



УДК 549.3+553.2+552.323.6

Д. П. Савельев, Т. М. Философова

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН,  
г. Петропавловск-Камчатский  
e-mail: savelyev@kscnet.ru*

## **Благородные металлы и интерметаллиды в сульфидах из меловых пикритов п-ова Камчатский Мыс**

В работе представлены результаты определений благородных металлов и их соединений в сульфидных глобулах из пикритов мелового офиолитового комплекса п-ова Камчатский Мыс. Сульфидные глобулы в пикритах имеют магматический генезис, состоят из пирротина, пентландита и сульфида со структурой распада твёрдого раствора (халькопирита с ламелями железо-никелевого сульфида), они наблюдаются как в виде сферовидных расплавных включений во вкрапленниках оливина, так и в виде разнообразных выделений до 0,3 мм в основной массе породы. При изучении сульфидов на сканирующем электронном микроскопе в них найдены микровключения Au, Au + Ag, Pd<sub>2</sub>Sn, Pt, а также комплексные включения, содержащие перечисленные элементы и соединения, иногда с примесью As. Размеры микровключений не превышают 1,5 мкм. Благородные металлы выделились в виде самородной фазы до разделения сульфидной жидкости на медную, никелистую и железистую фазы.

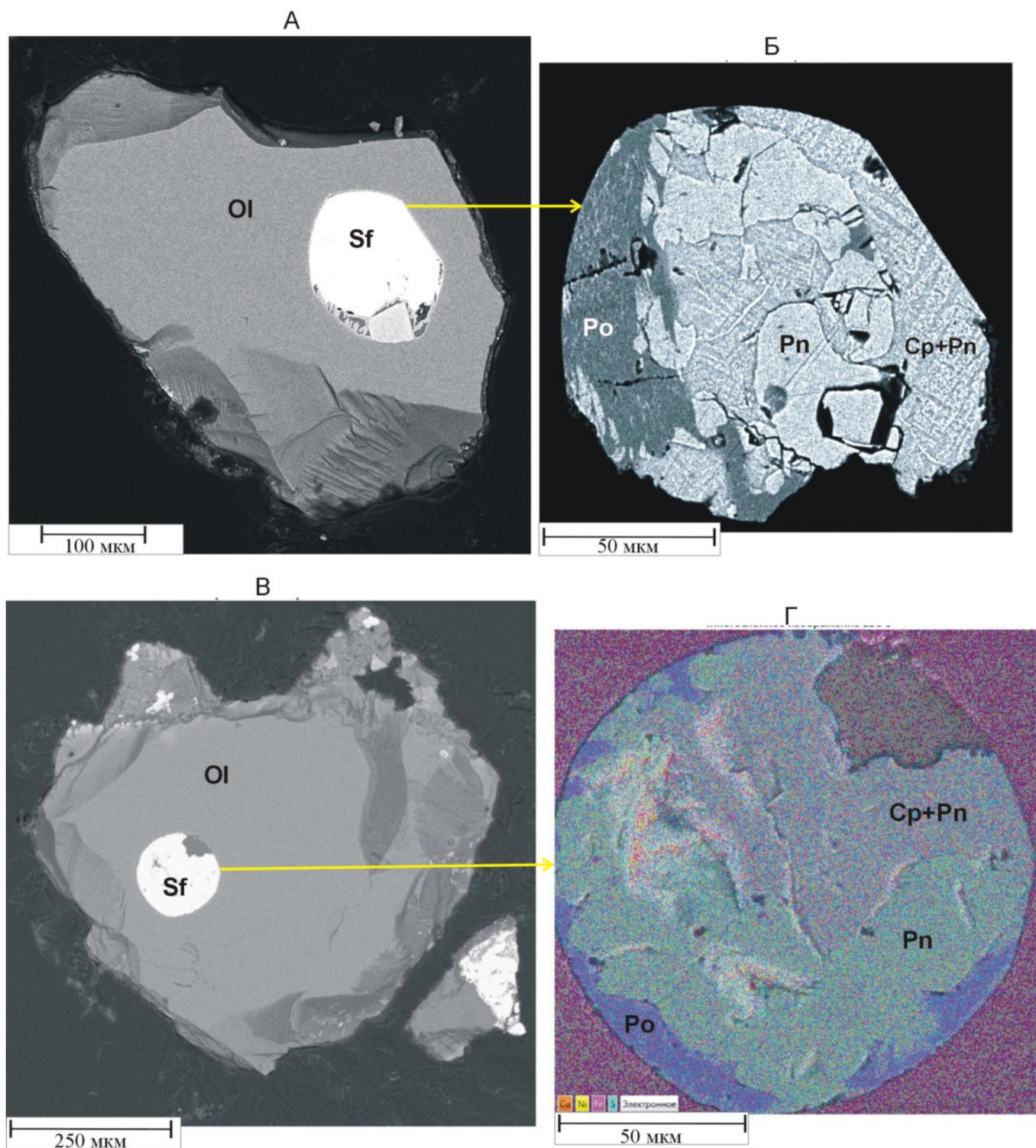
Представленная работа является продолжением исследований петрологии и рудоносности пикритов из мелового офиолитового комплекса п-ова Камчатский Мыс [1–2]. Понимание механизма образования рудных скоплений благородных металлов при эволюции магматических комплексов является актуальной задачей как для минерагенических, так и для петрологических исследований. Достаточно хорошо изучены рудоносные интрузивные комплексы трапповой формации, содержащие залежи сульфидных руд, богатых элементами группы платины (PGE), Au и Ag [напр. 3]. Также достаточно много данных получено по минералогии и геохимии PGE в мантийных перидотитах [напр. 5]. Значительно меньше изучены магматические сульфидные включения в вулканических породах мантийного генезиса, практически каждая находка PGE в них заслуживает внимательного изучения. Важность изучения поведения PGE в магматическом процессе связана также с решением такой важной петрологической проблемы, как идентификация материала земного ядра в продуктах вулканизма. Например, по содержанию и соотношению PGE путём моделирования процессов частичного плавления показано, что источник базальтов плато Онтонг-Джава включал до 0,5% материала внешнего ядра [4]. Попыткой подобраться именно к этой проблеме и является исследование PGE в породах плюмгенерированного офиолитового комплекса п-ова Камчатский Мыс.

