

Петрология и вулканология

УДК 549.27 (571.56)

DOI 10.31242/2618-9712-2018-25-3-36-52

Платиноносные россыпи Сибирской платформы: минеральные ассоциации и их возрастные характеристики как индикаторы проявления крупных изверженных провинций на древней платформе

А.В. Округин^{*}, О.В. Якубович^{**},^{***}, Р. Эрнст^{****},^{*****}, Ж.Ю. Дружинина^{***}

^{*}Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, Якутск, Россия

^{**}Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, Санкт-Петербург, Россия

^{***}Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

^{****}Dept. of Earth Sciences, Carleton University, Ottawa, Canada

^{*****}Томский государственный университет, Томск, Россия

a.v.okrugin@diamond.ysn.ru

Аннотация. На Сибирской платформе широко распространены россыпепроявления минералов платиновой группы (МПГ), занимающие огромные территории бассейнов рек Вилюй, Лена, Алдан, Анабар и Оленек, но не имеющие до сих пор установленных коренных источников. Данные россыпи имеют различную минералого-геохимическую характеристику, обусловленную разной ассоциацией платиновых минералов и их типохимическими особенностями. Очевидно, что эти площадные платиноносные россыпи связаны с различными продуктивными платиноносными мафит-ультрамафитовыми формациями, которые формируются в крупных изверженных провинциях (КИП). На основе сопоставления минералого-геохимических особенностей платиноносных россыпей и базит-ультрабазитовых комплексов, Re-Os и ¹⁹⁰Pt-⁴He изотопных возрастов минералов Ir-Os-Ru состава, железистой платины, изоферроплатины, сперрилита из россыпей и возрастов крупных магматических событий на Сибирской платформе нами делаются попытки установить возможные материнские породы россыпной платины. Показано, что источниками изученных платиноносных россыпей могут быть погребенные мафит-ультрамафитовые проявления докембрийских крупных изверженных событий, происходивших в 1900, 1865, 1750, 1700, 1640, 1500, 1350, 1258, 725 млн. лет назад. Фанерозойские продуктивные платиноносные месторождения связаны с рифейским и среднепалеозойским рифтогенезом, палеозойско-мезозойским эпизодом проявления Сибирского мантийного плюма, проявившегося в гигантских извержениях базитового и щелочно-ультраосновного магматизма, а также активными мезозойскими тектономагматическими преобразованиями на южной окраине Сибирской платформы.

Ключевые слова: минералы платиновой группы, крупные изверженные провинции, ¹⁹⁰Pt-⁴He датирование, мафит-ультрамафиты, россыпи, Сибирская платформа.

Благодарности. Авторы благодарят всех коллег, принимавших участие в выполнении лабораторных, аналитических работ и способствовавших проведению данных комплексных исследований. Работа выполнена в рамках НИР ИГАБМ СО РАН (№ 0381-2016-0003; 0381-2016-0004) и поддержке РФФИ (проект № 17-05-00390).

**Platinum-bearing placers of Siberian platform:
mineral associations and their age characteristics
as indicators of large igneous
provinces manifested in old platform**

A.V. Okrugin^{*}, O.V. Yakubovich^{**,*}, R. Ernst^{***,****}, Zh.Yu. Druzhinina^{***}

^{*}*Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, Yakutsk, Russia*

^{**}*Institute of Precambrian Geology and Geochronology RAS, Saint Petersburg, Russia*

^{***}*Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia*

^{****}*Department of Earth Sciences, Carleton University, Ottawa, Canada*

^{*****}*Tomsk State University, Tomsk, Russia*

a.v.okrugin@diamond.ysn.ru

Abstract. *The Siberian platform is known for numerous placers of platinum-group minerals (PGM), covering vast areas in river basins of Vilyui, Lena, Aldan, Anabar, and Olenek. However, bedrock sources for the deposits are still unknown. These placers have different mineralogical-geochemical characteristics, which is due to their varying PGM associations and specific typochemical features of the minerals. It is obvious that these Pt placers of large areal extent are associated with different productive platiniferous primary rocks forming within large igneous provinces (LIPs) of mafic-ultramafic formations. In an attempt to determine likely parent rocks for the placers we compared their mineralogical-geochemical compositions with those of basic-ultrabasic rock complexes. Correlation was also made between the Re-Os and ¹⁹⁰Pt–⁴He ages of minerals of the Ir-Os-Ru composition, ferroan platinum, isoferroplatinum, and sperrylite from the placers and times of major magmatic events that occurred in the Siberian platform. The results obtained suggest that the sources for the studied Pt placers might be buried mafic-ultramafic rocks which are manifestations of major Precambrian magmatic events occurred 1900, 1865, 1750, 1700, 1640, 1500, 1350, 1258, 725 million years ago. The Phanerozoic productive Pt deposits were formed in relation to Riphean and Middle Paleozoic rift, a Paleozoic-Mesozoic episode of the manifestation of the Siberian mantle plume in the form of giant eruptions of basic and alkali-ultrabasic magmatic rocks as well as active Mesozoic tectonomagmatic transformations in the southern margin of the Siberian platform.*

Key words: platinum-group minerals, large igneous provinces, ¹⁹⁰Pt–⁴He dating, mafic-ultramafic rocks, placers, Siberian platform.

Acknowledgments. *The authors thank all colleagues of the staff participated in implementation of laboratory, analytical work and contributed to the conduct of these complex studies. The work was carried out as part of the scientific research of the Diamond and Precious Metal Geology Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (No. 0381-2016-0003; 0381-2016-0004) and supported by the Russian Foundation for Basic Research (project No. 17-05-00390).*

Введение

На Сибирской платформе, помимо платиноносных россыпей с достоверно известными материнскими породами (Кондер, Инагли, Чиней, Гули, Норильск и др.) [1–3, 11, 16–19, 36, 37, 39], широко распространены площадные золото-платиноносные россыпепроявления (рис. 1), занимающие огромные территории бассейнов рек Вилюй, Лена, Алдан, Анабар и Оленек [4, 6, 13, 14, 21, 22, 25, 26, 41, 44, 55], но не имеющие до сих пор установленных коренных источников на поверхности. Площадные платиноносные россыпи, вероятно, связаны с погребенными КИП различных мафит-ультрамафитовых формаций, имеющими многие продуктивные пла-

тиноносные комплексы. Как и сопутствующее золото, МПГ могут поступать в современные россыпи из погребенных промежуточных коллекторов в процессе многократного циклического переотложения металла через базальные конгломераты рифея, венда, кембрия и перми. При этом мелкая фракция (менее 0,5–1 мм) тонкопластинчатого «плавучего» металла мигрирует на большие расстояния, формируя площадные ореолы рассеяния, оторванные от своих материнских пород.

КИП представляют собой ареалы крупнообъемных ($\geq 0,1$ млн. км³) извержений лав, главным образом базитового (ультрабазитового) состава внутриплитного генезиса, и характеризующихся

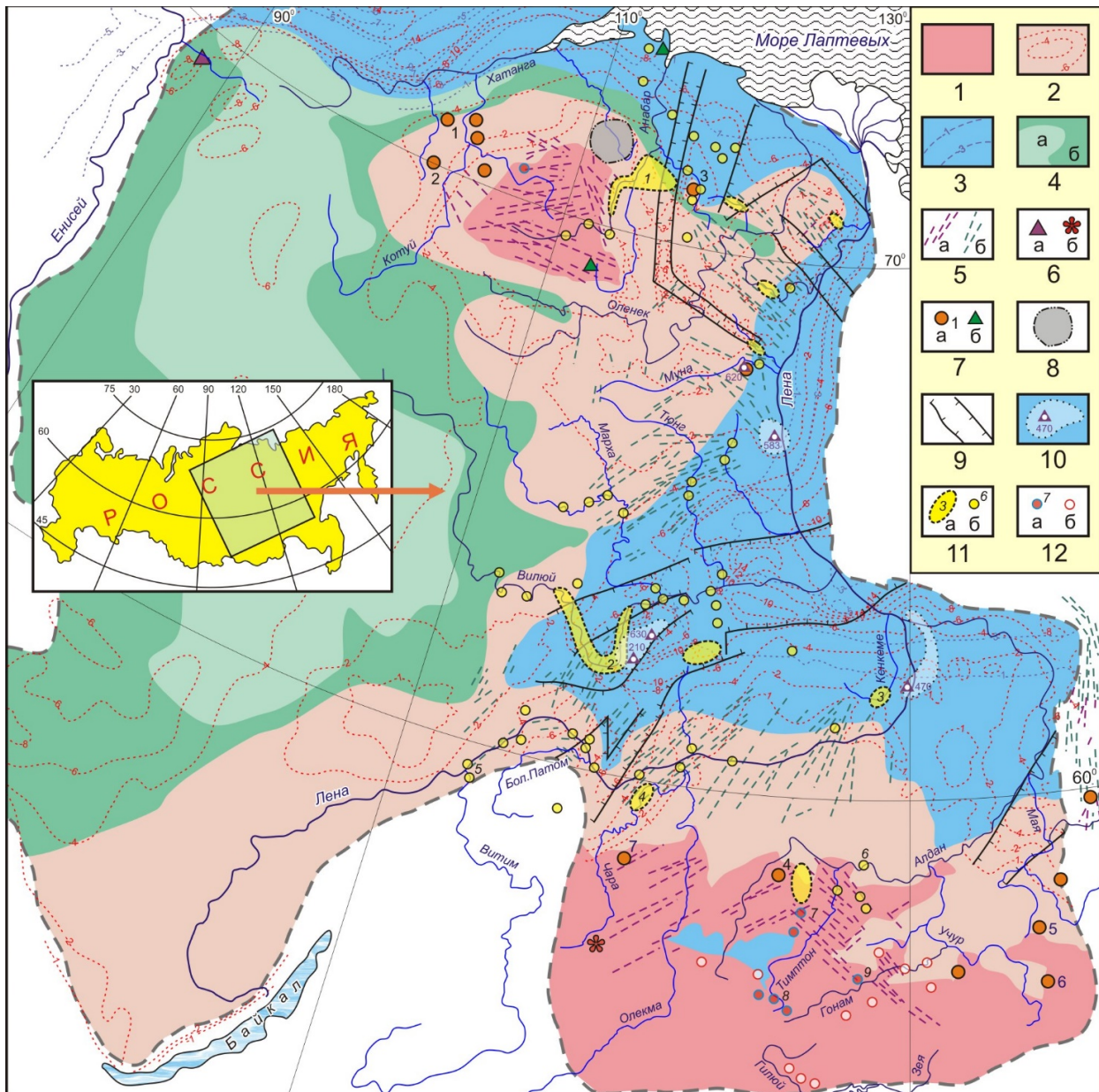


Рис. 1. Расположение платиноносных россыпей на Сибирской платформе:

