. Основная масса анкарамитов сложена дифференцированным стеклом базальт-андезитового состава с обильными микролитами плагиоклаза, пижонита и, в существенно меньшей степени, ортопироксена и амфибола. Ассоциация микровключений в Авачинских анкарамитах включает в себя самородные платину, никель, золото, свинец (в том числе с примесью сурьмы), висмут, сплавы Cu-Ag-Au, Zn-Cu, Sn-Cu, а также



**Рис. 7.** BSE фото микровключений халькофильных и сидерофильных металлов и их минералов в породобразующих минералах и стеклах из анкарамитов Авачинского вулкана.

*a* – включение самородной платины в клинопироксене, *б* – идиоморфное включение самородного никеля в пижоните основной массы, *в* – идиоморфное включение самородного золота в ортопироксене, *г* – гипидиоморфное выделение самородного висмута в интерстиции между микролитами клинопироксена, *д* – идиоморфное включение золото-серебряного сплава в клинопироксене, *е* – идиоморфное выделение сплава Cu-Ag-Au на контакте остаточного андезитового стекла и микрофенокристалла оливины, *ж* – гипидиоморфное включение акантита в плагиоклазе, *з* – включение хлорида серебра в ортопироксене, *и* – идиоморфное включение окси(гидрокси)хлорида висмута в плагиоклазе. Cpx – клинопироксен, Orx – ортопироксен, Pgt – пижонит, Pl – плагиоклаз, Glass – остаточное андезитовое стекло.

Cl-F-апатит, барит, торит, (Ce, La, Nd)-алланит, (Ce, La, Nd)-монацит, сульфиды Ag, Cu-Ag, Zn-Cu-Sb-Pb, хлориды серебра и окси(гидрокси)хлориды висмута (рис. 7). Особый интерес представляет идиоморфное выделение сплава Cu-Ag-Au, расположенное на границе остаточного Fe-Mg-базальтового стекла и микрофенокристалла оливины (рис. 7, *e*). Идиоморфный облик золотосодержащей частицы и отсутствие каких-либо следов ее химического растворения и переотложения во вмещающем стекле свидетельствует в пользу кристаллизации сплава Cu-Ag-Au в процессе дифференциации анкарамитового расплава под Авачинским вулканом и фракционирования высокотемпературной (~1100 °C) ассоциации вкрапленников оливин+клинопироксен+шпинель [20]. Это подтверждает существующие представления о магматическом происхождении самородного золота в изверженных

породах зон субдукции и коллизии [30] и о некогерентном поведении золота (накоплении в остаточных расплавах/стеклах и предпочтительном распределении в сосуществующую с расплавом флюидную фазу) при дифференциации флюидонасыщенных силикатных расплавов [17, 31, 58].

Выделение самостоятельных минеральных фаз халькофильных (Cu, Zn, Pb, Sb, Bi, Ag) и сидерофильных (Au, Pt, Fe, W) элементов в перидотитовых ксенолитах и анкарамитовых лавах Авачинского вулкана свидетельствует об обогащении расплавов и высокотемпературных флюидов в системе кора-мантия под южной Камчаткой рудными металлами, в частности, платиноидами и золотом. Широкое распространение золотосодержащих микровключений в этих породах коррелируется с результатами их валовых анализов на этот металл. Так, среднее содержание зо-

лота в островодужном мантийном клине под Камчаткой (4.9 ppb; [43]) почти в пять раз превышает таковое в океанической и субконтинентальной литосферной мантии (0.5–1 ppb, [52]), а содержания золота в анкарамитах Авачинского вулкана вообще достигают рудных значений порядка 4 г/т (рис. 8).