Плаггиоклазовые пикриты найдены в зоне серпентинитового меланжа к востоку от Солдатского гипербазитового массива [1]. Сульфиды в них наблюдаются в виде сферических расплавных включений во вкрапленниках оливина и в виде каплевидных

или бесформенных выделений размером до 0,3 мм в основной массе. Некоторые более крупные расплавные включения в оливинах являются многофазными, сульфидный шарик является одной из фаз. Строение сульфидных глобул неоднородное, они состоят из пирротина, пентландита, халькопирита и фаз сложного состава со структурой распада [2]. Среди исследованных сульфидных образований крупнее 50 мкм практически не наблюдается мономинеральных выделений.

На данном этапе исследований основное внимание было уделено поиску и изучению микровключений благородных металлов в сульфидах. Из двух образцов плаггиоклазовых пикритов было выделено 220 зёрен сульфидов размером 50–200 мкм. Зёрна были собраны в шашку, залиты эпоксидной смолой и отполированы. Судя по предыдущим нашим исследованиям [2], сульфидные включения в оливинах по составу не отличаются от выделений в основной массе, поэтому они изучались без разделения. Более детально были изучены сульфидные шарики, заключённые внутри неизменённых кристаллов оливина (рис. 1а, в). Они состоят из тех же железо-медно-никелевых сульфидов (рис. 1б, г), что доказывает их магматический генезис и полностью отвергает связь с постмагматическими процессами.

На сканирующем электронном микроскопе VEGA-3 с ЭДС X-MAX было изучено 220 зёрен сульфидов, около 50 зёрен содержали выделения благородных металлов размером 0,5–1,5 мкм, которые отличаются на фоне сульфидов более ярким свечением при сканировании в обратно рассеянных электронах. Всего найдено около 90 таких выделений благородных металлов и интерметаллидов.

