

УДК 553.411(553.068.54)+549.27+553.086+552.3+553.041(571.63)

О ПРИРОДЕ МИНЕРАЛОВ ПЛАТИНОИДОВ ИЗ ЗОЛОТЫХ РОССЫПЕЙ ЮЖНОГО СИХОТЭ-АЛИНЯ (ПРИМОРЬЕ)

© 2021 г. В. В. Иванов^{1,*}, академик РАН А. И. Ханчук¹, Л. Г. Колесова¹

Поступило 01.03.2021 г.

После доработки 15.03.2021 г.

Принято к публикации 15.03.2021 г.

С помощью аналитической сканирующей электронной микроскопии в тонкой фракции шлихов золотых россыпей двух водотоков, которые дренируют дислоцированные терригенные отложения перми, перекрывающие кембрийские метагабброиды и метадиориты, впервые в Южном Сихотэ-Алине обнаружены мелкие кристаллы и зерна сперрилита, изоферроплатины и куперита, а также субмикронные выделения в кавернах их поверхности других МПГ – купородсита, рустенбургита и неназванной фазы $RhPtAsS_2$. Сделан вывод о том, что метаморфиты служили источником флюидов и платиноидов, чей кристаллогенез происходил на геохимическом восстановительном барьере в дислоцированных углеродисто-терригенных отложениях перекрывающего структурно-вещественного комплекса Сергеевского террейна.

Ключевые слова: платина, палладий, родий, халькогениды, природные сплавы, россыпи, углеродистые осадки, тектониты, Сихотэ-Алинь

DOI: 10.31857/S2686739721060086

Южный Сихотэ-Алинь относится к дальневосточному региону не прерывавшейся более чем полуторвековой добычи коренного и россыпного золота. При этом платиноносные рудные проявления, а также минералы платиновой группы (МПГ) в континентальных и прибрежно-морских россыпях золота до настоящего времени не были встречены [1, 2]. Во многом это обусловлено микроскопическими и субмикроскопическими размерами их зерен, для диагностики которых требуются высоколокальные методы исследований.

МПГ нами обнаружены в шлихах двух золотых россыпей Литовского рудно-россыпного узла в юго-восточных предгорьях Ливадийского хребта Сихотэ-Алиньской горной системы. Закономерен вопрос об источнике платиноидов и вероятных условиях размещения их минерализации.

Указанный узел находится западнее Партизанского разлома в южной части Сергеевского террейна – аллохтонной пластины палеозойского орогенного пояса на юрской аккреционной призме [2] (рис. 1). Его гетерогенный фундамент представлен преимущественно кембрий-ордовикским габбро-диорит(преобладают)-гранодиорит-

товым структурно-вещественным комплексом с характерным гнейсовидным обликом амфиболитизированных пород. Эти, так называемые “сергеевские габброиды”, включают блоки других комплексов кембрийских пара- и ортопород. Чехол террейна сложен осадочными и вулканогенными образованиями, начиная с верхнепалеозойских. Сшивающие комплексы – палеозойские и мезозойские гранитоиды [2–4]. Дизъюнктивные структуры, разделяющие блоки террейна, относятся преимущественно к долгоживущим левосторонним сдвигам, с которыми сопряжены главным образом северо-восточные надвиги, запад-северо-западные правосторонние, северо-западные раздвиги и сбросы, а также разломы другой кинематики [2–5, 9].

Рудно-россыпной узел охватывает ЮЗ-отрезок одной из региональных рудоконтролирующих структур указанной части террейна – Западно-Партизанской зоны (шириной до 10 км), состоящей из серии сближенных ССВ-левосторонних сдвигов, с которыми сочленены ВСВ-надвиговые зоны динамокластитов [5].