1 – кристаллический фундамент; 2 – рифей-палеозойский чехол с изогипсами поверхности фундамента (км) по [34]; 3 – юрско-кайнозойские отложения с изогипсами подошвы (км) по [34]; 4 – пермотриасовые траппы (а – вулканогенные, б – интрузивные); 5 – дайковые пояса базитов (а – докембрийские, б – среднепалеозойские); 6 – платиноносные интрузивы (а – Норильск, б – Чиней); 7 – концентрически-зональные массивы (а) щелочно-ультраосновных пород (1 – Гули, 2 – Буор Урях, 3 – Томтор, 4 – Инагли, 5 – Кондер, 6 – Чад, 7 – Мурун и др.) и щелочных пикритов (б); 8 – Попигайский кратер; 9 – границы палеорифтогенных структур; 10 – предполагаемые области размыва погребенных выступов фундамента под юрскими отложениями с абсолютными отметками по скважинам (м); 11 – площадные (а) и локальные (б) ореолы рассеяния МПГ (1 – Анабар, 2 – Вилуй, 3 – Кенкеме, 4 – Чара, 5 – Карстовый, 6 – Макылган); 12 – платина-сперрилитовая (а) ассоциация в россыпях (7 – Унга, 8 – Тимптон, 9 – Гонам) и находки МПГ неустановленного парагенезиса (б). Схема основана на Тектонических картах Якутии 1973 и 1999 гг.

Fig. 1. Scheme of location of platinum-bearing placer deposits in Siberian Platform:

1 – crystalline basement; 2 – Riphean-Paleozoic cover with basement surface isohypses (km) [34]; 3 – Jurassic-Cenozoic rocks with base isohypses (km) [34]; 4 – Permian-Triassic traps (a – volcanogenic, b – intrusive); 5 – mafic dike belts (a – Precambrian, b – Middle Paleozoic); 6 – Pt-bearing intrusives (a – Norilsk, b – Chiney); 7 – concentric-zoned massifs (a) of alkali-ultrabasic rocks (1 – Guli, 2 – Buor Uryakh, 3 – Tomtor, 4 – Inagli, 5 – Kondyor, 6 – Chad, 7 – Murun, etc.) and alkali picrites (b); 8 – Popigay crater; 9 – boundaries of paleoriftogenic structures; 10 – assumed areas of erosion of basement protrusions buried under Jurassic deposits with elevations from boreholes (m); 11 – regional (a) and local (b) dispersion haloes of PGM (1 – Anabar, 2 – Vilyui, 3 – Kenkeme, 4 – Chara, 5 – Karstovyi, 6 – Makylgan); 12 – platinum-sperrylite association (a) in placers (7 – Unga, 8 – Timpton, 9 – Gonam) and finds of PGM with uncertain paragenesis (b). Schematic map is based on Tectonic maps of Yakutia (1973 and 1999)

малой продолжительностью (< 5 млн. лет) или многократными краткосрочными импульсами общей продолжительностью в несколько десятков миллионов лет [53]. Как правило, они включают в себя непосредственно вулканические толщи (платобазальты) и систему даек, силлов и расслоенных интрузий и могут быть связаны с кислым магматизмом, карбонатитами и кимберлитами. Формирование КИП, с которыми связаны уникальные месторождения медно-никелевых руд, платиновых металлов, редких элементов и других полезных ископаемых, известные на древних платформах, в том числе на территории Сибирской платформы и Канадского щита (Лаврентии), объясняется воздействием мантийных плюмов на континентальную кору.

Для установления материнских пород, питающих такие площадные россыпи, кроме знания их минералого-геохимических особенностей и парагенетических ассоциаций, необходимо иметь и возрастные данные самих минералов. На основе сопоставления минералого-геохимических особенностей МПГ и базит-ультрабазитовых комплексов, возрастов платиновых металлов из ряда россыпей, датированных Re-Os и ^{190}Pt - ^4He методами, и возрастов крупных магматических событий на Сибирской платформе нами делаются попытки установить возможные материнские породы россыпной платины.

Методы

На протяжении многих лет нами изучены типоморфные особенности МПГ из россыпей Сибирской платформы и выделены среди них определенные минералого-геохимические ассоциации [21, 22, 25, 26, 55]. Это, несомненно, указывает на разные формационные типы коренных источников изученных россыпей. Химический состав минералов определялся на микрозондовом анализаторе «Camebax-Micro» и сканирующем микроскопе JSM-6480LV в лаборатории рентгеноспектральных методов анализа в ИГАБМ СО РАН. В качестве эталонов применялись стандартизированные минералы и металлы высокой чистоты и их устойчивых интерметаллических сплавов. Определение кристаллической решетки МПГ выполнялось на дифрактометрах D2 Phaser (ИГАБМ) и Bruker (СПбГУ).

В дополнение к ранее определенным Re-Os модельным возрастам Ru-Ir-Os минералов из россыпей рек Вилюй, Кемпедяй и Чара [27] нами для Fe-Pt сплавов и сперилита из ряда россыпей определялся изотопный возраст новым ^{190}Pt - ^4He методом, разработанным Ю.А. Шуколюковым с соавторами [46]. Плотные кри-

сталлические структуры самородных металлов, в том числе и платины, обладают уникальной способностью прочно удерживать радиогенный гелий, в то время как в кристаллической структуре силикатов, оксидов, фосфатов, сульфидов и других минералов гелий обычно не удерживается. В металлах при равновесных условиях атомы гелия не растворяются и наиболее прочно газ в металлах связан с вакансионными порами. Гелий легко переходит в объем поры из междоузлий, но с большим трудом выходит обратно и только при высоких температурах, сопоставимых с температурой плавления. Это делает маловероятными потери гелия самородной платиной в реальных более низкотемпературных геологических условиях и позволяет использовать соотношение ^{190}Pt и ^4He для геохронологических целей.

Эффективность этого метода показана на примере сходства результатов датирования изоферроплатины Гальмоэнанского и Кондерского массивов с данными геологического и изотопного возраста коренных источников. Высокая устойчивость радиогенного He в природном неметаллическом соединении платины – сперилите позволяет использовать его также в качестве гелиевого геохронометра [49], что подтверждается хорошей сопоставимостью между датировками сперилита и изоферроплатины из Кондерского массива [20]. Анализ МПГ из изученных нами россыпей на ^4He проводился на масс-спектрометрическом комплексе MSU-G-01-M в ИГГД РАН.

По результатам U-Pb датирования даек и силлов долеритов на территории Южной Сибири и Северной Лаврентии установлены хорошо сопоставимые по возрасту 9 крупных изверженных провинций, что указывает на их пространственную сопряженность в интервале 1,8–0,7 млрд. лет [52]. Это расширяет важность каждой из этих КИП для сопоставления их с возрастом МПГ из россыпей. Синтез всех проведенных исследований позволяет нам в какой-то степени приблизиться к выявлению возможных коренных источников площадных платиноносных россыпей Сибирской платформы.

Минералого-геохимические типы платиноносных россыпей Сибирской платформы

На востоке Сибирской платформы в бассейне р. Вилюй ещё с начала 20-го века известны площадные косовые золото-платиноносные россыпи, которые добывались кустарным способом [4, 6]. Затем подобные находки золота и платины были установлены на северо-востоке Сибирской платформы в бассейнах рек Анабар, Оленек, Эйэжит, Молодо, Моторчуна и др. [21, 25,

41, 44], где они представляют сейчас комплексные золото-платино-алмазоносные россыпи, из которых, возможно, попутное извлечение с алмазом не только благородных металлов, но и самоцветных камней, а также редкометалльных минералов [21, 23, 24, 28, 30].

В результате комплексных топоминералогических исследований платиноносных россыпей на востоке Сибирской платформы были установлены следующие основные минералогическо-геохимические типы ассоциаций МПГ: родиевой железистой платины (вилуйский тип); родий-иридиевой железистой платины (анабарский); иридиевой железистой платины (среднененский); иридиевой изоферроплатины (инаглинский); иридий-осмиевый (гулинский тип) и платина-сперрилитовая ассоциация. Они, кроме последнего, названы по преобладающему минералу с указанием характерной примеси, которая, как правило, обусловлена типоморфной геохимической специализацией коренных источников.

Платиновые металлы в россыпях р. Вилюй, преимущественно, представлены Fe-Pt сплавами, слагающими хорошо окатанные чешуйчатые и округлые зерна размером, редко превышающим 0,5 мм. Они имеют неупорядоченную гранцентрированную решетку, т.е. по номенклатуре Fe-Pt сплавов [51] относятся к железистой платине. Вилуйская железистая платина характеризуется высокими содержаниями Rh и Ru, образуя на диаграмме составов (рис. 2, А) четко выраженный Rh-Ru тренд, противоположный другому ярко проявленному Ir-тренду изоферроплатины (интерметаллида Pt₃Fe с упорядоченной структурой) из Инаглинской россыпи. Инаглинский массив является представителем платформенного алданского (инаглинского) подтипа общеизвестного уральско-аласкинского типа платиноносных зонально-концентрических ультрамафических массивов [12]. Для изоферроплатины из уральских россыпей также наблюдается Ir-тренд, полностью совпадающий с инаглинским (рис. 2, Б). Между этими разными векторами эволюции расположен промежуточный Rh-Ir тренд, образуемый составами Fe-Pt сплавов из хромитовых руд Красногорского массива – альпинотипных ультрамафитов островодужного типа Корякского нагорья [9].

В бассейне р. Анабар железистая платина часто характеризуется высокими содержаниями как Rh, так и Ir (рис. 2, Б). Составы МПГ из комплексной золото-платино-алмазоносной россыпи р. Маят (р. Анабар) заполняют все пространство диаграммы. Наблюдается преобладание «вилуйского» типа Rh-платины, но значительное количество платины выстраивается в

пределах «инаглинского» Ir-тренда, а часть зерен занимает промежуточное положение. Следовательно, можно предположить наличие здесь всех вышеуказанных типов коренных источников или одного сложного комплекса пород, совмещающих все эти типохимические признаки в виде Rh-Ir железистой платины.