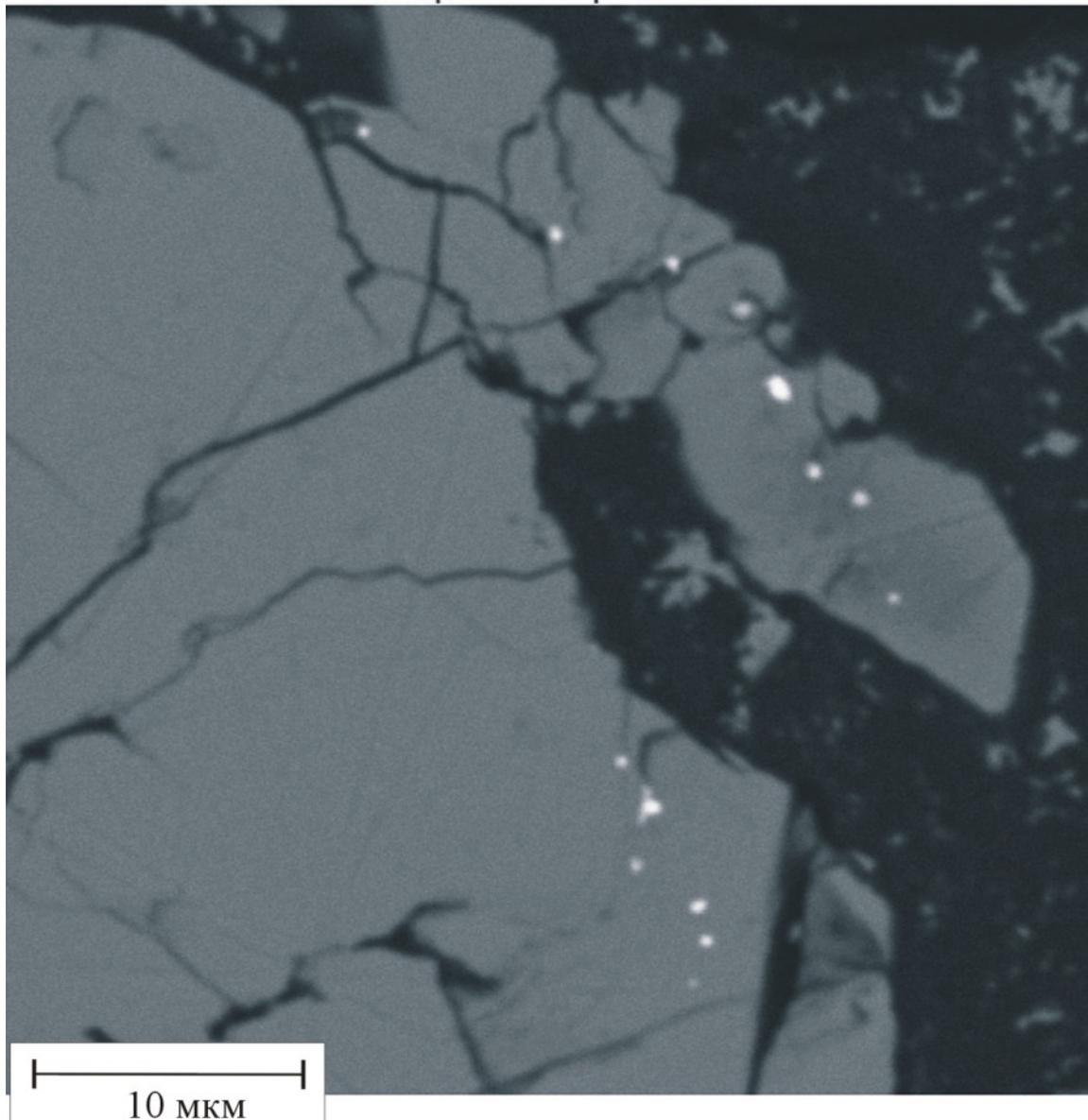


**Рис. 1.** Сульфидный шарик — расплавленное включение в неизменном кристалле оливина. Изображения выполнены на сканирующем электронном микроскопе (SEM Vega 3 Tescan) в обратно рассеянных электронах с разным контрастом (А-В) и с учётом характеристического рентгеновского излучения электронов (Г). ОI — оливин, Sf — сульфид, Pn — пентландит, Ср — халькопирит, Po — пирротин.