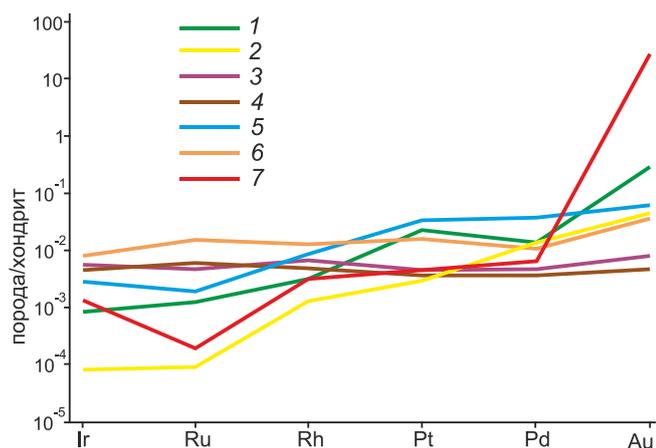
Аналогичное обогащение золотом в целом свойственно кайнозойским вулканическим породам Курило-Камчатской провинции [2], а также фиксируется в базальтах дуги Тонга [49] и современных островодужных лавах Центральной Америки, Индонезии и Японии [32, 53, 57]. Присутствие в перидотитовых ксенолитах и анкарамитах Авачинского вулкана микровключений сульфидов разнообразных металлов и хлоридов серебра, сурьмы, висмута и свинца указывает, по нашему мнению, на повышенные концентрации и высокую в целом активность серы и хлора в системе кора-мантия под южной Камчаткой, что в принципе весьма характерно для современных вулканических дуг, где основным источником этих элементов являются поровые воды субдуцирующих осадков, сульфиды и галиды метаморфизованных базитов погружающейся океанической плиты [24, 33]. Именно высокая активность серы и хлора в процессах островодужного петро- и рудогенеза обеспечивает высокую мобильность (за счет образования устойчивых комплексов с серой и хлором [25, 51]) халькофильных и сидерофильных металлов в обводненных субдукционных расплавах и флюидах [39, 40] и, в конечном счете, их вынос в верхние горизонты земной коры с образованием порфирировых и эпitherмальных месторождений цветных и благородных металлов [23, 60, 61].

Ильдеусский плутонический комплекс, расположенный в центральной части Станового мобильного пояса, сложен разнообразными ультраосновными (дуниты, лерцолиты, гарцбургиты, серпентиниты, вебстериты, верлиты) и основными (нориты, габбро, габброанортозиты) породами, интродуцированными дайками клинопироксенитов и вебстеритов, а также гранитоидами адакитовой ассоциации [16, 45]. С пироксенитами часто ассоциируются мощные (до 50–60 м) зоны ультраосновного (серпентин+хлорит+талк+карбонаты) метасоматоза, в то время как адакитовые дайки пространственно связаны с существенно кварцевыми с биотитом, мусковитом, серицитом, хлоритом, кальцитом, барийсодержащим калиевым полевым шпатом, альбитом метасоматитами, часто вмещающими кварцевые ( $\pm$  кальцит, адуляр) жилы с варьирующими от 0 до 10 % содержаниями пирротина, пирита, галенита, сфалерита, теннантит-тетраэдрита. Интрузивные породы в целом следуют известково-щелочному тренду дифференциации и характеризуются отрицательными аномалиями высокозарядных

элементов на нормированных к примитивной мантии графиках, являясь по сути ультрамафитовыми кумулятами примитивной островодужной магмы [45].

На основании геологических, петрографических, петролого-геохимических характеристик и результатов изучения взаимоотношений между микровключениями и вмещающими их минералами породных ассоциаций разного состава и возраста показано, что Ильдеусский массив является частью глубинной рудно-магматической системы, формирование которой прошло в три этапа [16, 45]. Первый раннемагматический этап характеризуется присутствием микровключений самородных W, Pt, Zn, Bi, Pb, Au; сплавов Fe-W, Ti-Co-W, Fe-Cu-Ni-Rh-Pd-Pt, Sn-Zn-Cu, Cu-Ag-Au (иногда с примесями Zn и Ni); сульфидов Cu-Ag и Fe-Ni-Co-Zn в ассоциации с кобальтистым пентландитом, пирротинном, халькопиритом, борнитом, хлоридами Ag и Pb-Sn, а также иодаргиритом и баритом (табл. 6 в [45]). Позднемагматический этап минерализации тесно связан с накоплением воды в остаточном расплаве и кристаллизацией интеркумуляусного амфибола и плагиоклаза. На этом этапе среди микровключений доминируют сплавы медистого серебра, системы Ni-Ag-Zn-Cu-Au. Микровключения Cu-Sn и Pb-Sb ассоциируют с микрочастицами самородного золота, сложных сульфидов Co-Ni-Zn и Cu-Ag-Pb, акантита, никелистого галенита, сфалерита (часто с примесями кобальта и никеля), пентландита, пирротина, миллерита, борнита и барита. Наконец, заключительный гидротермально-метасоматический этап развития системы маркируется образованием микровключений самородных Ag, Zn, Ni, Au, сплавов Cu-Ag-Au, Ag-Au, Cu-Ag, Cu-Zn, сложных сульфидов Cu-Ag, Fe-Cu-Zn-Pb и Ni-Zn-Fe-Cu, а также сульфосолей (As, Se, Sb) меди, серебра, железа, свинца. Часто в породах этого этапа встречаются хлориды серебра, меди, сурьмы, свинца и висмута в ассоциации с акантитом, пирротинном, галенитом (часто с примесью меди), халькопиритом, халькозином, дигенитом, хизлевудитом, касситеритом, баритом и теллуридами меди, свинца и серебра [45]. Ильдеусский массив также характеризуется валовым обогащением платиной и золотом (рис. 8), что в целом характерно для островодужных плутонических комплексов, например, зональных мафит-ультрамафитовых массивов Урало-Аляскинского типа (отторженцев островодужных магматических камер), связанных с крупномасштабной промышленной платинометалльной минерализацией (Платиновый и Палладиевый пояса Урала [9]).