Составы железистой платины из золотоносных россыпей рек Чара, Кенкеме (среднее течение р. Лена), руч. Карстовый (низовья р. Витим) так же, как и из россыпи переката Макылган (р. Алдан), характеризуются Ir-трендом изменения состава и практически полностью попадают в поле «инаглинской» Ir-изоферроплатины (рис. 2, В). Большинство минералов данных россыпей Средней Лены имеет неупорядоченную структуру и поэтому они выделяются в самостоятельный «среднененский тип» иридиевой железистой платины.

На юге Алданского щита в золотоносных россыпях Верхнетимптонского района находки платины и сперрилита были известны с 1914 г. [4]. Позднее установлено более широкое развитие ареалов распространения платина-сперрилитовых ассоциаций в аллювиальных отложениях Алдано-Станового щита [3, 13, 21, 26, 35, 38, 39]. Данная ассоциация платиновых минералов распространена в основном в областях развития архейских глубокометаморфизованных пород и, по-видимому, связана с расслоенными базит-ультрабазитовыми интрузивами. В таких россыпях ассоциирующая со сперрилитом платина обычно характеризуется низкими содержаниями других примесей, а иногда представлена практически чистой самородной платиной.

В золотоносной россыпи руч. Унга Нимгеркан установлено присутствие зерен сперрилита с округленными формами кристаллов и кавернозными углублениями на поверхности [21]. В полированных срезах видно, что периферическая часть таких зерен состоит из пористой самородной платины, а ядро сложено монолитным сперрилитом. В этом случае очевидно образование самородной платины в результате термической диссоциации сперрилита при метаморфических преобразованиях первичных руд, что подтверждено экспериментально [10, 56].

Минералы Ru-Ir-Os состава в россыпях р. Вилюй присутствуют в подчиненном количестве, обычно 1–2 % от всего объема всех МПГ. Они встречаются в основном в виде мелких самостоятельных зерен пластинчатой формы размером до 0,2–0,3 мм, редко наблюдаются в форме микровключений в железистой платине. По составу они на номенклатурной диаграмме [54] занима-

ПЛАТИНОНОСНЫЕ РОССЫПИ СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ

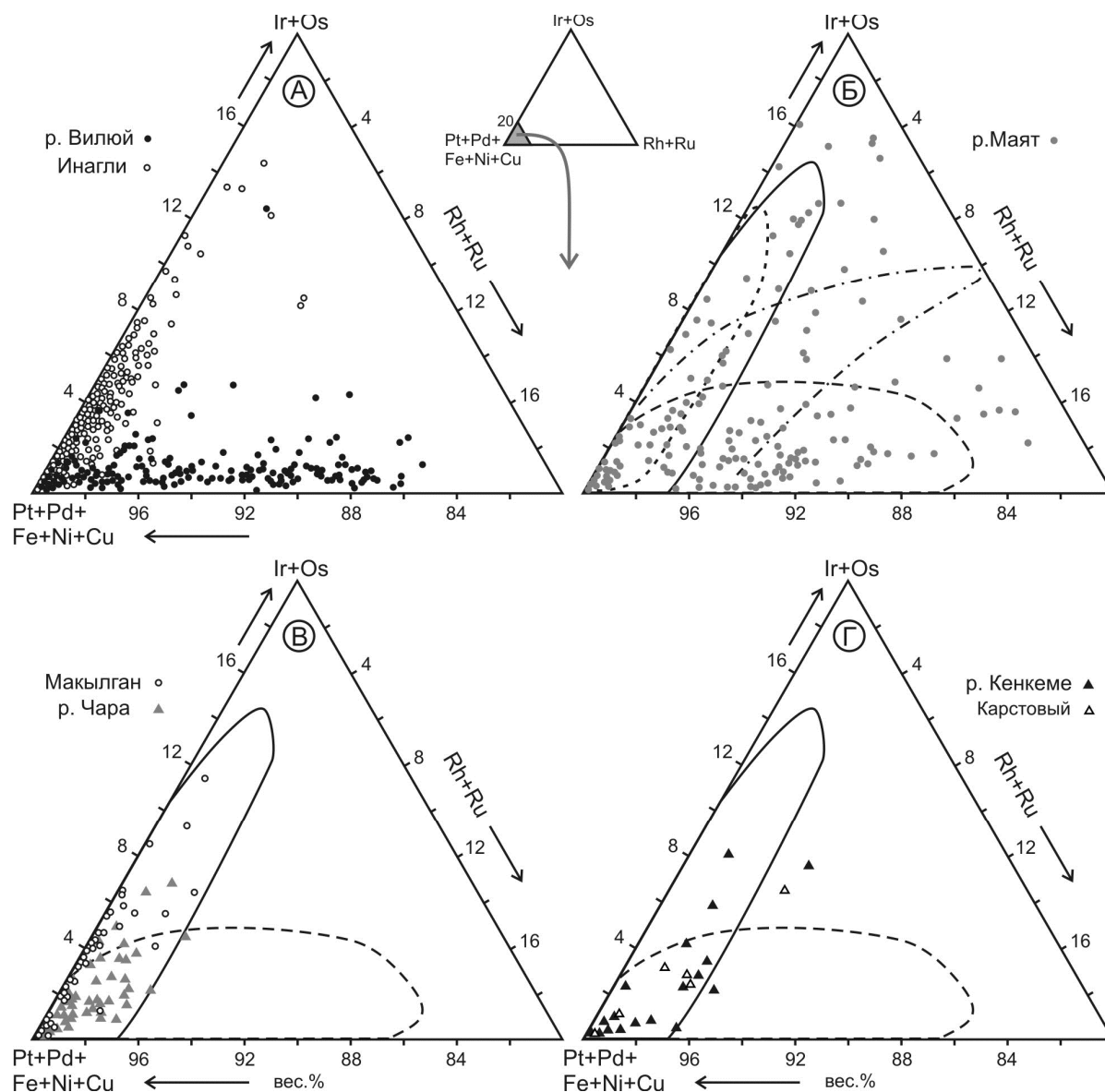


Рис. 2. Составы железистой платины и изоферроплатины из россыпей:

А – р. Вилюй и массив Инагли; Б – рр. Маят, Биллях, Хара-Мас (р. Анабар); В – Макылган (р. Алдан) и р. Чара; Г – р. Кенкеме и руч. Карстовый (р.Витим). Поля составов МПГ: р. Вилюй (штриховая линия, n = 162); Инагли (сплошная, n = 155); россыпи Кушва, Нижний Тагил и др. (пунктирная, n = 169), Урал [50] и Красногорского массива (штрихпунктирная, n = 200) Корякского нагорья [9]

Fig. 2. Composition of ferroan platinum and isoferroplatinum from placers:

A – Vilyui R. and Inagli massif; B – Mayat, Bilyakh, Khara-Mas (Anabar R.); V – Makylgan (Aldan R.) and Chara R.; G – Kenkeme R. and Karstoviy (Vitim R.). Compositional fields of PGM: Vilyui R. (dash lime, n = 162), Inagli (solid line, n = 155), Kushva, Nizhnii Tagil and other placers (dotted line, n = 169), Urals [50] and Krasnogorsk massif (dash-and-dot line) of the Koryak highland [9]

ют компактное поле в центре диаграммы, вытянутое от осмия к рутению через область рутениридосмина (рис. 3, А). Только в россыпи р. Кемпендяй (приток р. Вилюй) установлено одно зерно, попадающее в поле иридия. Поле вилюйских Ru-Ir-Os сплавов целиком попадает в область таковых из хромититовых руд альпинотипных ультрамафитов Красногорского массива [9].

В россыпях бассейна р. Анабар Ru-Ir-Os сплавы встречаются чаще, достигая местами до 10% от общего количества МПГ. На диаграмме состава они охватывают более широкую область начиная с осмиевой вершины диаграммы до середины поля рутения и в целом схожи с Ru-Ir-Os сплавами Красногорского массива (рис. 3, А). Основная масса самостоятельных зерен тяготеет к полю осмия, подобно таковым из

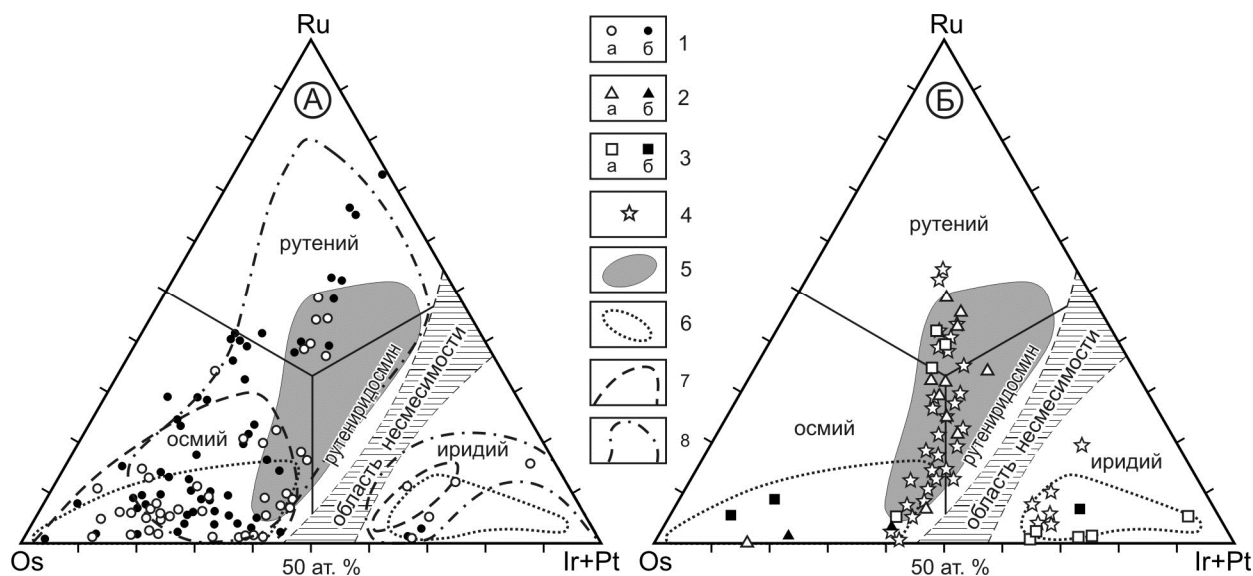


Рис. 3. Состав Ru-Ir-Os сплавов из россыпей:

1 – самостоятельные зерна (а) и включения в железистой платине (б) россыпей Маят, Биллях, Хара-Мас (р. Анабар); 2 – то же, р. Чара; 3 – то же, р. Кенкеме; 4 – самостоятельные зерна, распространенные по р. Лена на отрезке р. Витим – р. Намана. Поля составов минералов: 5 – р. Виллюй (n = 47); 6 – россыпи Инагли (n = 108); 7 – россыпи Гулинского массива (n = 74) [17, 37]; 8 – Красногорского массива (n = 91) [9]

Fig 3. Composition of Ru-Ir-Os minerals from placers:

1 – single grains (a) and inclusions in ferroan platinum (b) from placers Mayat, Billyakh, Khara-Mas (Anabar R.); 2 – the same, Chara R.; 3 – the same, Kenkeme R.; 4 – single grains distributed along Lena R. (from Vitim R. to Namana R.). Compositional fields of minerals: 5 – Vilyuy R. (n = 47); 6 – Inagli massif placers (n = 108); 7 – Guli massif placers (n = 74) [17, 37]; 8 – Krasnogorsk massif (n = 91) [9]

россыпей Гулинского массива, что ещё раз подтверждает возможную связь МПГ россыпей р. Анабар с комплексами ультраосновных щелочных пород и карбонатитов (УЩК). Незначительная часть зерен относится к иридию.