В основном зёрна сульфидов содержали 1–2 микро-выделения, но одно из зёрен содержало 14 микро-выделений (рис. 2), причём разного состава. Среди этих микровыделений преобладают зёрна паоловита ( $\text{Pd}_2\text{Sn}$ ), Au + Ag в разных пропорциях (как с пре-

обладанием серебра, так и с преобладанием золота) и Au без примеси Ag, а также комплексные выделения, в которых определены  $\text{Pd} + \text{Sn} + \text{Au} \pm \text{Ag} \pm \text{As}$ . Были найдены единичные выделения Pt и Pt + Au. Обнаружено также несколько выделений сложно-

## Электронное изображение 24



**Рис. 2.** Выделения золота и паоловита в сульфиде. Фото в обратно рассеянных электронах.

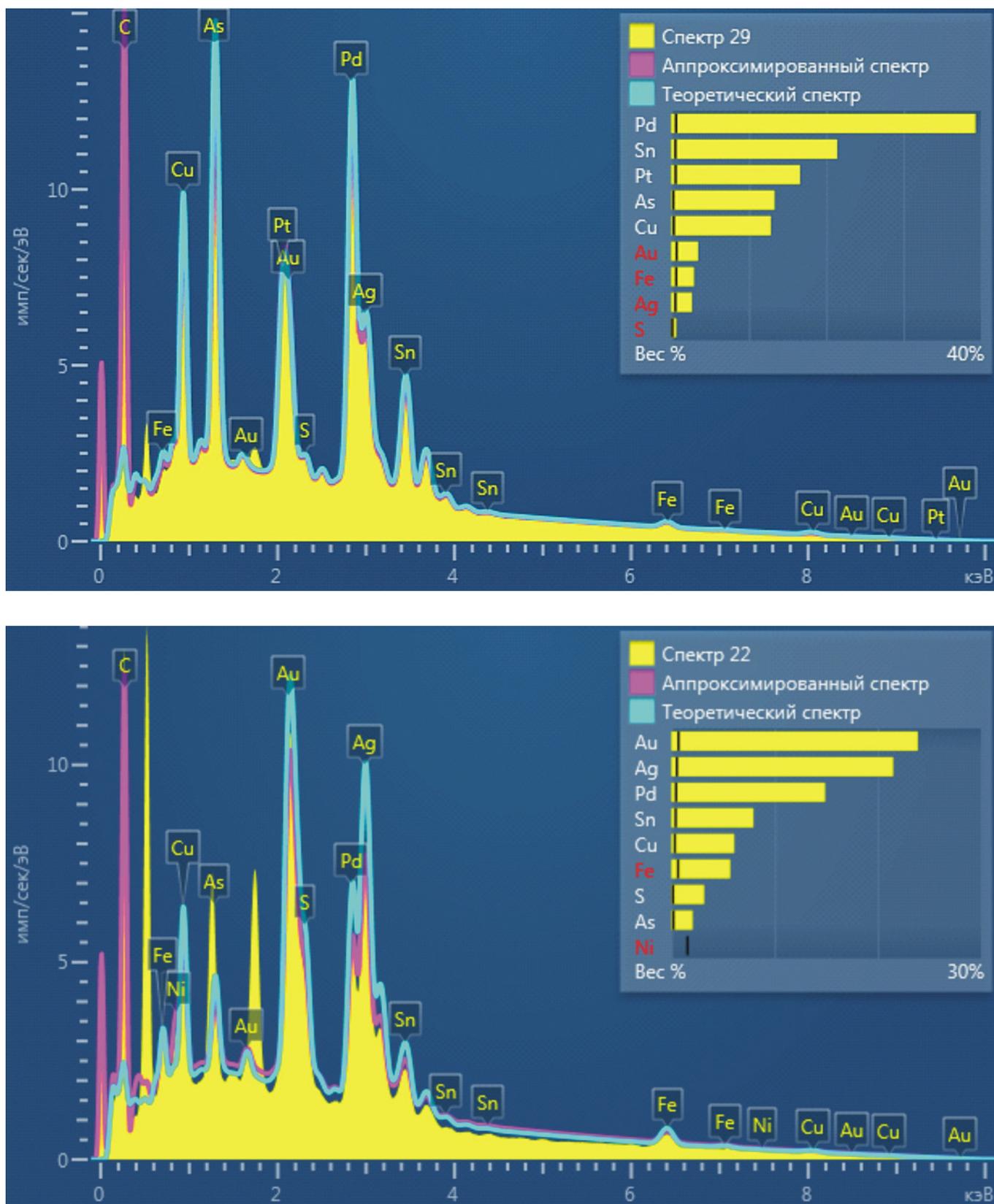
го состава — Pd + Sn + Pt + Au + Ag + As (рис. 3). В двух комплексных выделениях присутствует также Zn. Из-за маленьких размеров выделений и частичного захвата сульфидной матрицы при анализе не представляется возможным определить отдельные минеральные фазы таких выделений. Паоловит идентифицирован по отношению Pd : Sn (атомные %), которое близко к 2 в большинстве анализов микровыделений (в которых присутствует палладий), причём вне зависимости от количества сульфидной матрицы и наличия других компонентов (рис. 4).