Становление уникальной Ильдеусской рудно-магматической системы, перспективной на промышленное Ni-Co и Au-Ag-Pt оруденение, связано с плавлением глубинного источника в мантийном кли-



**Рис. 8.** Средние содержания металлов платиновой группы и золота в различных типах литосферной мантии, островодужных плутонических комплексах и островодужных вулканических породах, нормированные к хондриту [47].

1 – мезозойский мафит-ультрамафитовый массив Ильдеус (Становая складчатая область, N = 22) [45]; 2 – современные базальты островной дуги Тонга (N = 6) [49]; 3 – абиссальные перидотиты (океаническая мантия, N = 19) [48]; 4 – субконтинентальная литосферная мантия (N = 17) [46]; 5 – палеозойские концентрически зональные мафит-ультрамафитовые массивы Урало-Аляскинского типа (южный и центральный Урал, N = 16) [36]; 6 – островодужная мантия Камчатки (N = 34) [43]; 7 – анкармитовая лава («авачит») Авачинского вулкана (N = 2). N – количество определений в выборках.

не под триасовой Становой магматической дугой, обогащенного халькофильными и сидерофильными элементами под воздействием кислых адакитовых расплавов и/или H-O-S-Se-Cl-I-флюидов, связанных с погружающейся корой Монголо-Охотского океанического бассейна. Фракционирование этих богатых металлами расплавов в низах коры переходного типа под активной Становой окраиной привело к образованию оливин-пироксеновых кумулатов с экзотической сульфидно-металлической (самородные элементы + интерметаллические соединения) минерализацией. Далее, при продвижении частично раскристаллизованной магмы в верхние горизонты коры и ее окончательного затвердевания в коллизионных (юра) и пост-коллизионных (ранний мел) условиях, Ильдеусская магматогенная система подверглась крупномасштабным низкотемпературным метасоматическим изменениям в малоглубинных условиях, соответствующих уровням эпитермальной минерализации (маркируемой сульфосолями и теллуридами свинца и серебра) на конвергентных границах литосферных плит [45].

Поэтапная смена ассоциаций микровключений металлов и минералов в Ильдеусской рудно-магматической системе сопровождалась эволюцией состава