Среднегорное обрамление и днища долин ручьев бассейна р. Литовки, которые вмещают характеризируемые неглубоко залегающие россыпи золота, сложены сергеевскими габброидами и пермскими терригенно-осадочными породами, имеющими углеподобный вид вследствие трансформации рассеянного углеродистого вещества в

¹ Дальневосточный геологический институт
Дальневосточного отделения Российской академии наук,
Владивосток, Россия

*E-mail: d159327@yandex.ru

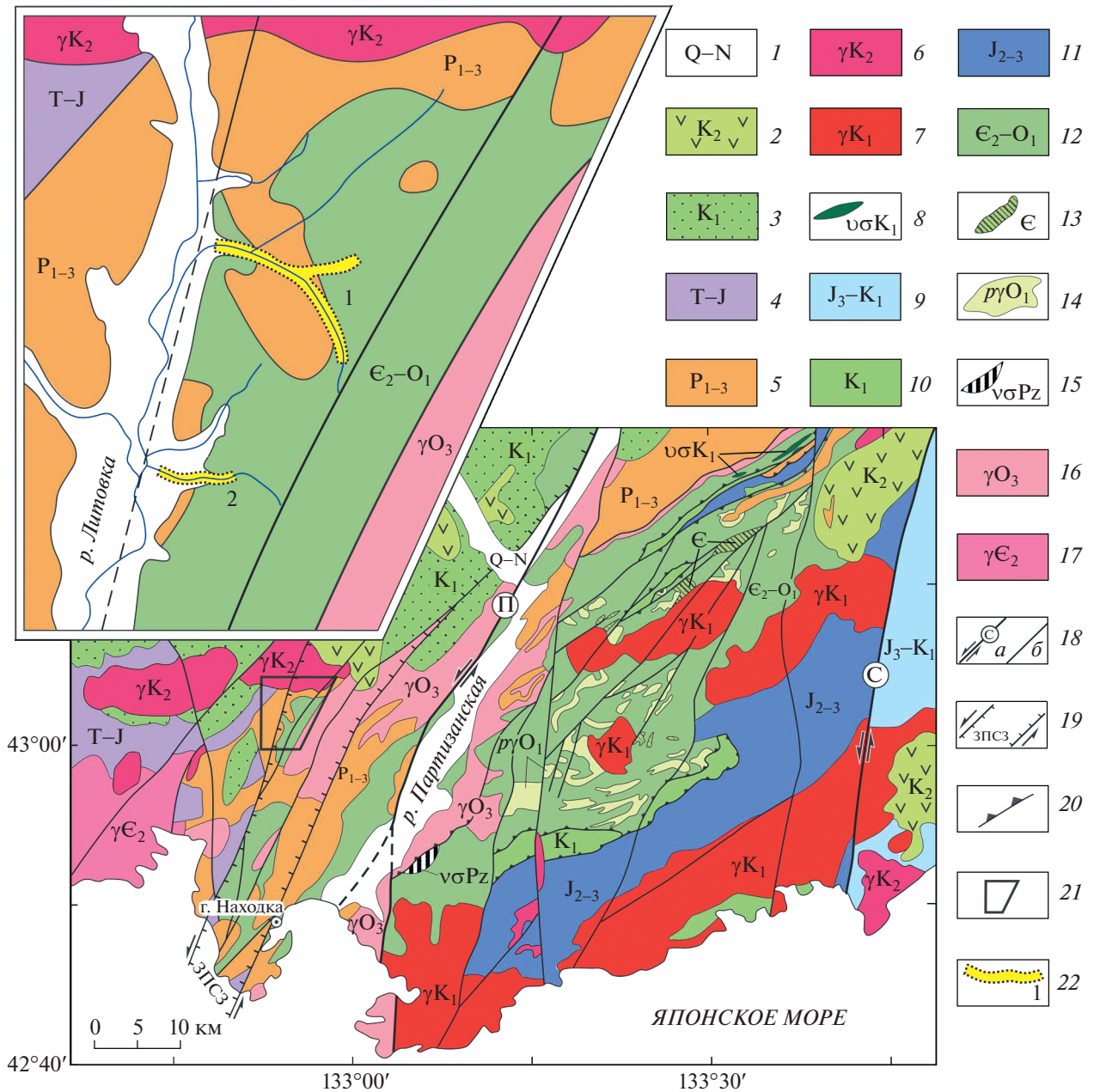


Рис. 1. Схема геологического строения Сергеевского террейна и площади размещения россыпей с платиновыми минералами, по [2–4], с изменениями и добавлениями. 1–8 – Перекрывающие и сшивающие комплексы: 1 – аллювиальные отложения (Q–N), 2 – андезиты, риолиты (K_2), 3 – терригенные отложения, базальты, андезиты (K_1), 4 – угленосные терригенные отложения (T–J), 5 – терригенные отложения, известняки (P_{1-3}), 6 – граниты и диориты (γK_2), 7 – граниты (γK_1), 8 – щелочные базиты и ультрабазиты ($\nabla \sigma K_1$); 9–17 – Террейны: 9 – Таухинский. Турбидиты (J_3-K_1) с блоками океанических пород (D–T); 10–11 – Самаркинский. 10 – глаукофановые и зеленые сланцы (K_1), 11 – турбидиты (J_{2-3}) с блоками океанических пород (P–T); 12–17 – Сергеевский. 12 – габбро, диорито- и гранодиорито-гнейсы (ϵ_2-O_1), 13 – плагиогнейсы, кварциты, мрамора (ϵ), 14 – плагиограниты ($\rho \gamma O_1$), 15 – перидотиты, троктолиты ($\nabla \sigma Pz$), 16 – гранодиориты, трондьемиты и граниты (γO_3), 17 – граниты и лейкограниты ($\gamma \epsilon_2$); 18–19 – Разломы: 18 – (a) главные, Сихотэ-Алинский (C) и Партизанский (П), и (б) крупные, 19 – ограничивающие Западно-Партизанскую сдвиговую зону [по 5]; 20 – надвиги; 21–22 – Врезка: 21 – площадь локализации россыпей с платиноидами, 22 – россыпи.