Наличие выделений самородных металлов и интерметаллидов в сульфидных зёрнах не зависело от состава вмещающей сульфидной матрицы. Такие выделения были найдены и в пирротине,

и в пентландите, и в сульфиде со структурой распада на пентландит и халькопирит. Из этого можно сделать вывод, что выделение самородной фазы благородных металлов происходило при остывании расплава после отделения сульфидной жидкости от силикатной, но до её распада на отдельные фазы.

Комплексный состав обнаруженных в сульфидных микровыделениях говорит о насыщенности первичного расплава различными PGE, золотом и серебром, что не противоречит сделанному ранее предположению о примеси вещества земного ядра в мантийных источниках плюмгенерированных пикритов офиолитового комплекса п-ова Камчатский Мыс [2].

Работа выполнена при поддержке программы фундаментальных исследований ДВО РАН «Дальний Восток», проект № 15-1-2-045



**Рис. 3.** Примеры спектров, полученных при анализе микровыделений сложного состава (а — микровыделение состава —  $\text{Pd}_2\text{Sn} + \text{Pt} + \text{As} + \text{Cu} + \text{Au} + \text{Ag}$  почти без захвата сульфида; б — микровыделение, состоящее из  $\text{Au} + \text{Ag}$  и паоловита с примесью  $\text{As}$  и небольшим захватом сульфидной матрицы).