В среднем течении р. Лена на отрезке от устья р. Витим до впадения рек Олекма и Намана отмечаются находки минералов Ru-Ir-Os состава с подчиненным количеством железистой платины. По составу они идентичны минералам из россыпей бассейна р. Виллюй (рис. 3, Б), но часть зерен попадает в поле иридия. Подобные минералы обнаружены также в россыпях рек Чара и Кенкеме, в которых Ru-Ir-Os сплавы кроме самостоятельных зерен обнаруживаются иногда и в форме микровключений в иридиевой железистой платине. Такие включения по составу соответствуют минералам из инаглинской россыпи.

В россыпи Инаглинского массива минералы Ru-Ir-Os состава преимущественно встречаются в виде мелких включений в изоферроплатине. При этом осмий образует обычно пластинчатые включения или сростания, а иридий – округлые включения или извилистые симплектитовые сростания. Только в очень редких случаях фиксируются находки самостоятельных гомогенных зерен самородного иридия. Содержание Ru в инаглинском осмии и иридии не превышает 5 вес.% или 15 ат.% (рис. 3).

Таким образом, среди Ru-Ir-Os минералов рассмотренных россыпей можно выделить следующие ассоциативные группы:

1. Самостоятельные зерна осмия, рутениридосмина и рутения, которые встречаются в россыпях р. Виллюй и среднего течения р. Лена, включая россыпи рек Чара и Кенкеме. Такие составы минералов с характерным субвертикальным трендом вдоль границы осмия и рутениридосмина к рутению свойственны ультрамафитовым комплексам офиолитов. Так в изученных россыпях эти минералы иногда встречаются и в форме включений в матрице сопутствующей железистой платины, то можно предположить, что минералы Ru-Ir-Os и Fe-Pt составов здесь имеют парагенетические связи. Однако отличие железистой платины россыпей р. Виллюй (родиевый тип) от иридиевой железистой платины россыпей бассейна среднего течения р. Лена позволяет предположить наличие двух разных генетических типов платинометаллических источников для этих соседних районов.

2. Для Ru-Ir-Os минералов россыпей бассейна р. Анабар характерна более широкая область вариации составов, включая и поле иридия (рис. 3, А). Частая встречаемость Ru-Ir-Os сплавов как в виде самостоятельных зерен, так в форме микровключений в Rh-Ir железистой платине свидетельствует о их парагенетической связи.

Возможные генетические типы коренных источников такой ассоциации МПГ будут рассмотрены чуть позже.

3. Иридий-осмиевая ассоциация в россыпях Гулинского массива является основным МПГ и характеризуется более стабильным составом, не выходящим за пределы полей иридия и осмия. Поэтому они выделяются в особый самостоятельный иридий-осмиевый тип.

4. Подобной характеристикой обладают минералы иридия и осмия из россыпи Инаглинского массива, но в отличие от гулинских, они здесь встречаются в резко подчиненном количестве и практически всегда находятся в форме включений в изоферроплатине. Только иридий очень редко наблюдается в виде самостоятельных зерен. В таком случае их парагенетическая связь не вызывает сомнений.

5. Включения осмия и иридия, подобные инаглинским, обнаружены в иридиевой железистой платине из россыпей рек Чара и Кенкеме. Хотя по химическим особенностям минералы из этих россыпей схожи с МПГ Инагли, но различие в упорядоченности структур изоферроплатины Инагли и железистой платины среднененских россыпей не позволяет объединять их в одну группу. Таким образом, коренные источники россыпей среднего течения р. Лена по геохимическим характеристикам могут быть аналогами платиноносных пород Инагли, но по другим показателям (геодинамической обстановке формирования, возрасту и др.) они вероятно являются иными рудно-формационными образованиями.

Таким образом, развитие различных минерало-геохимических типов ассоциаций МПГ в россыпях Сибирской платформы обусловлено наличием источников разных формационных типов: от самых тугоплавких ультраосновных пород, несущих хромититовые руды с Ru-Ir-Os минералами до позднемагматических дериватов дифференцированных интрузивов основных пород с сульфидными рудами, содержащими существенно Pt-Pd фазы и гидротермально-метасоматические образования с Pd-Au минерализацией [21, 26, 28]. Если коренные источники руд россыпей, связанных с определенными массивами (Норильск, Гули, Инагли и др.), очевидны и непосредственно установлены, то для многих площадных ореолов рассеяния МПГ сложно подобрать аналоги из известных типов месторождений. Для прогнозирования возможных коренных источников МПГ таких россыпей необходимо краткий экскурс по основным типам платиноносных формаций.

Итак, как показывают исследования многих авторов, парагенетические ассоциации как ос-

миевых, так и платиновых минералов широко развиты в ультрамафитовых комплексах офиолитов, причем минеральный и химический составы МПГ закономерно изменяются. Например, если в высокомагнезиальных гипербазитах основания офиолитов преобладают высокотемпературные Ru-Ir-Os минералы, то в переходной зоне и верхней железистой ультрамафитовой серии возрастает доля менее тугоплавких Rh-Pt-Pd фаз [8]. Как было показано Г.Г. Дмитренко [9], среди офиолитов Корякского нагорья наличие платиноидной минерализации зафиксировано лишь в ультрамафитах островодужного типа, являющихся продуктами наиболее полного истощения мантийных перидотитовых комплексов. В перидотитовом основании преимущественно развиты минералы Ru, Ir и Os, в дунитовой зоне, включающей жильные пироксены, к ним присоединяется и изоферроплатина, а в такситовом комплексе преобладают собственно платиновые минералы. При этом установлена парагенетическая связь МПГ с хромитовыми сегрегациями или рассеянной вкрапленностью хромита в дунитах, гарцбургитах и пироксенитах.

Р. Колман в своем обобщающем труде об офиолитовых комплексах мира [15] отмечает, что породы кумулятивного комплекса могли образоваться в результате фракционирования пикритовой магмы, близкой коматиитам. Если наличие докембрийских офиолитов в пределах Сибирской платформы не исключается, то существование на древней платформе фанерозойских офиолитовых ассоциаций вряд ли возможно. В то же время на Сибирской платформе имеется много признаков проявления крупных событий пикритового магматизма. К ним относится Маймечя-Котуйская провинция, где сохранились многочисленные сложные вулканоплутонические комплексы УЩК. К таким районам можно отнести и бассейн р. Анабар, где находятся полихронный Томторский массив УЩК рифей-среднепалеозойского возраста, а также эффузивно-интрузивные тела пермтриасовых щелочных пикритобазальтов, меланефеленитов и трахидолеритов, аналогичных породам Маймечя-Котуйской провинции [31, 42].

Непосредственная связь платины из россыпей р. Анабар с комплексами УЩК доказывается находкой в родий-иридиевой железистой платине из россыпи р. Маят силикатного включения, состоящего из диопсида, нефелина, флогопита, титаномагнетита, амфибола и имеющего расчетный валовый состав, близкий мельтейгиту [23]. Находки включений осмия в дунитах [2], Fe-Pt сплавов в хромититах [19] Гулинского

массива указывают на разнообразие МПГ в различных породах и рудах. Таким образом, можно предположить широкие вариации изменения как минерального состава, так и химических особенностей этих МПГ в зависимости от изменяющегося породного состава сложных комплексов УЩК, вызванных разными условиями становления массивов.

Изотопный возраст МПГ и возможные коренные источники платиноносных россыпей на Сибирской платформе

В платформенных условиях формирование крупных платиноносных магматогенных месторождений связано с выходом глубинных мантийных мафит-ультрамафитовых расплавов, обогащенных тугоплавкими компонентами, в том числе и элементами платиновой группы (ЭПГ). Наиболее масштабно это проявляется в результате прорыва мантийных плюмов, способных расколоть континенты и даже суперконтиненты. Палеомагнитными, изотопно-геохронологическими и геохимическими исследованиями базито-

вых пород на Сибирском и Северо-Американском (Лаврентия) кратонах [52] фиксируются девять хорошо коррелируемых эпизодов формирования КИП в период 1,9–0,7 млрд. лет назад, показанных в средней колонке (рис. 4). Это свидетельствует о том, что указанные кратоны в тесном контакте находились более 1,2 млрд. лет, совместно пережив все катаклизмы формирования двух суперконтинентов Нуны (1,7–1,3 млрд. лет) и Родинии (1,1–0,7 млрд. лет).