разломной зоне. Гравийно-галечно-валунный материал русловых и пойменных отложений (плейстоцен и голоцен) россыпей аналогичен местным горным породам.

Минералы платиноидов извлечены под стереомикроскопом “Zeiss” Stemi DV4 в количестве нескольких десятков зерен из тонкой фракции хвостов отработки россыпей. Они исследованы в

Таблица 1. Результаты ЭДС-анализа минералов платиноидов из золотых россыпей Южного Приморья, % массы

№ п.п.	N з(т)	Pt	Pd	Rh	Fe	Sn	Cu	As	S
Изоферроплатина. $Pt_{(2.81-2.91)}Fe_{(1.09-1.19)}$									
1	2 (2)	$\frac{89.15-90.35}{89.75}$	—	—	$\frac{9.65-10.85}{10.25}$	—	—	—	—
Изоферроплатина палладистая. $Pt_{(2.62-2.68)}Pd_{(0.18-0.32)}Fe_{(1.06-1.17)}$									
2	2 (3)	$\frac{84.62-85.96}{85.29}$	$\frac{3.20-5.58}{4.39}$	—	$\frac{9.81-10.84}{10.33}$	—	—	—	—
Куперит. $Pt_{(0.93-1.1)}Fe_{(0-0.04)}S_{(0.90-1.04)}$									
3	3 (3)	$\frac{83.71-88.10}{85.99}$	—	—	$\frac{0.01-0.91}{0.54}$	—	—	—	$\frac{11.90-15.38}{13.47}$
Сперрилит. $Pt_{(1.0-1.06)}As_{(1.94-2.0)}$									
4	3 (10)	$\frac{56.44-58.70}{57.43}$	—	—	—	—	—	$\frac{41.30-43.56}{42.57}$	—
Сперрилит с примесью серы. $Pt_{0.99}S_{0.12}As_{1.89}$									
5	1 (1)	57.04	—	—	—	—	—	41.87	1.09
Рустенбургит. $Pt_{2.81}Pd_{0.14}Fe_{0.13}As_{0.13}Sn_{0.79}$									
6	1 (1)	81.40	2.26	—	1.09	13.85	—	1.41	—
Купрородсит. $Cu_{(0.96-1.52)}Rh_{(1.48-1.54)}S_{(4.00-4.50)}$									
7	2 (3)	—	—	$\frac{40.45-43.61}{42.42}$	—	—	$\frac{16.79-25.58}{20.29}$	—	$\frac{34.03-39.60}{37.31}$
Неизвестная фаза $Rh_{1.11}Pt_{0.93}As_{0.96}S_{2.00}; RhPtAsS_2$									
8	1 (1)	42.05	—	26.42	—	—	—	16.68	14.85

Примечание. В числителе диапазон значений, в знаменателе среднее. N з(т) — число зерен (число точек анализа).