петро- и рудогенного флюида от восстановленного или очень слабо окисленного (сульфидная сера + галогениды) при плавлении в обогащенном халькофилами и сидерофилами мантийном клине и фракционировании первичных металлоносных магм в островодужной нижней коре до окисленного (сульфатная сера, Se-Sb-As сульфосоли, теллуриды) в более поздних малоглубинных коллизионных и постколлизионных эпитермальных обстановках [45]. Таким образом, ассоциации микровключений металлов, сплавов и минералов в мантийных ксенолитах и магнезиальных лавах Авачинского вулкана и мафит-ультрамафитовых породах Ильдеусского массива могут служить потенциальными индикаторами окислительно-восстановительных условий петро- и рудогенеза. Традиционно конвергентные геодинамические обстановки (зоны субдукции, коллизии и постколлизионного компенсационного рифтогенеза) считаются связанными с окислительными минералообразующими процессами и средами [3, 42]. Однако ряд новых петролого-геохимических данных по различным комплексам пород в зонах субдукции противоречат представлениям о глобальной окисленности субдукционных флюидов, вещества мантийного клина и островодужных магм [34, 44, 50]. В пользу латеральной и вертикальной редокс-гетерогенности зон субдукции также свидетельствует широкое распространение микровключений самородных металлов и интерметаллических соединений Pt, W, Fe, Au, Cu, Zn, Pb, Bi, Ag и др. в островодужных магмах [43], веществе мантийного клина [44], субдукционных и коллизионных гидротермалитах [1, 19], островодужных плутонических комплексах [16, 45], а также эруптивных пеплах и вулканических эксгальциях современных островодужных вулканов [8, 11, 14]. Прямые измерения потенциала кислорода  $fO_2$  в процессе формирования сплавов и самородных металлов платиновой группы в различных мафит-ультрамафитовых массивах (Кондер на Дальнем Востоке России, Гулинская интрузия на Сибирской платформе, Верх-Нейвинский массив на Среднем Урале) дают величины существенно ниже кварц-фаялит-магнетитового буфера (до -4), однозначно свидетельствуя о восстановленном режиме соответствующих процессов минералообразования [4, 12, 13]. На основании совокупности этих данных можно утверждать, что ассоциации микровключений металлов и сплавов в мантийных ксенолитах, первичных расплавах и рудно-магматических структурах зон перехода от океана к континенту являются эффективными индикаторами эволюции состава флюида и общей гетерогенности окислительно-восстановительных условий в субдукционно-коллизионных геодинамических обстановках.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Намечающееся в последнее время интенсивное развитие «микрометаллогенического» подхода к изучению петрологии и металлогенического потенциала горных пород требует разработки надежных методов определения химического состава и фазовой принадлежности обнаруживаемых в этих породах микровключений. Эти методы направлены как на прецизионное определение химического состава микровключений [например, 35, 54], так и на экспрессную полуколичественную оценку состава с целью их минералогической идентификации, продемонстрированную, в частности, в настоящей статье. Ее использование при изучении анкармитов и содержащихся в них перидотитовых ксенолитов из Авачинского вулкана на Камчатке, а также пород основного-ультраосновного массива Ильдеус в Становой складчатой области позволило получить новые данные о петрологических процессах в мантийно-коровом субстрате под активной вулканической дугой и об особенностях эволюции рудно-магматической системы под древней активной континентальной окраиной. Обнаружение микро- и наночастиц самородных платины и золота в шпинелевых лерцолитах массива Десеадо в южной Патагонии позволило реконструировать формирование благородных металлов в субдукционно-модифицированной мантии в процессе кристаллизации ильменита и хромшпинелида, вызвавшей общее снижение потенциала кислорода [38], а также в результате взаимодействия этой мантии с досубдукционным мантийным плюмом, обогащенным благородными металлами [56, 57]. Изучение микрочастиц золота и сопутствующих ему самородных металлов и сплавов халькофильных элементов в крупнейшем в России месторождении серебра Дукач позволило «уточнить факторы, определяющие условия отделения малых порций золотоносных флюидов от солевых магм различного состава и совершенствовать критерии оценки потенциальной рудоносности гранитоидов в отношении золотой минерализации различных формационных типов» [27]. Наконец, анализ микрочастиц рудных металлов в вулканических пеплах Камчатки дал возможность определить особенности рудогенеза под современными островодужными вулканами и оценить роль рециклинга воды, водорода и углерода в современных и древних зонах субдукции [10, 14, 15]. Таким образом нам представляется, что изучение ассоциаций микровключений позволяет успешно решать следующие задачи петрологии и рудной геологии: 1) реконструкция источников вещества в широком спектре (в отношении температуры и фаций глубинности) магматических, метаморфических и

метасоматических образований и связанных с ними рудопроявлений в разнообразных геодинамических обстановках от древних кратонов и платформ до зон субдукции и коллизии, континентальных плюмов и океанических островов; 2) качественная оценка состава и эволюции магмо- и рудообразующих флюидов и мобильности халькофильных и сидерофильных элементов в системе кора-мантия; 3) оценка окислительно-восстановительных условий процессов магмо- и рудообразования; 4) уточнение условий переноса металлов в литосферной мантии и земной коре под субдукционными и плюмовыми геологическими структурами и формирования порфировых и эпитеpmальных рудных месторождений; 5) совершенствование существующих и разработка дополнительных критериев поиска месторождений полезных ископаемых в зонах перехода от океана к континенту, включая такие новые типы минерализации на Дальнем Востоке РФ, как благороднометалльное оруденение в взрывных породах (флюидолитах) Малого Хингана и экзотические сульфидные с самородными металлами и сплавами Ni-Co-Pt-Au-Ag руды Ильдеусского массива и его структурно-вещественных аналогов в Становой складчатой области. Нам представляется, что дальнейшее развитие методов микрометаллогении исследования состава и состояния микровключений в горных породах приведет к широкому вовлечению полученных по ним данных по микровключениям в горных породах в исследование природы источников рудного вещества и различных этапов формирования рудно-магматических систем.