В.С. Шкодинским на основе развиваемой им модели горячей гетерогенной аккреции Земли и фракционирования на ней глобального магматического океана [43] показана значительно меньшая первичная аккреционная температура нижней мантии, чем верхней. Из чего следует, что в раннем докембрии не было восходящих потоков более горячего вещества – нижнемантийных плюмов – основных движущих сил современных геологических процессов. В конце протерозоя геологическая часть магматического океана затвердела, а существенного подъема плюмов из нижней мантии ещё не было, что вы-

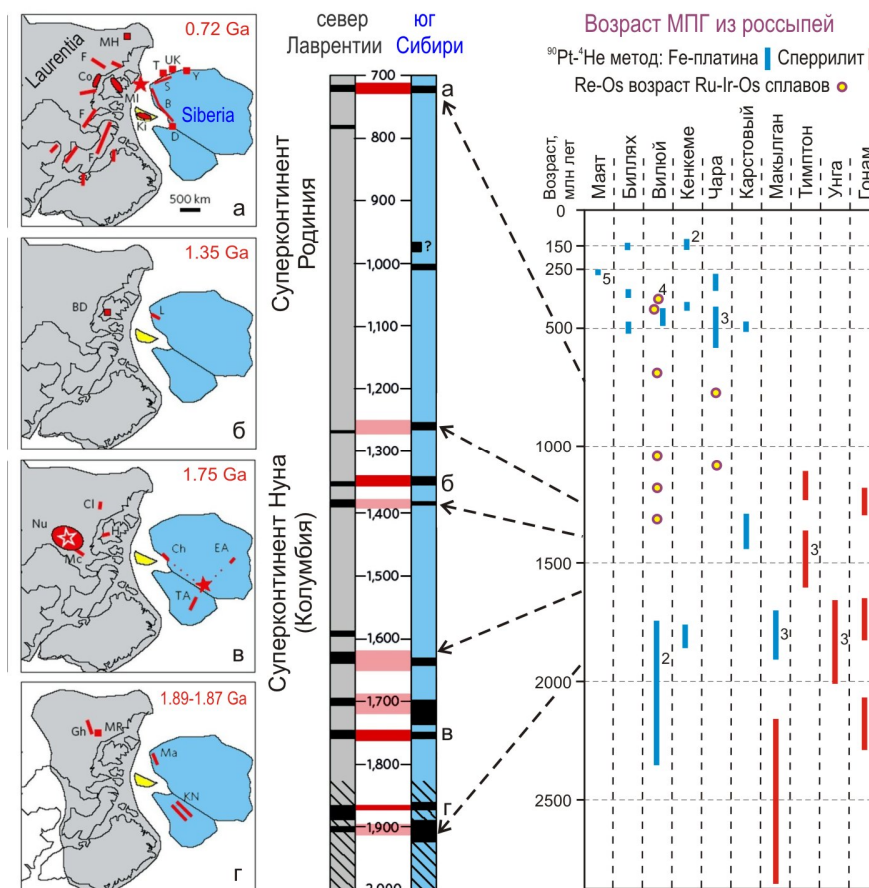


Рис. 4. Сопоставление времени проявления КИП на юге Сибирского и севере Канадского (Лаврентия) кратонов [52] с возрастом МПГ из россыпей Сибирской платформы
Fig. 4. Correlation between time of LIPs manifestation in southern Siberian and northern Canadian (Laurentia) cratons [52] and ages of Pt-group minerals from Siberian platform placers

звало в криогении глобальное оледенение на Земле. С течением времени нижняя мантия разогревалась под влиянием горячего ядра и произошла инверсия распределения температуры с подобными современному геотермическому градиенту очертаниями. В фанерозое тектоническая и магматическая активность на Земле неуклонно возрастает, что связано с увеличением количества и размеров поднимающихся нижнемантийных плюмов. На Сибирской платформе крупные проявления базитового магматизма фиксируются по многим рифейским и среднепалеозойским рифтогенным структурам. В пермотриасовое время с внедрением Сибирского суперплюма связано формирование огромных масс сибирских траппов и щелочно-ультраосновных комплексов на Сибирской платформе.

В правой колонке (рис. 4) показаны значения Re-Os и $^{190}\text{Pt}-^4\text{He}$ изотопных возрастов МПГ из изученных нами россыпей Сибирской платформы [32, 48, 57]. Цифры рядом с линиями диапазона возрастов – количество образцов, по которым получена изохрона. Как видно из этой таблицы, разброс значений возрастов МПГ очень широкий, даже в пределах россыпей, приуроченных к одной реке. Это можно объяснить тем, что зрелые площадные россыпи на Сибирской платформе формируются в течение очень длительного периода в процессе неоднократного циклического переотложения устойчивого в экзогенных условиях терригенного материала через базальные конгломераты рифея, венда, кембрия и перми из многих первичных коренных источников, начиная с архея и кончая мезозойскими отложениями. В связи с этим нам необходимо, исходя из возрастных характеристик отдельных минералов, их минералого-геохимических типоморфных особенностей и учета времени проявления КИП в связи с геодинамическими обстановками, прогнозировать возможные генетические типы платиноносных коренных источников.

Например, возраст 261 ± 13 млн. лет железистой платины из россыпи Маят, полученный $^{190}\text{Pt}-^4\text{He}$ методом по 5 зернам [32, 57], наряду с установлением в ней силикатного включения мельтейгитового состава, позволяет уверенно предположить в качестве коренного источника МПГ пермотриасовые комплексы щелочно-ультраосновных пород. В то же время в россыпи р. Биллях, соседнего притока р. Анабар, возраст 3 зерен железистой платины варьирует от 495 до 152 млн. лет. Здесь приходится искать альтернативные выводы, одним из которых может быть продолжительное время проявления ультраосновного щелочного магматизма в Восточном Прианабаре. Это фиксируется станов-

лением Томторского массива в период от рифея до среднего палеозоя и проявлением пикритового магматизма в мезозойское время.

Самый большой разброс наблюдается в возрастах МПГ из вилюйских россыпей. Возрастные $^{190}\text{Pt}-^4\text{He}$ значения для Pt-Fe твердых растворов из россыпей р. Вилуей разделены на два кластера: данные по двум образцам составляют изохрону 2015 ± 403 млн. лет, а третий образец дает возраст 442 ± 70 млн. лет. Полученные ранее Re-Os методом модельные возрасты минералов Ru-Ir-Os состава из россыпей р. Вилуей и его притока Кемпендяй колеблются от 1320 до 370 млн. лет [27]. Такие широкие вариации возраста пока сложно объяснить, но нельзя исключить варианты разных источников для части Ru-Ir-Os минералов, занимающих промежуточное возрастное положение. Для железистой платины вполне приемлемо существование 2 разновозрастных источников – протерозойских и раннепалеозойских. Эти россыпи приурочены к Сунтарскому горстовому поднятию, в пределах которого под юрскими отложениями Вилуейской синеклизы залегают породы фундамента на глубине всего несколько сотен метров (рис. 1). Такая благоприятная геологическая обстановка может обеспечить поступление в современные россыпи парастерической (пространственно совмещенной) ассоциации МПГ, золота, алмаза и многих других полезных компонентов, имеющих разный возраст – от архея до мезозоя.

Схожие картины мы наблюдаем и для МПГ из россыпей рек Чара, Кенкеме и руч. Карстовый (бассейн среднего течения р. Лена). В россыпи р. Кенкеме докембрийские МПГ могут попадать через нижнеюрские базальные конгломераты, непосредственно залегающие на породах фундамента всего на глубине 470–500 м в пределах Якутского выступа (рис. 1). В подножии Якутского погребенного поднятия В.М. Мишниным по геофизическим данным [29] предполагается существование мощного протяженного линейного субмеридионального абиссолита (Великая Дайка Якутии) аналога Великой Дайки Родезии.

Другим установленным под юрскими отложениями выступом фундамента является Мунское сводовое поднятие. С его размывом можно увязать возможное поступление докембрийских ценных металлов в россыпи рек Муна, Моторчуна, Тюнг, Линде и др. В нижнем течении р. Муна под кембрийскими толщами известняков и доломитами венда на глубине 620 м скважиной вскрыто интрузивное тело щелочных габброидов поперечником до 6 км, расположенное в гранитогнейсах приподнятого блока фундамента. По изотопно-геохронологическим данным

предполагается, что становление Мунского тела имело место 2326 млн. лет назад [40]. Таким образом, можно констатировать факт широкого проявления на Сибирской платформе протерозойского щелочно-основного магматизма.

Докембрийские возрасты получены для платина-сперрилитовой ассоциации МПГ, широко распространенных в россыпях Алданского щита. Возраст сперрилитов из россыпей рек Тимптон, Унга-Нимгеркан и Гонам варьирует в среднем в пределах 1900–440 млн. лет. Широкий разброс значений возраста сперрилитов, возможно, объясняется влиянием дефектов и примесей на проводящие свойства минерала, что вызывает понижение энергии активации миграции радиогенного гелия [49]. Этому могли способствовать метаморфические воздействия, вызывающие в некоторых случаях, как было изложено выше, термическое разложение сперрилита с образованием пористой чистой платины. Даже начальные стадии термического превращения сперрилита, по-видимому, могут вызвать появление микроскопически незаметных значительных дефектов в кристаллической структуре минерала и исказить его гелиевый возраст.

На юге Сибирской платформы было установлено широкое развитие преимущественно докембрийских крупных полидифференцированных интрузивов перидотит-пироксенит-анортосит-габбровой формации с малосульфидным платинометалльным оруденением [3]. С протерозойским Чинейским массивом на западной окраине Алданского щита связаны россыпи, где основным минералом является сперрилит, как наиболее устойчивая в экзогенных условиях фаза [16].

В россыпи переката Макылган (р. Алдан) возраст Ir-железистой платины (1711–1791 млн. лет в среднем по 3 образцам) сопоставим с возрастом подобных минералов рек Вилюй и Кенкеме (1828±166). Таким образом, сходные типохимические характеристики (иридиевость железистой платины) и близкие возрасты позволяют достаточно уверенно отнести источники данных россыпей к одному генетическому типу платиноносных минерализаций. Итак, можно предположить, что время образования МПГ, питавших Макылганские россыпи, коррелируется со временем становления палеопротерозойской Тимптонской крупной изверженной провинции, датированной по дайковым поясам Анабарского щита, Байкальской зоны и Алданского щита, имеющим возраст 1759–1752 млн. лет [52]. Однако более древний возраст сперрилита (2,5 млрд. лет) из россыпи Макылган вполне может указывать на присутствие здесь и иного источника этого минерала.

Кроме докембрийских источников МПГ, которые могут быть экспонированы на поверхности только на выступах кристаллического основания платформы или на погребенных поднятиях фундамента и формировать современные россыпи через промежуточные коллектора, платиноносные россыпи иногда находятся в непосредственной связи со своими источниками. К ним относятся россыпи, связанные с Норильским сульфидным месторождением [11], щелочно-ультраосновными массивами Гулинский и Буор Урах [1, 2, 17, 18, 37]. Есть некоторые минералого-геохимические и возрастные признаки МПГ, которые опосредованно указывают на возможную связь россыпи с определенными источниками, но они требуют более достоверного подтверждения.