Аналитическом центре ДВГИ ДВО РАН по стандартной методике с помощью сканирующих электронных микроскопов (СЭМ) JSM-6490LV и LYRA 3 ХМН, оснащенных энергодисперсионными спектрометрами (ЭДС) соответственно “INCA” Energy X-max и AZtec X-Max 80 Standard.

Помимо самородного золота и МПГ в шлихах установлены: пирит, марказит, пирротин, арсенипирит, халькопирит, сфалерит, галенит и кинноварь; касситерит, шеелит, гематит, магнетит и хромшпинелиды.

Изученные МПГ представлены весьма мелкими кристаллами и зернами сперрилита, изоферроплатины и куперита, а также субмикронными выделениями других МПГ (табл. 1).

Сперрилит, главный МПГ шлихов, под стереомикроскопом имеет вид блестящих темных капелек размером до 0.5 мм. Под СЭМ это — изометричные сглаженные индивиды, нередко полиэдрические с притупленными вершинами и неслучайно искривленными ребрами. Встречен оригинальный двойниковоподобный сросток сложных кристаллов сперрилита близкого состава (рис. 2а и б). Поверхность зерен гладкая и чистая. Редко с

единичными микрополостями. Состав зерен данного арсенида стехиометрический (табл. 1). В одном случае в нем зафиксирована примесь серы — 1.09 мас. % (табл. 1, строка № 5).

Куперит — шаровидные микрочерны (0.2 мм) с губчато-точечной и типично кавернозной поверхностью, местами скорлуповато-слоистой. Их состав близок к стехиометрическому (см. табл. 1). Кроме того, этот сульфид обнаружен и в качестве ксеноморфных выделений совместно с купрородситом и жилковидными фазами железистой платины в кавернах корродированной изоферроплатины.

Изоферроплатина по примесному составу частью палладистая (3.20–5.58 мас. % Pd) (табл. 1, № 2). Периферийные части ее изометричных сложных кристаллов (до 0.15 мм) имеют обычно скорлуповато-кавернозную и локально более грубую “пещеристую” поверхность, редко “рифленую” по ростовым слоям (рис. 2г, на врезке спектр 1). В углублениях корродированных кристаллов встречены тонкие выделения куперита, купрородсита, рустенбургита и неизвестной фазы $RhPtAsS_2$.