Исследование осуществлено в рамках Госзадания ИТиГ ДВО РАН при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 22-17-00023) с использованием научного оборудования Хабаровского инновационно-аналитического центра ИТиГ ДВО РАН.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Азовская О.Б. Углеродистый метасоматоз, особенности золотого оруденения и самородные металлы Мраморской зоны смятия: Дис. ... канд. геол.-минер. наук. Екатеринбург: Институт геологии и геохимии им. акад. А.Н. Заврицкого УрО РАН. 2005. 237 с.
2. Аношин Г.Н., Кепежинская В.В. Распределение золота в кайнозойских вулканических породах Курило-Камчатской провинции в связи с их петрохимическими особенностями // Геохимия. 1972. № 8. С. 910–925.
3. Бабанский А.Д., Рябчиков И.Д., Богатиков О.А. Эволюция щелочно-земельных магм. М.: Наука, 1983. 96 с.
4. Баданина И.Ю., Жаркова Е.В., Кадик А.А., Малич К.Н., Мурзин В.В. результаты экспериментального определения собственной летучести кислорода Ru-Os-Ir сплавов Верх-Нейвинского дунит-гарцбургитового массива, Средний Урал (Россия) // Геохимия. 2015. № 7. С. 661–666.

5. Бердников Н.В., Коновалова Н.С., Зазулина В.Е. Исследование включений благородных металлов в высокоуглеродистых породах методом РЭМ-РСМА // Тихоокеан. геология. 2010. Т. 29, № 2. С. 90–96.
6. Бердников Н.В., Невструев В.Г., Кеpezжинскас П.К., Крутикова В.О., Коновалова Н.С., Астапов И.А. Силикатные, железо-окисные и золото-медь-серебряные микросферы в рудах и пирокластике Костеньгинского железорудного месторождения (Дальний Восток России) // Тихоокеан. геология. 2021. Т. 40, № 3. С. 67–84.  
DOI: 10.30911/0207-4028-2021-40-3-67-84
7. Бердников Н.В., Невструев В.Г., Кеpezжинскас П.К., Диденко А.Н. Тарагайский пери-дотитовый массив – трубка взрыва на западе Буреинского террейна (юг Дальнего Востока России) // Докл. АН. Науки о Земле. 2023. Т. 512, № 1. С. 85–91. DOI: 10.31857/S268673972360073X
8. Вергасова Л.П., Старова Г.Л., Серафимова Е.К., Филатов С.К., Филоsofoва Т.М., Дунин-Барковский Р.Л. Самородное золото вулканических эксгалляций шлаковых конусов Большого трещинного Толбачинского извержения // Вулканология и сейсмология. 2000. № 5. С. 19–27.
9. Волченко Ю.А. Платина Урала. Екатеринбург: УрО РАН, 2011. 453 с.
10. Главатских С.Ф. Металлообразования в продуктах эксгалляций Большого трещинного Толбачинского извержения (Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 1995. № 4–5. С. 193–214.
11. Дистлер В.В., Юдовская М.М., Знаменский В.С., Чаплыгин И.В. Элементы группы платины в современных фумаролах вулкана Кудрявый (остров Итуруп, Курильская островная гряда) // Докл. АН. 2002. Т. 387, № 2. С. 37–241.
12. Кадик А.А., Жаркова Е.В., Рудашевский Н.С. Окислительно-восстановительные условия формирования минералов (Os, Ir, Ru, Pt) и (Pt, Fe) ультрамафических комплексов // Докл. АН. 1993. Т. 331, № 3. С. 349–352.
13. Кадик А.А., Жаркова Е.В., Мочалов А.Г. Окислительно-восстановительные условия формирования изоферроплатины щелочно-ультраосновного массива Кондер // Докл. АН. 1998. Т. 358, № 2. С. 244–247.
14. Карпов Г.А., Мохов А.В. Акцессорные самородные рудные минералы эруптивных пеплов андезитовых вулканов Камчатки // Вулканология и сейсмология. 2004. № 4. С. 41–49.
15. Карпов Г.А., Силаев В.И., Аникин Л.П., Васильев Е.А., Вергасова Л.П. Вулканогенный углеродный парагенезис на Камчатке // История науки и техники. 2017. № 7. С. 66–77.
16. Кеpezжинскас П.К., Бердников Н.В., Крутикова В.О., Кеpezжинскас Н.П., Астапов И.А., Кириченко Е.А. Серебряная минерализация в глубинных магматогенных системах древних островных дуг: Ильдеусский ультраосновной массив, Становой мобильный пояс (Дальний Восток России) // Тихоокеан. геология. 2023. Т. 42, № 4. С. 30–60.  