Наиболее вероятные фанерозойские платинометалльные источники могут быть связаны с многочисленными магматическим формациями базит-ультрабазитового состава. Известно, что с континентальными рифтами связаны проявления щелочно-ультраосновного магматизма, с которыми связаны платинометалльные месторождения. Первый и наиболее полный тектоноформационный анализ позднедокембрийского рифтогенеза Сибирской платформы приводится в работе Б.Р. Шпунта [45], где была показана пространственная сопряженность с линейно вытянутыми рифтовыми структурами базитовых дайковых поясов. Они служат реликтивными маркерами разветвлений рифтовых систем и отображают степень деструкции древних плит. Формирование массивов УЩК и генетически связанных с ними тел пикритов и пикритовых порфириров происходило в пострифтовой стадии позднего рифея. Со среднего палеозоя начинался новый рифтогенный этап эволюции Сибирской платформы [7].

В.В. Гайдуком [5] описывается сложное строение Вилюйской синеклизы, заложившейся на месте среднепалеозойской рифтовой системы, где в позднем девоне – раннем карбоне формировались горсты и грабены с большими амплитудами подвижек. Установлена следующая последовательность развития Вилюйской палеорифтовой системы: 1 – стадия пологой депрессии; 2 – стадия «сводового поднятия» и массового излияния эффузивов континентальной оливин-базальтовой формации; 3 – стадия активного формирования рифтовых долин. В конце раннего карбона рифтогенный режим сменяется режимом синеклизы.

Таким образом, широкое распространение площадных россыпей мелкой платины в пределах Вилюйской синеклизы не является случайным фактом. Такие россыпи, вероятно, связаны

с погребенными КИП различных мафит-ультрамафитовых формаций, имеющими многие продуктивные платиноносные комплексы. МПГ, как и сопутствующее золото, могут поступать в современные россыпи из погребенных промежуточных коллекторов в процессе перетолжения металла. Подобным образом происходит миграция металла также из более древних рифтогенных структур, к которым приурочены другие типы платиноносных россыпей-проявлений.

Заключение

Приведенные данные по типоморфным особенностям и возрастным характеристикам разных платиноносных россыпей Сибирской платформы позволяют связывать происхождение платиноносных россыпей Сибирской платформы с мафит-ультрамафитовыми проявлениями крупных изверженных событий на Сибирской платформе, происходивших в 1900, 1865, 1750, 1700, 1640, 1500, 1350, 1258, 725 млн. лет назад [47, 52]. Продуктивные платиноносные магматиты связаны с рифейским и среднепалеозойским рифтогенными процессами. Многие месторождения ЭПГ формировались в результате прорыва Сибирского суперплюма, проявившегося в гигантских извержениях базитового и щелочно-ультраосновного магматизма, а также активными мезозойскими тектономагматическими преобразованиями на южной окраине Сибирской платформы [33].

Таким образом, минералого-геохимические особенности МПГ и их возрастные характеристики можно использовать как индикаторы проявления крупных изверженных провинций на древней платформе. Полученные результаты имеют предварительный характер, показывают определенные закономерности соответствия разных минералого-геохимических ассоциаций МПГ и их возрастов с разновозрастными базит-ультрабазитовыми комплексами, что несомненно указывает на необходимость продолжения подобных исследований

Литература

1. Баданина И.Ю., Малич К.Н., Гончаров М.М., Туганова Е.В. Благороднометалльные россыпи Гулинского массива (север Сибирской платформы): новые данные о необычных минеральных ассоциациях золота и платиноидов // Самородное золото: типоморфизм минеральных ассоциаций, условия образования месторождений, задачи прикладных исследований. М.: ИГЕМ РАН, 2010. Т. 1. С. 56–58.
2. Балмасова Е.А., Смольская Л.С., Лопатина Л.А., Лопатин Г.Г., Лазаренко В.Г., Малич К.Н. Самородный осмий и иридоосмин Гулинского массива // ДАН. 1992. Т. 323, № 4. С. 748–751.
3. Богнибов В.И., Кривенко А.П., Изох А.Э., Толстых Н.Д., Глотов А.И. и др. Платиноносность ультрабазит-базитовых комплексов юга Сибири. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1995. 151 с.
4. Высоцкий Н.К. Платина и районы ее добычи. Ч. 5. Обзор месторождений платины вне Урала. М.: Изд-во АН СССР, 1933. 240 с.
5. Гайдук В.В. Вилуйская среднепалеозойская рифтовая система. Якутск: ЯФ СО АН СССР, 1988. 128 с.
6. Грунвальд П.В. Горные богатства Якутии. Якутск: Якутгосиздат, 1927. 127 с.
7. Гусев Г.С., Петров А.Ф., Фрадкин Г.С. и др. Структура и эволюция земной коры Якутии. М.: Наука, 1985. 248 с.
8. Дистлер В.В., Крячко В.В., Лапутина И.П. Эволюция парагенезисов платиновых металлов в альпинотипных гипербазитах // Геология рудных месторождений. 1986. № 5. С. 16–33.
9. Дмитренко Г.Г. Минералы платиновой группы альпинотипных ультрамафитов. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 1994. 134 с.
10. Евстигнеева Т.Л., Ким А.А., Некрасов Я.В. О деарсенизации сперрилита в природе // Минералогический журнал. 1990. Вып. 12, № 3. С. 90–96.
11. Зимоглядов Б.Н. О россыпной платине в Норильской районе // Магматизм, литология и вопросы рудоносности Сибири: Труды ЗСО ВМО. Вып. 1. Новосибирск, 1974. С. 169–174.
12. Кабри Л.Дж., Налдретт А.Дж. Природа распределения и концентрации элементов платиновой группы в различных геологических средах // Минералогия. Секция С. 10: Доклады. М.: Наука, 1984. № 10. С. 10–27.
13. Ким А.А., Лескова Н.В., Волкоморов В.Ф. Состав платиновой минерализации в золотоносных россыпях Верхнетимптонского района // Самородные металлы в изверженных породах. Якутск: ЯФ СО АН СССР, 1985. № 1. С. 114–117.
14. Ким А.А., Панков В.Ю., Уютов В.И., Лескова Н.В. Минералогия и генезис минералов платиновых металлов из аллювиальных объектов Центрального Алдана // Самородное металлообразование в магматическом процессе. Якутск: ЯНЦ СО РАН, 1991. С. 111–135.
15. Колман Р.Г. Офиолиты. М.: Мир, 1979. 262 с.
16. Кривенко А.П., Изох А.Э., Толстых Н.Д., Гонгальский Б.И. Устойчивость минералов платины и палладия при разрушении сульфидных руд // ДАН. 1995. Т. 342, № 5. С. 640–643.

17. Лихачев А.П., Кириченко В.Т., Лопатин Г.Г. и др. К особенностям платиноносности массивов щелочно-ультраосновой формации // ЗВМО. 1987. № 1. С. 122–125.
18. Малич К.Н., Когарко Л.Н. Вещественный состав платиноидной минерализации Бор-Урхского массива (Маймеча-Котуйская провинция, Россия) // ДАН. 2011. Т. 440, № 6. С. 806–810.
19. Малич К.Н., Рудашевский Н.С. О коренной минерализации платиноидов хромититов Гулинского массива // ДАН. 1992. Т. 325, № 5. С. 1026–1029.
20. Мочалов А.Г., Якубович О.В., Бортников Н.С. ^{190}Pt - ^4He возраст платинометаллических рудопроявлений щелочно-ультраоснового массива Кондер (Хабаровский край, Россия) // ДАН. 2016. Т. 469, № 5. С. 602–606.
21. Округин А.В. Россыпная платиноносность Сибирской платформы. Якутск: ЯФ Изд-ва СО РАН, 2000. 184 с.
22. Округин А.В., Граханов С.А., Селиванова В.В., Попов А.А. Золото и платина в алмазоносных россыпях Западной Якутии // Наука и образование. 2000. №3. С. 19–22.
23. Округин А.В., Зайцев А.И., Борисенко А.С. и др. Золото-платиноносные россыпи бассейна р. Анабар и их возможная связь с щелочно-ультраосновными магматитами севера Сибирской платформы // Отечественная геология. 2012. №5. С. 11–21.
24. Округин А.В., Земнухов А.Л., Иванов П.О. Минералы редких и радиоактивных элементов в комплексных золото-платина-алмазоносных россыпях бассейна р. Анабар // Наука и образование. 2014. №1. С. 67–74.
25. Округин А.В., Избеков Э.Д., Шпунт Б.Р., Лескова Н.В. Минералы платиновых металлов антропогенных отложений Вилуйской синеклизы и Анабарской антеклизы // Типоморфизм и геохимические особенности минералов эндогенных образований Якутии. Якутск: ЯНЦ СО РАН, 1985. С. 40–50.
26. Округин А.В., Ким А.А. Топоминералогия платиноидов из россыпей восточной части Сибирской платформы // Редкие самородные металлы и интерметаллиды коренных и россыпных месторождений Якутии. Якутск: ЯНЦ СО РАН, 1992. С. 77–102.
27. Округин А.В., Костянов А.И., Шевченко С.С., Лазаренков В.Г. Модельный Re-Os возраст минералов платиновой группы из «вилуйских» россыпей востока Сибирской платформы // ДАН. 2006. Т. 410, № 3. С. 372–375.
28. Округин А.В., Мазур А.Б., Земнухов А.Л., Попков П.А., Слепцов С.В. Ассоциация палладистого золота с минералами платиновой группы в россыпях бассейна р. Анабар Сибирской платформы // Отечественная геология. 2009. № 5. С. 3–11.
29. Округин А.В., Мишин В.М., Андреев А.П., Бекренев К.А. Топоминералогическая характеристика потенциально рудоносных объектов Якутского погребенного поднятия (восток Сибирской платформы) // Отечественная геология. 2010. № 5. С. 13–22.
30. Округин А.В., Охлопков С.С., Граханов С.А. Комплексные россыпепроявления благородных металлов и самоцветов в бассейне р. Анабар (северо-восток Сибирской платформы) // Отечественная геология. 2008. № 5. С. 3–17.
31. Округин А.В., Толстов А.В. Петрогеохимическая характеристика сиенит-щелочно-ультраоснового силикатного комплекса пород Томторского массива (северо-восток Сибирской платформы) // Отечественная геология. 2017. № 5. С. 56–66.
32. Округин А.В., Якубович О.В., Эрнст Р., Журавлев А.И., Дружинина Ж.Ю., Гедз А.М. Парагенезисы платиновых металлов в россыпях Сибирской платформы, их возраст и связь с крупными изверженными событиями // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России. Т. 1. Якутск, 2018. С. 117–121.
33. Парфенов Л.М., Попеко Л.И., Томуртогоч О. Проблемы тектоники Монголо-Охотского орогенного пояса // Тихоокеанская геология. 1999. № 5. С. 24–43.
34. Протопопов Ю.Х. Тектонические комплексы платформенного чехла Вилуйской синеклизы: Препринт. Якутск, 1993. 86 с.
35. Разин Л.В., Васюков В.С., Избеков Э.Д., Миронов Е.П. Россыпная платиноносность Центрально-Алданской металлогенической области // Платина России. М.: Геоинформарк, 1994. С. 159–165.
36. Рожков И.С., Кицул В.И., Разин Л.В., Боршианская С.С. Платина Алданского щита. М.: Изд-во АН СССР, 1962. 119 с.
37. Сазонов А.М., Романовский А.Э., Гринев О.М. и др. Благороднометаллическая минерализация Гулинской интрузии // Геология и геофизика. 1994. № 9. С. 51–65.
38. Толстых Н.Д., Кривенко А.П., Батуринов С.Г. Особенности состава самородной платины из различных ассоциаций минералов элементов платиновой группы // Геология и геофизика. 1996. № 3. С. 39–46.
39. Толстых Н.Д., Орсов Д.А., Кривенко А.П., Изох А.Э. Благороднометаллическая минерализация в расслоенных ультрабазит-базитовых массивах юга Сибирской платформы. Новосибирск: Параллель, 2008. 194 с.