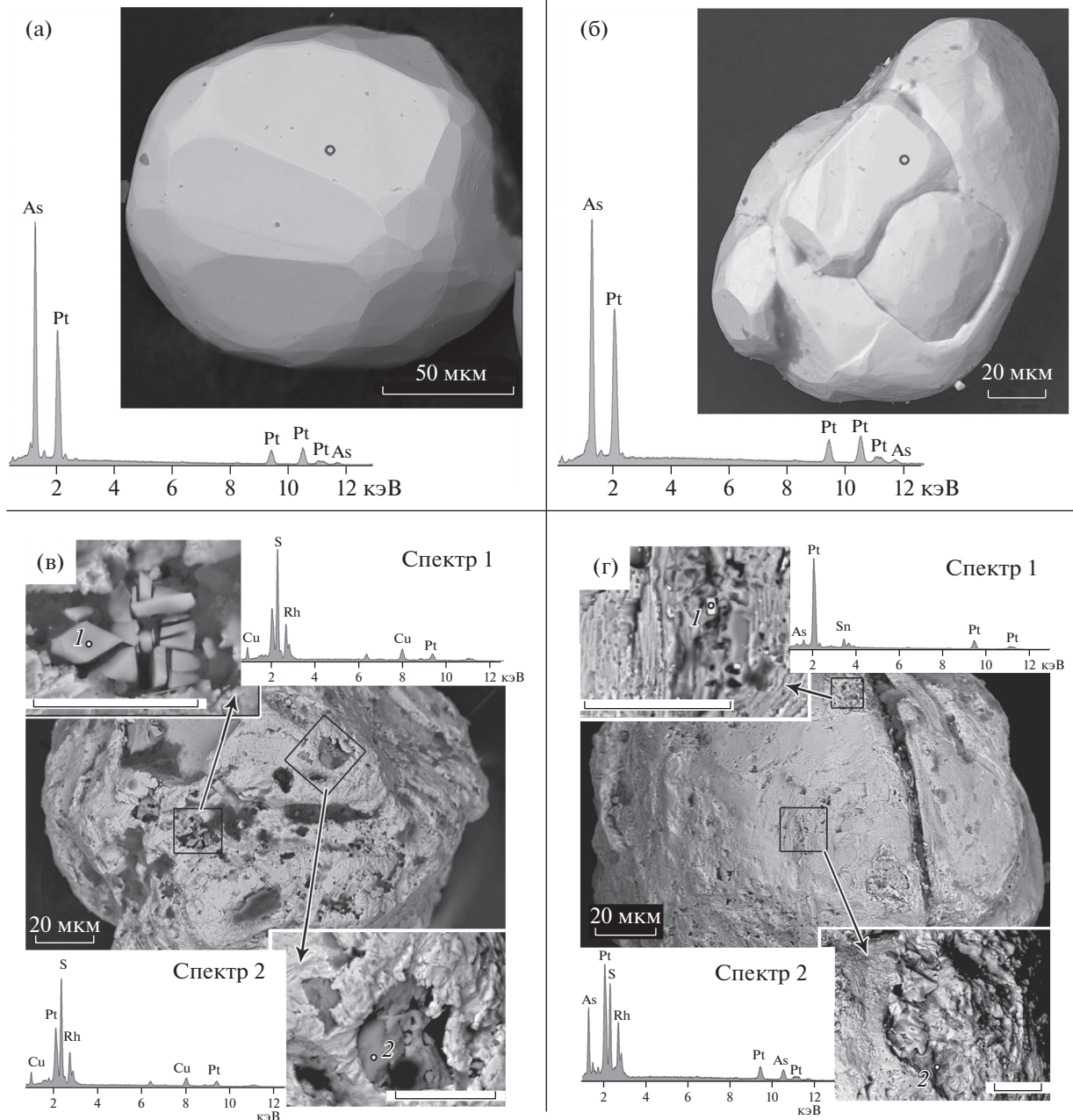


Рис. 2. СЭМ-изображения в отраженных электронах и ЭДС-спектры состава кристаллов сперрилиты (а и б) и изометричных зерен корродированной изоферроплатины с субмикронными включениями в ее кавернах тонких кристаллов и выделений купородсита (в, спектры 1 и 2), кристалликов рустенбургита (г, спектр 1) и зерна неназванной фазы $RhPtAs_2$ (г, спектр 2). На всех врезках размер мерной линейки равен 2 мкм. Точки анализа показаны кружками.

Включения купородсита $CuRh_2S_4$ в виде друзочки тонких (~1 мкм) ромбовидных кристаллов установлены в одной из каверн зерна изоферроплатины. В другой каверне этого же зерна присутствует его бесформенное образование близкого состава со сглаженной поверхностью (рис. 2в, спектры 1 и 2; табл. 1, № 7).

Встреченный в каверне зерна изоферроплатины (рис. 2 г, на врезке спектр 1; табл. 1, № 6) ру-

стенбургит (Pt_3Sn) представлен субмикронными (0,2–0,5 мкм) кубиками и призмочками с примесями (в мас. %) Pd (2,26), As (1,41) и Fe (1,09).

Также зафиксирована неназванная фаза $RhPtAs_2$, микрозерно (4 мкм) которой совместно с куперитом присутствует на дне крупной “пещерной” каверны в изоферроплатине (рис. 2в, спектр 2; табл. 1, № 8).

Такая совокупность минералов платиновой группы, в которой главную роль играют сперрит и изоферроплатина, второстепенную куперит и подчиненную единичные тонкие образования купрородсита, рустенбургита и неназванной фазы $RhPtAsS_2$ (возможно, криптоагрегат миассита с платарситом или боуита с куперитом), соответствует ассоциации МПГ в россыпях платинового минерало-геохимического типа [6]. Источниками их питания считаются как россыпеобразующие формации, так и другие рудные формации платиновых металлов. В частности, расслоенные и дифференцированные интрузии с гидротермалитами и массивы пикрит-габбровых комплексов с сульфидным $Cu-Ni$ -оруденением [6–8].