DOI: 10.30911/0207-4028-2023-42-4-30-60
17. Коробейников А.Ф., Гусев А.И. Поведение золота в расплавах и особенности его фракционирования // Изв. Томск. политехнического ун-та. 2013. Т. 323, № 1. С. 142–148.
18. Лукин А.Е. Минеральные сферы – индикаторы специфического флюидного режима рудообразования и нафтидогенеза // Геофизический журн. 2013. Т. 35, № 6. С. 10–53.
19. Новгородова М.И. Самородные металлы в гидротермальных рудах. М.: Наука, 1983. 287 с.
20. Портнягин М.В., Миронов Н.Л., Матвеев С.В., Плечов П.Ю. Петрология «авачитов» – высокомагнезиальных базальтов Авачинского вулкана, Камчатка. II. Расплавные включения в оливине // Петрология. 2005. Т. 13, № 3. С. 1–31.
21. Рамдор П. Рудные минералы и их сростания. М.: Изд-во иностранной литературы. 1962. 1132 с.
22. Рид С. Дж. Б. Электронно-зондовый микроанализ и растровая электронная микроскопия в геологии. М.: Техносфера, 2005. 229 с.
23. Сидоров А.А., Волков А.А., Савва Н.Е. Вулканизм и эпitherмальные месторождения // Вулканология и сейсмология. 2015. № 6. С. 3–12.
24. Сорохтин Н.О., Лобковский Л.И., Козлов Н.Е. Металлогения зон субдукции // Вестн. МГТУ. 2017. Т. 20, № 1. С. 111–128.
25. Тагиров Б.Р. Поведение благородных металлов (Au, Pd, Pt) в гидротермальных флюидах: Дис. ... док-ра геол.-минер. наук. М.: ИГЕМ РАН, 2020. 204 с.
26. Татаринов В.В., Финкельштейн А.Л., Кравцова Р.Г., Павлова Л.А. Определение состава микровключений самородного золота в матрице сульфидного минерала при рентгено-спектральном электронно-зондовом микроанализе // Аналитика и контроль. 2017. Т. 21, № 4. С. 208–215
27. Филимонова Л.Г., Трубкин Н.В. Дисперсное золото, ассоциирующие минералы рассеянной минерализации дейкогранитов Дукацкого рудного поля – индикаторы условий генерации магматогенных золотоносных флюидов // Геология и геофизика. 2021. Т. 62, № 9. С. 1275–1293.
28. Ханчук А.И., Молчанов В.П., Андросов Д.В. Первые находки самородных золота и платины в ильменитовых россыпях Ариадненской интрузии базит-ультрабазитов (Приморье) // Докл. АН. Науки о Земле. 2020. Т. 492, № 2. С. 39–43.
29. Шарапов В.Н., Кузнецов Г.В., Тимина Т.Ю., Томиленко А.А., Чудненко К.В. Численное моделирование неизотермического метасоматического преобразования ультрабазитов мантийного клина под Авачинской группой вулканов (Камчатка) // Геология и геофизика. 2017. Т. 58, № 5. С. 674–700.
30. Berdnikov N., Nevstruev V., Kepezhinskas P., Astapov I. and Konovalova N. Gold in Mineralized Volcanic Systems from the Lesser Khingan Range (Russian Far East): Textural Types, Composition and Possible Origins // Geosci. 2021. V. 11, N 103. <https://doi.org/10.3390/geosciences11020103>
31. Berdnikov N., Kepezhinskas P., Konovalova N., Kepezhinskas N. Formation of gold alloys during crustal differentiation of convergent zone magmas: constraints from an Au-rich websterite in the Stanovoy Suture Zone (Russian Far East) // Geosci. 2022. V. 12, N 126. <https://doi.org/10.3390/geosciences12030126>.
32. Bornhorst T.J., Rose, W.I., Jr. Partitioning of gold in young calc-alkaline volcanic rocks from Guatemala // J. Geol. 1986. V. 94. P. 412–418.
33. Castillo P.R. Arc magmatism and porphyry-type ore deposition are primarily controlled by chlorine from seawater // Chemical Geol. 2022. V. 589. 120683.
34. Evans K.A., Frost B.R. Deserpentinization in subduction zones as a source of oxidation in arcs: a reality check // J. Petrol. 2021. V. 62, egab016.