40. *Томишин М.Д., Зайцев А.И., Травин А.В., Округин А.В.* Протерозойский массив щелочных габброидов на реке Муна (северо-восток Сибирской платформы) // Региональная геология и металлогения. 2010. № 42. С. 40–48.

41. *Трушков Ю.Н., Избеков Э.Д., Томская А.И., Тимофеев В.И.* Золотоносность Вилюйской синеклизы и ее обрамления. Новосибирск: Наука, 1975. 148 с.

42. *Фролов А.А., Лапин А.В., Толстов А.В. и др.* Карбонатиты и кимберлиты (взаимоотношения, минерогения, прогноз). М.: НИИ-Природа, 2005. 540 с.

43. *Шкодзинский В.С.* Глобальная петрология по современным данным о горячей гетерогенной аккреции Земли. Якутск: Издательский дом СВФУ, 2018. 244 с.

44. *Шпунт Б.Р.* Платиновые минералы четвертичных отложений Анабаро-Оленекского поднятия // Геология рудных месторождений. 1970. №2. С. 123–126.

45. *Шпунт Б.Р.* Позднедокембрийский рифтогенез Сибирской платформы. Якутск: ЯФ СО АН СССР, 1987. 139 с.

46. *Шуколюков Ю.А., Якубович О.В., Мочалов А.Г. и др.* Новый изотопный геохронометр для прямого датирования самородных минералов (^{190}Pt – ^4He метод) // Петрология. 2012. Т. 20, № 6. С. 545–559.

47. *Эрнст Р.Е., Округин А.В., Веселовский Р.В., Камо С.Л., Гамильтон М.А., Павлов В.Э., Сёдерлунд У., Чемберлейн К.Р., Роджерс К.* Куонамская крупная изверженная провинция (север Сибири, 1501 млн. лет): U-Pb геохронология, геохимия и корреляция с синхронным магматизмом других кратонов // Геология и геофизика. 2016. Т. 57, № 5. С. 833–855.

48. *Якубович О.В.* Новый ^{190}Pt – ^4He метод изотопной геохронологии для датирования минералов платины: Автореф. дис. ... канд. геол.-минер. наук. СПб.: СПбГУ, 2013. 20 с.

49. *Якубович О.В., Мочалов А.Г., Служенкин С.Ф.* Сперрилит (PtAs_2) как ^{190}Pt – ^4He геохронометр // ДАН. 2015. Т. 462, № 1. С. 88–90.

50. *Cabri L.J., Feather C.Z.* Platinum-iron alloys: a nomenclature based on study of natural and synthetic alloys // Can. Miner. 1975. V. 13, no. 2. P. 117–126.

51. *Cabri L. J., Harris D. C., Weiser T. W.* Mineralogy and distribution of platinum-group mineral placer deposits of the World // Expl. and Mining Geol. 1996. No. 2. P. 73–167.

52. *Ernst R.E., Hamilton M.A., Söderlund U., Hanes J.A., Gladkochub D.P., Okrugin A.V., Kotlilina T., Mekhonoshin A.S., Bleeker W., LeCheminant A.N., Buchan K.L., Chamberlain K.R., Diden-*

ko A.N. Long-lived connection between southern Siberia and northern Laurentia in the Proterozoic // Nature Geoscience. 2016. V. 9, no. 6. P. 464–469.

53. *Ernst R.E.* Large Igneous Provinces. Cambridge University Press. 2014. 653 p.

54. *Harris D.C., Cabri L.J.* Nomenclature of platinum-group-element alloys: review and revision // Can. Mineral. 1991. V. 29. P. 231–237.

55. *Okrugin A.V.* Mineralogy, types and origin of platinum-bearing placer deposits of the Siberian platform // International Geology Review. 1998. No. 8. P. 677–687.

56. *Vuorelainen Y., Tornroos R.* Spherules after sperrylite from alluvial deposits in Finnish Lapland // Can. Mineral. 1986. V. 24. P. 523–528.

57. *Yakubovich O., Mochalov A., Kotov A., Sluzhenikin S., Okrugin A., Danišik M., McDonald B., Evans N., McInnes B.* ^{190}Pt – ^4He Dating of Platinum Mineralization. Mineral resources in a sustainable world. Proceedings of the 13th Biennial SGA Meeting. Nancy. France, 2015. P. 663–664.

References

1. *Badanina I.Yu., Malich K.N., Goncharov M.M., Tuganova E.V.* Blagorodnometal'nye rossypi Gulinskogo massiva (sever Sibirskoj platformy): novye dannye o neobychnykh mineral'nykh assotsiatsiyakh zolota i platinoidov // Samorodnoe zoloto: tipomorfizm mineral'nykh assotsiatsij, usloviya obrazovaniya mestorozhdenij, zadachi prikladnykh issledovanij. M.: IGEM RAN, 2010. V. 1. S. 56–58.

2. *Balmasova E.A., Smol'skaya L.S., Lopatina L.A., Lopatin G.G., Lazarenko V.G., Malich K.N.* Samorodnyj osmij i iridosmin Gulinskogo massiva // DAN. 1992. V. 323, № 4. S. 748–751.

3. *Bognibov V.I., Krivenko A.P., Izokh A.E., Tolstykh N.D., Glotov A.I. i dr.* Platinonosnost' ul'trabazit-bazitovykh kompleksov yuga Sibiri. Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, 1995. 151 s.

4. *Vysotskij N.K.* Platina i rajony ee dobychi // Ch. 5. Obzor mestorozhdenij platiny vne Urala. M.: Izd-vo AN SSSR, 1933. 240 s.

5. *Gajduk V.V.* Vilyujskaya srednepaleozoj-skaya riftovaya sistema. Yakutsk: YaF SO AN SSSR, 1988. 128 s.

6. *Grunval'd P.V.* Gornye bogatstva Yakutii. Yakutsk: Yakutgosizdat, 1927. 127 s.

7. *Gusev G.S., Petrov A.F., Fradkin G.S. i dr.* Struktura i evolyutsiya zemnoj kory Yakutii. M.: Nauka, 1985. 248 s.

8. *Distler V.V., Kryachko V.V., Laputina I.P.* Evolyutsiya paragenezisov platinovykh metallov v al'pinotipnykh giperbazitakh // Geologiya rudnykh mestorozhdenij. 1986. № 5. S. 16–33.

9. *Dmitrenko G.G.* Mineraly platinovoj gruppy al'pinotipnykh ul'tramafitov. Magadan: SVKNII DVO RAN, 1994. 134 s.