На рассматриваемой же площади южного блока Сергеевского террейна, к западу от Партизанского глубинного разлома, выходы ультрамафитовых образований и продукты их разрушения в рыхлых осадочных отложениях не известны. Лишь значительно восточнее этого разлома в зонах сдвига-надвиговых дислокаций среди метаморфитов закартированы небольшие массивы и тектонические пластины щелочных базитов и ультрабазитов, перидотитов и троктолитов без рудной нагрузки (рис. 1).

По мнению авторов статьи, для понимания природы МПГ литовских россыпей, локализованных на площади развития сергеевских габброидов фундамента и перекрывающих терригенных осадков, важно подчеркнуть, что в ряду метаморфогенных преобразований метабазитовых пород определяющее значение имели длительные и интенсивные деструкционные процессы различного структурного уровня, начиная с внутризернового. Поэтому очевидна весьма высокая степень диспергирования кристаллического вещества в результате разрушения кристаллических решеток минералов пород с высвобождением при этом металлов, осуществлением трибохимических реакций и переходом (диссипацией) внутренней энергии в тепло. Благоприятной тектонической обстановкой для этого и последующего вовлечения благородных металлов в физико-химические процессы минералогенеза служили сдвиговые зоны катаклаза и рассланцевания ([5, 9] и др.).

Считается, что при господствующей динамике сдвига породных масс и концентрации тектонических напряжений должно происходить приоткрытие преимущественно вертикальной трещинно-порово-капиллярной системы, ориентирующей прямую проницаемость среды в вертикальном направлении, т.е. с глубоких уровней к верхним. В системе при этом также повышается мобильность газовой-жидкой фазы и усиливаются процессы флюидообразования и миграции гидротерм с рудным веществом [5, 9–12].

Последующее отложение твердых минеральных фаз платиноидов, экстрагированных наряду с другими металлами из пород основания террейна, осуществлялось при формировании вкрапленной благороднометалльной самородно-халькогенидной минерализации на геохимических восстановительных барьерах. Этому способствовала распространенность в местах локализации россыпей углеродисто-терригенных отложений перми. Как следует из геологической обстановки (см. рис. 1, врезка), они экранировали флюидопроницаемые сдвиговые зоны.

Генетические представления о возможности мобилизации металлов из дислоцированных метаморфитов и путях миграции рудного вещества на нано- и микроуровне, металлизации кластерных форм благородных металлов при их концентрировании и о барьерно-геохимическом потенциале углеродистых образований, теоретически и экспериментально обоснованы [13–19].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Радкевич Е.А.* Металлогения Южного Приморья // Труды ИГЕМ. Вып. 19. М.: Изд. АН СССР. 1958. 109 с.
2. Геодинамика, магматизм и металлогения Востока России: в 2 кн./ под ред. А.И. Ханчука. Владивосток: Дальнаука, 2006. С. 1–572.
3. *Анохин В.М., Рыбалко В.И., Аленичева А.А., Леликов Е.П. и др.* Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1000000 (третье поколение). Серия Дальневосточная. Лист К-(52), 53. Владивосток, СПб.: ФГУП ВСЕГЕИ. 2011. 332 с.
4. *Крук Н.Н., Голозубов В.В., Ханчук А.И., Александров И.А., Чащин А.А., Скляр Е.В.* Интрузивные комплексы Сергеевского террейна – древнейшего блока Южного Приморья. Владивосток: Дальнаука, 2018. 56 с.
5. *Уткин В.П., Митрохин А.Н., Неволин П.Л., Саядян Г.Р., Сорочкин Б.К.* Структурно-геодинамический фактор в распределении золотой минерализации Южного Приморья // ДАН. 2004. Т. 394. № 5. С. 654–658.
6. *Мочалов А.Г.* Россыпи платиновых металлов // Россыпные месторождения России и других стран СНГ. М.: Научный мир, 1997. С. 127–165.
7. *Толстых Н.Д., Подлипский М.Ю.* Информативность шлиховых ореолов для поисков платинового оруденения // Геология рудных месторождений. 2010. Т. 52. № 3. С. 221–240.
8. *Мехоношин А.С., Колотиллина Т.Б.* Петролого-геохимические особенности ультрабазитов южного обрамления Сибирского кратона и критерии поисков сульфидно-никелевых руд // Руды и металлы. 2006. № 6. С. 26–30.
9. *Неволин П.Л., Иванов В.В., Коваленко С.В., Митрохин А.Н.* Геодинамика формирования структуры Сергеевского блока кристаллических пород и контроль золотого оруденения (Южный Сихотэ-