35. Finkelshtein A.L., Tatarinov V.V., Finkelstein E.A., Pavlova L.A., Kravtsova R.G. About the assessment of gold concentrations in tiny inclusions within sulfide mineral matrix: An electron microprobe study // *X-Ray Spectrometry*. 2018. V. 47, N 6. P. 423–431.
36. Garuti G., Fershtater G., Bea F., Montero P., Pushkarev E.V., Zaccarini F. Platinum-group elements as petrological indicators in mafic-ultramafic complexes of the central and southern Urals: preliminary results // *Tectonophysics*. 1997. V. 276. P. 181–194.
37. Goldstein J., Newbury D., Joy D., Lyman C., Echlin P., Lifshin E., Sawyer L., Michael J. *Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis*. Kluwer Academic, Plenum Publishers, New York. 2003, 688 p.
38. González-Jiménez J.M., Roqué-Rosell J., Jiménez-Franco A., Tassara S., Nieto F., Gervilla F., Baurier S., Proenza J.A., Saunders E., Deditius A.P., Schilling M., Corgne A. Magmatic platinum nanoparticles in metasomatic silicate glasses and sulfide from Patagonian mantle xenoliths // *Contributions to Mineral. and Petrol.* 2019. V. 174. <https://doi.org/10.1007/s00410-019-1583-5>.
39. Grondahl C., Zajacz Z. Sulfur and chlorine budgets control the ore fertility of arc magmas // *Nature Communications*. 2022. V. 13. 4218.
40. Hogg O.R., Edmonds M., Blundy J. Water-rich magmas optimize volcanic chalcophile element outgassing fluxes // *Earth and Planetary Sci. Lett.* 2023. V. 611. 118153. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2023.118153>.
41. Ionov D.A. Petrology of mantle wedge lithosphere: new data on supra-subduction zone peridotite xenoliths from the andesitic Avacha volcano, Kamchatka // *J. Petrol.* 2010. V. 51. P. 327–361.
42. Kelley K.A., Cottrell E. Water and the oxidation state of subduction zone magmas // *Sci.* 2009. V. 325. P. 605–607.
43. Kepezhinskas P., Defant M.J., Widom E. Abundance and distribution of PGE and Au in the island-arc mantle: implications for sub-arc metasomatism // *Lithos*. 2002. V. 60. P. 113–128.
44. Kepezhinskas P., Berdnikov N., Kepezhinskas N. and Konovalova N. Metals in Avachinsky Peridotite Xenoliths (Kamchatka) With Implications for Redox Heterogeneity in Sub-Arc Mantle Wedge // *Lithos*. 2022. V. 412–413, 106610. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2022.106610>
45. Kepezhinskas P., Berdnikov N., Kepezhinskas N., Krutikova V., Astapov I. Magmatic-hydrothermal transport of metals at arc plutonic roots: insights from the Ildeus mafic-ultramafic complex, Stanovoy suture zone (Russian Far East) // *Minerals*. 2023. V. 13. <https://doi.org/10.3390/min13070878>.
46. Lorand, J.-P.; Alard, O. Platinum-group element abundances in the upper mantle: new constraints from in situ and whole-rock analyses of Massif Central xenoliths (France) // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 2001. V. 65. P. 2789–2806.
47. McDonough, W.F., Sun, S.-s. The composition of the Earth // *Chem. Geol.* 1995. V. 120. P. 223–253.
48. Marchesi C., Garrido C.J., Harvey J., González-Jiménez J.M., Hidas K., Lorand J.-P., Gervilla F. Platinum-group elements, S, Se and Cu in highly depleted abyssal peridotites from the Mid-Atlantic Ocean Ridge (ODP Hole 1274A): influence of hydrothermal and magmatic processes // *Contributions to Mineral. and Petrol.* 2013. V. 166. P. 1521–1538.
49. Park J.-W., Campbell I.H., Kim J., Moon J.-W. The role of late sulfide saturation in the formation of a Cu- and Au-rich magma: insights from the platinum group element geochemistry of Niutahi-Motutahi lavas, Tonga Rear Arc // *J. Petrol.* 2015. V. 56. P. 59–81.
50. Piccoli F., Hermann J., Pettke T., Connolly J.A.D., Kempf E.D., Viera Duarte J.F. Subducting serpentinites release reduced, not oxidized, aqueous fluids // *Scientific Reports*. 2019. V. 9. 19573.
51. Pokrovski G.S., Akinfiyev N.N., Borisova A.Y., Zotov A.V., Kouzmanov K. Gold speciation and transport in geological fluids: insights from experiments and physical-chemical modeling // *Geolog. Soci. Spec. Publ.* 2014. V. 402. P. 9–70.
52. Saunders J.E., Pearson N.J., O'Reilly S.Y., Griffin W.L. Gold in the mantle: a global assessment of abundance and redistribution processes // *Lithos*. 2018. V. 322. P. 376–391.
53. Setijadji L.D., Kajino S., Imai A., Watanabe K. Cenozoic island arc magmatism in Java Island (Sunda Arc, Indonesia): clues on relationships between geodynamics of volcanic centers and ore mineralization // *Resource Geol.* 2006. V. 56. 267–292.
54. Schettino E., González-Jiménez J. M., Marchesi C., Palozza F., Blanco-Quintero I. F., Gervilla F., Braga R., Garrido C. J., Fiorentini M. Mantle-to-crust metal transfer by nanomelts // *Communications Earth & Environment*. 2023. V. 4, # 256. <https://doi.org/10.1038/s43247-023-00918-y>
55. Seauve de V., Languille M.-A., Kociak M., Belin S., Ablett J., Andraud C., Stéphan O., Rueff J.-P., Fonda E., Lavedrine B.. Spectroscopies and Electron Microscopies Unravel the Origin of the First Colour Photographs // *Angewandte Chemie*. 2020. P. 1–9.
56. Tassara S., González-Jiménez J.M., Reich M., Schilling M.E., Morata D., Begg G., Saunders E., Griffin W.L., O'Reilly S.Y., Grégoire M., Barra F., Corgne A. Plume-subduction interaction forms large auriferous provinces // *Nature Communications*. 2017. V. 8. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-00821-z>.
57. Togashi S., Terashima S. The behavior of gold in unaltered island arc tholeiitic rocks from Izu-Oshima, Fuji, and Osoreyama volcanic areas, Japan // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1997. V. 61. P. 543–554.
58. Ulrich T., Günther D., Heinrich C.A. Gold concentrations in magmatic brines and the metal budget of porphyry copper deposits // *Nature*. 1999. V. 399. P. 676–679.
59. Whitney D.L., Evans B.W. Abbreviations for names of rock-forming minerals // *American Mineralogist*. 2010. V. 95. P. 185–187.
60. Wilkinson J.J. Triggers for the formation of porphyry ore deposits in magmatic arcs // *Nature Geosciences*. 2013. V. 6. P. 917–925.
61. Williams-Jones A.E., Heinrich C.A. Vapor transport of metals and the formation of magmatic-hydrothermal ore deposits // *Economic Geol.* 2005. V. 100. P. 1287–1312.