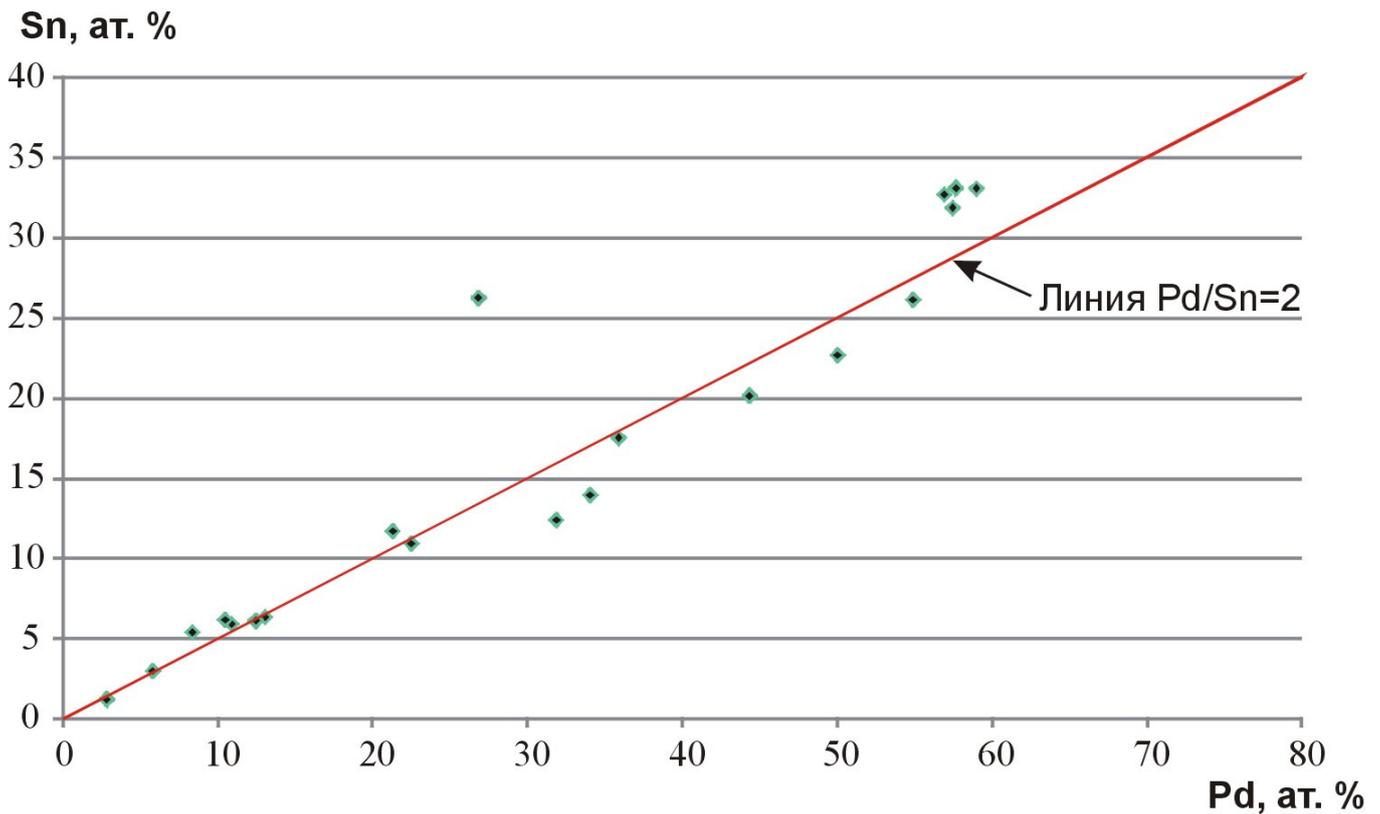


Рис. 4. Состав микровыделений, содержащих паоловит, на диаграмме Pd – Sn (атомные %).

#### Список литературы

1. Савельев Д.П. Плаггиоклазовые пикриты п-ова Камчатский Мыс (Восточная Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 2014. №4. С. 43–53.
2. Савельев Д.П., Философова Т.М. Магматические сульфиды в пикритах п-ова Камчатский Мыс // Материалы региональной научной конференции «Вулканизм и связанные с ним процессы», посвящённой Дню вулканолога, 27–28 марта 2014 г. Петропавловск-Камчатский, ИВиС ДВО РАН. 2014. С. 120–126.
3. Спиридонов Э. М. Рудно-магматические системы Норильского рудного поля // Геология и геофизика. 2010. Том. 51. №9. С. 1356–1378.
4. Ely J. C., Neal C.R. Using platinum-group elements to investigate the origin of the Ontong Java Plateau, SW Pacific // Chemical Geology. 2003. Vol. 196. P. 235–257.
5. Lorand J.-P., Luguet A., Alard O. Platinum-group element systematics and petrogenetic processing of the continental upper mantle: A review // Lithos. 2013. Vol. 164. P. 2–21.