- Алинь) // Рудные месторождения континентальных окраин. Владивосток: Дальнаука, 2000. С. 91–112.
10. Пэк А.А. О динамике ювенильных растворов. М.: Наука, 1968. 147 с.
 11. Звягинцев Л.И. Деформация горных пород и эндогенное рудообразование. М.: Наука, 1978. 174 с.
 12. Летников Ф.А., Савельева В.Б., Большев С.П. Петрология, геохимия и флюидный режим тектонитов. Новосибирск: Наука, 1986. 22 с.
 13. Летников Ф.А. Синергетика геологических процессов. Новосибирск. Наука, Сибирское отделение. 1992. 228 с.
 14. Дистлер В.В., Митрофанов Г.Л., Немеров В.К. и др. Форма нахождения металлов платиновой группы и их генезис в золоторудном месторождении Сухой Лог (Россия) // Геология рудных месторождений. 1996. Т. 38. № 6. С. 467–484.
 15. Немеров В.К., Развозжаева Э.А., Спиридонов А.М., Сухов Б.Г., Трофимов Б.А. Нанодисперсное состояние металлов и их миграция в углеродистых при-родных средах // ДАН. 2009. Т. 425. № 2. С. 233–236.
 16. Развозжаева Э.А., Спиридонов А.М., Цыханский В.Д., Васильева И.Е., Прокопчук С.И. Платина в углеродистом веществе руд месторождения Сухой Лог // Геология и геофизика. 2002. Т. 43. № 3. С. 286–296.
 17. Матвиенко В.Н., Калашиников Ю.Д., Нарсеев В.А. Кластеры – протоформа нахождения драгметаллов в рудах и минерализованных породах // Руды и металлы. 2004. № 5. С. 28–36.
 18. Матвиенко В.Н., Ненахов В.М., Калашиников Ю.Д., Левин В.Л. Роль природных кластеров благородных металлов как источника рудного вещества при формировании месторождений // Вестник ВГУ. Сер. геология. 2018. № 3. С. 36–49.
 19. Наумов Г.Б., Беркелиев Т.К., Миронова О.Ф. Теория метаморфогенного рудообразования в последнюю четверть века // Минералог. журнал. 2018. Т. 40. № 4. С. 21–34.

ABOUT THE NATURE OF PLATINOID MINERALS FROM GOLD PLACERS OF SOUTHERN SIKHOTE-ALIN (PRIMORYE)

V. V. Ivanov^{a, #}, Academician of the RAS A. I. Khanchuk^a, and L. G. Kolesova^a

^a Far Eastern Geological Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russian Federation

[#]E-mail: d159327@yandex.ru

Gold placers of two streams that drain dislocated terrigenous carbon-bearing Permian deposits overlying Cambrian metagabbroids and metadiorites within the Sergeevsky terrane in the southern Sikhote-Alin were studied. SEM analysis of a fine-grained fraction of placers' heavy concentrates discovered microcrystals of csperryllite, isoferroplatinum, cooperite and rustenburgite, as well as submicron cuprorhodite, rustenburgite and unnamed phase RhPtAsS₂ developed on their corroded surface. It was concluded that the metamorphic rocks served as a source of fluids and platinoids, whose crystallogenesis occurred at the geochemical reduction barrier in the dislocated carbonaceous-terrigenous deposits of the overlying complex. Key words: platinum, palladium, rhodium, chalcogenides, natural alloys, placers, carbonaceous sediments, tectonites, Sikhote-Alin.

Keywords: platinum, palladium, rhodium, chalcogenides, natural alloys, placers, carbonaceous sediments, tectonites, Sikhote-Alin