Рекомендована к печати А.И. Ханчуком  
после доработки 18.08.2023 г.  
принята к печати 26.09.2023 г.

*V.O. Krutikova, N.V. Berdnikov, P.K. Kepezhinskas*

**Study on microinclusions of metals and minerals in rocks: problems in interpreting research findings, and their application to the study of magmatic systems of Kamchatka and the Stanovoy fold belt**

The article discusses the problems of interpreting the results of studies on microinclusions of metals and minerals by scanning electron microscopy with energy-dispersive X-ray microanalysis, which are related to the influence of the matrix material. The method was shown to work well when studying “relatively large” (5-10  $\mu\text{m}$ ) microinclusions for the purpose of their phase identification and semi-quantitative determination of composition normalized to 100%. The possibilities of “cleaning” the analysis results from “additives” introduced by matrix elements are discussed, as well as criteria for assessing the distance from the boundaries of a micro-object at which the influence of the matrix becomes minimal. The use of the results obtained using these approaches is illustrated by the examples of studying the petrology and metallogeny of igneous rocks of Kamchatka and the Stanovoy fold belt, during which new data were obtained on petrological processes in the mantle-crustal substrate beneath the active volcanic arc and on the evolution of the ore-magmatic system beneath the ancient active continental margin.

**Key words:** microminerals, microinclusions of alloys, scanning electron microscopy, energy dispersive X-ray microanalysis, micrometallogeny, Kamchatka, Stanovoy fold belt.