## Именной указатель

- Абкадыров И. Ф., 161  
Ананьев В. В., 138, 214  
Андреев В. И., 7  
Аникин Л. П., 105, 214  
Базанова Л. И., 138  
Белоусов А. Б., 223  
Белоусова М. Г., 223  
Блох Ю. И., 105  
Болдина С. В., 148  
Бондаренко В. И., 105  
Вергасова Л. П., 214, 223  
Викулин А. В., 113, 116, 132  
Вольнец А. О., 12  
Воронин П. О., 232  
Воропаев П. В., 161, 170  
Герус А. И., 116, 132  
Гирин О. А., 16, 21, 26, 92  
Гонтовая Л. И., 22  
Горбач В. А., 7  
Горностаева Т. А., 247  
Грибоедова И. Г., 12  
Гусева Н. В., 148  
Демянчук Ю. В., 16, 21, 46, 176  
Долгаль А. С., 105, 125  
Долгая А. А., 132  
Дроздин В. А., 32, 39  
Дунин-Барковский Р. Л., 214  
Ермаков В. А., 122  
Ерёмина Т. С., 214  
Ефстифеева А. С., 148  
Жаринов Н. А., 46, 56  
Жидков Г. В., 138  
Зарубина Н. В., 125  
Зобенько О. А., 261  
Зубов А. Г., 138  
Иваненко А. Н., 125  
Иванов М. В., 125  
Карданова О. Ф., 240  
Карпов Г. А., 240  
Карташов П. М., 247  
Карташёва Е. В., 214, 261  
Касимова В. А., 154  
Кирюхин А. В., 232, 235  
Кирюхин П. А., 235  
Кляпицкий Е. С., 66, 75  
Козлов В. В., 253  
Коновалова А. А., 161  
Копылова Г. Н., 148, 154  
Кугаенко Ю. А., 161, 170  
Кудаева Ш. С., 247  
Леонов В. Л., 66, 75  
Леонова Т. В., 75  
Любушин А. А., 154  
Магуськин К. М., 176  
Магуськин М. А., 176  
Малик Н. А., 84, 253  
Маневич А. Г., 16, 21  
Маневич Т. М., 16  
Мельников Д. В., 16, 21  
Михайлик Е. В., 125  
Михайлик П. Е., 125  
Москалева С. В., 247, 253  
Москалёва С. В., 223, 261  
Мохов А. В., 247  
Муравьёв Я. Д., 16  
Назарова З. А., 122  
Назарова М. А., 214, 223  
Николаева А. Г., 240  
Новикова П. Н., 105, 125  
Нуждаев А. А., 16, 21  
Овсянников А. А., 138  
Округин В. М., 247, 253, 261  
Округина А. М., 261  
Петрова В. В., 105  
Пилипенко О. В., 105  
Плечов П. Ю., 277  
Плутахина Е. Ю., 253  
Поляков А. Ю., 232  
Рашидов В. А., 105, 125  
Рогозин А. Н., 66, 75  
Романова И. М., 92  
Рослый Г. А., 261  
Рылова С. А., 75  
Рычагов С. Н., 270  
Савельев Д. П., 277, 283  
Салтыков В. А., 161, 170, 199  
Самкова Т. Ю., 7  
Сенюков С. Л., 122  
Серафимова Ю. К., 207  
Сергеева А. В., 270  
Сидоров Е. Г., 214  
Сокоренко А. В., 214  
Таранова Л. Н., 154  
Титков Н. Н., 170, 176  
Трусов А. А., 105  
Федотов С. А., 235  
Филатов С. К., 223  
Философова Т. М., 261, 270, 277, 283  
Цуканов Н. В., 97  
Чернов М. С., 270  
Чирков С. А., 32, 39  
Чубаров В. М., 214  
Чубаров М. В., 253, 261  
Шишканова К. О., 261  
Яблокова Д. А., 261