10. *Evstigneeva T.L., Kim A.A., Nekrasov Ya.V.* O dearsenizatsii sperrilita v prirode // Mineralogicheskij zhurnal. 1990. Vyp. 12, № 3. S. 90–96.
11. *Zimoglyadov B.N.* O rossypnoj platine v Noril'skom rajone // V sb. Magmatizm, litologiya i voprosy rudonosnosti Sibiri: Trudy ZSO VMO. Vyp. 1. Novosibirsk, 1974. S. 169–174.
12. *Kabri L.Dzh., Naldrett A.Dzh.* Priroda raspredeleniya i kontsentratsii elementov platinovoj grupy v razlichnykh geologicheskikh sredakh // Mineralogiya. Sektsiya S. 10: Doklady. M.: Nauka, 1984. № 10. S. 10–27.
13. *Kim A.A., Leskova N.V., Volkomorov V.F.* Sostav platinovoj mineralizatsii v zolotonosnykh rossypyakh Verkhnetimptonskogo rajona // Samorodnye metally v izverzhenykh porodakh. Yakutsk: YaF SO AN SSSR, 1985. № 1. S. 114–117.
14. *Kim A.A., Pankov V.YU., Uytov V.I., Leskova N.V.* Mineralogiya i genezis mineralov platinovykh metallov iz alyuvial'nykh ob'ektov Tsentral'nogo Aldana // Samorodnoe metalloobrazovanie v magmaticheskom protsesse. Yakutsk: YaNTs SO RAN, 1991. S. 111–135.
15. *Kolman R.G.* Ofiolity. M.: Mir, 1979. 262 s.
16. *Krivenko A.P., Izokh A.E., Tolstykh N.D., Gongal'skij B.I.* Ustojchivost' mineralov platiny i palladiya pri razrushenii sul'fidnykh rud // DAN. 1995. T. 342, № 5. S. 640–643.
17. *Likhachev A.P., Kirichenko V.T., Lopatin G.G. i dr.* K osobennostyam platinonosnosti massivov shelochno-ul'traosnovnoj formatsii // ZVMO. 1987. № 1. S. 122–125.
18. *Malich K.N., Kogarko L.N.* Veschestvennyj sostav platinoidnoj mineralizatsii Bor-Uryakhskogo massiva (Majmecha-Kotujskoj provintsii, Rossiya) // DAN. 2011. T. 440, № 6. S. 806–810.
19. *Malich K.N., Rudashevskij N.S.* O korennoj mineralizatsii platinoidov khromititov Gulinskogo massiva // DAN. 1992. T. 325, № 5. S. 1026–1029.
20. *Mochalov A.G., Yakubovich O.V., Bortnikov N.S.* ^{190}Pt – ^4He vozrast platinometal'nykh rudoproyavlenij shelochno-ul'traosnovnogo massiva Konder (Khabarovskij kraj, Rossiya) // DAN. 2016. T. 469, № 5. S. 602–606.
21. *Okrugin A.V.* Rossypnaya platinonosnost' Sibirskoj platformy. Yakutsk: YaF izd-va SO RAN, 2000. 184 s.
22. *Okrugin A.V., Grakhanov S.A., Selivanova V.V., Popov A.A.* Zoloto i platina v almazonosnykh rossypyakh Zapadnoj Yakutii // Nauka i obrazovanie. 2000. №3. S. 19–22.
23. *Okrugin A.V., Zajtsev A.I., Borisenko A.S. i dr.* Zoloto-platinonosnye rossypi bassejna r. Anabar i ikh vozmozhnaya svyaz' s shelochno-ul'traosnovnymi magmatitami severa Sibirskoj platformy // Otechestvennaya geologiya. 2012. № 5. S. 11–21.
24. *Okrugin A.V., Zemnukhov A.L., Ivanov P.O.* Mineraly redkikh i radioaktivnykh elementov v kompleksnykh zoloto-platina-almazonosnykh rossypakh bassejna r. Anabar // Nauka i obrazovanie. 2014. № 1. S. 67–74.
25. *Okrugin A.V., Izbekov E.D., Shpunt B.R., Leskova N.V.* Mineraly platinovykh metallov atropogenovykh otlozhenij Vilyujskoj sineklizy i Anabarskoj anteklizy // Tipomorfizm i geokhimiicheskie osobennosti mineralov endogenykh obrazovaniy Yakutii. Yakutsk: YaNTs SO RAN, 1985. S. 40–50.
26. *Okrugin A.V., Kim A.A.* Topomineralogiya platinoidov iz rossypej vostochnoj chasti Sibirskoj platformy // Redkie samorodnye metally i intermetallidy korennykh i rossypnykh mesto-rozhdenij Yakutii. Yakutsk: YaNTs SO RAN, 1992. S. 77–102.
27. *Okrugin A.V., Kostoyanov A.I., Shevchenko S.S., Lazarenkov V.G.* Model'nyj Re-Os vozrast mineralov platinovoj grupy iz «vilyujskikh» rossypej vostoka Sibirskoj platformy // DAN. 2006. T. 410, № 3. S. 372–375.
28. *Okrugin A.V., Mazur A.B., Zemnukhov A.L., Popkov P.A., Sleptsov S.V.* Assotsiatsiya palladistogo zolota s mineralami platinovoj grupy v rossypyakh bassejna r. Anabar Sibirskoj platformy // Otechestvennaya geologiya. 2009. № 5. S. 3–11.
29. *Okrugin A.V., Mishnin V.M., Andreev A.P., Bekrenev K.A.* Topomineralogicheskaya kharakteristika potentsial'no rudonosnykh ob'ektov Yakutskogo pogrebennogo podnyatiya (vostok Sibirskoj platformy) // Otechestvennaya geologiya. 2010. № 5. S. 13–22.
30. *Okrugin A.V., Okhlopkov S.S., Grakhanov S.A.* Kompleksnye rossypeproyavleniya blagorodnykh metallov i samotsvetov v bassejne r. Anabar (severo-vostok Sibirskoj platformy) // Otechestvennaya geologiya. 2008. № 5. S. 3–17.
31. *Okrugin A.V., Tolstov A.V.* Petrogeokhimiicheskaya kharakteristika sienit-shelochno-ul'traosnovnogo silikatnogo kompleksa porod Tomtorskogo massiva (severo-vostok Sibirskoj platformy) // Otechestvennaya geologiya. 2017. № 5. S. 56–66.
32. *Okrugin A.V., Yakubovich O.V., Ernst R., Zhuravlev A.I., Druzhinina Zh.Yu., Gedz A.M.* Paragenезисы platinovykh metallov v rossypyakh Sibirskoj platformy, ikh vozrast i svyaz' s krupnymi izverzhenymi sobyitijami // Geologiya i mineral'no-syr'evye resursy Severo-Vostoka Rossii. V. 1. Yakutsk, 2018. S. 117–121.
33. *Parfenov L.M., Popeko L.I., Tomurtoogo O.* Problemy tektoniki Mongolo-Okhotskogo orogenogo poyasa // Tikhookeanskaya geologiya. 1999. № 5. P. 24–43.

34. *Protopopov Yu.Kh.* Tektonicheskie komplekсы platformennogo chekhla Vilyujskoj sineklizy: Preprint. Yakutsk, 1993. 86 s.
35. *Razin L.V., Vasyukov V.S., Izbekov E.D., Mironov E.P.* Rossypnaya platinonosnost' Tsentral'no-Aldanskoj metallogenicheskoj oblasti // *Platina Rossii*. M.: Geoinformark, 1994. S. 159–165.
36. *Rozhkov I.S., Kitsul V.I., Razin L.V., Borishanskaya S.S.* Platina Aldanskogo schita. M.: Izdvo AN SSSR, 1962. 119 s.
37. *Sazonov A.M., Romanovskij A.E., Grinev O.M. i dr.* Blagorodnometall'naya mineralizatsiya Gulinskoj intruzii // *Geologiya i geofizika*. 1994. № 9. S. 51–65.
38. *Tolstykh N.D., Krivenko A.P., Baturin S.G.* Osobennosti sostava samorodnoj platiny iz razlichnykh assotsiatsij mineralov elementov platinovoj grupy // *Geologiya i geofizika*. 1996. № 3. S. 39–46.
39. *Tolstykh N.D., Orsoev D.A., Krivenko A.P., Izokh A.E.* Blagorodnometall'naya mineralizatsiya v rassloennykh ul'trabazit-bazitovykh massivakh yuga Sibirskoj platformy. Novosibirsk: Parallel', 2008. 194 s.
40. *Tomshin M.D., Zajtsev A.I., Travin A.V., Okrugin A.V.* Proterozojskij massiv schelochnykh gabbroidov na reke Muna (severo-vostok Sibirskoj platformy) // *Regional'naya geologiya i metallogeniya*. 2010. № 42. S. 40–48.
41. *Trushkov Yu.N., Izbekov E.D., Tomskaya A.I., Timofeev V.I.* Zolotonosnost' Vilyujskoj sineklizy i ee obramleniya. Novosibirsk: Nauka, 1975. 148 s.
42. *Frolov A.A., Lapin A.V., Tolstov A.V. i dr.* Karbonatity i kimberlity (vzaimootnosheniya, mineralizatsiya, prognoz). M.: NIA-Priroda, 2005. 540 s.
43. *Shkodzinskij V.S.* Global'naya petrologiya po sovremennym dannym o goryachej geterogennoj akkretsii Zemli. Yakutsk: Izdatel'skij dom SVFU, 2018. 244 s.
44. *Shpunt B.R.* Platinovye mineraly chetvertichnykh otlozhenij Anabaro-Olenekskogo podnyatiya // *Geologiya rudnykh mestorozhdenij*. 1970. № 2. S. 123–126.
45. *Shpunt B.R.* Pozdnedokembrijskij riftogenez Sibirskoj platformy. Yakutsk: YaF SO AN SSSR, 1987. 139 s.
46. *Shukolyukov Yu. A., Yakubovich O.V., Mochalov A.G. i dr.* Novyj izotopnyj geokhronometr dlya pryamogo datirovaniya samorodnykh mineralov (^{190}Pt – ^4He metod) // *Petrologiya*. 2012. T. 20, № 6. S. 545–559.
47. *Ernst R.E., Okrugin A.V., Veselovskij R.V., Kamo S.L., Gamil'ton M.A., Pavlov V.E., Sederlund U., Chamberlejn K.R., Rodzhers K.* Kuonamskaya krupnaya izverzhennaya provintsiya (sever Sibiri, 1501 mln let): U-Pb geokhronologiya, geokhimiya i korrelyatsiya s sinkhronnym magmatizmom drugikh kratonov // *Geologiya i geofizika*. 2016. T. 57, № 5. S. 833–855.
48. *Yakubovich O.V.* Novyj ^{190}Pt – ^4He metod izotopnoj geokhronologii dlya datirovaniya mineralov platiny: Avtoref. dis. ... kand. geol.-miner. nauk. SPb.: SPbGU, 2013. 20 s.
49. *Yakubovich O.V., Mochalov A.G., Sluzhenkin S.F.* Sperrilit (PtAs_2) kak ^{190}Pt – ^4He geokhronometr // *DAN*. 2015. T. 462, № 1. S. 88–90.
50. *Cabri L.J., Feather C.Z.* Platinum-iron alloys: a nomenclature based on a study of natural and synthetic alloys // *Can.Miner.* 1975. V. 13, no. 2. P. 117–126.
51. *Cabri L. J., Harris D. C., Weiser T. W.* Mineralogy and distribution of platinum-group mineral placer deposits of the World // *Expl. and Mining Geol.* 1996. No. 2. P. 73–167.
52. *Ernst R.E., Hamilton M.A., Söderlund U., Hanes J.A., Gladkochub D.P., Okrugin A.V., Kolotilina T., Mekhonoshin A.S., Bleeker W., LeCheminant A.N., Buchan K.L., Chamberlain K.R., Didenko A.N.* Long-lived connection between southern Siberia and northern Laurentia in the Proterozoic // *Nature Geoscience*. 2016. V. 9, no. 6. P. 464–469.
53. *Ernst R.E.* Large Igneous Provinces. Cambridge University Press. 2014. 653 p.
54. *Harris D.C., Cabri L.J.* Nomenclature of platinum-group-element alloys: review and revision // *Can. Mineral.* 1991. V. 29. P. 231–237.
55. *Okrugin A.V.* Mineralogy, types and origin of platinum-bearing placer deposits of the Siberian platform // *International Geology Review*. 1998. No. 8. P. 677–687.
56. *Vuorelainen Y., Tornroos R.* Spherules after sperrylite from alluvial deposits in Finnish Lapland // *Can. Mineral.* 1986. V. 24. P. 523–528.
57. *Yakubovich O., Mochalov A., Kotov A., Sluzhenkin S., Okrugin A., Danišik M., McDonald B., Evans N., McInnes B.* ^{190}Pt – ^4He Dating of Platinum Mineralization. Mineral resources in a sustainable world. Proceedings of the 13th Biennial SGA Meeting. Nancy. France, 2015. P. 663–664.

Поступила в редакцию 27.08.2019

Об авторах

ОКРУГИН Александр Витальевич, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник, Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, 677980, Якутск, пр. Ленина, 39, Россия, <http://orcid.org/0000-0002-1248-8993>, a.v.okrugin@diamond.ysn.ru;

ЯКУБОВИЧ Ольга Валентиновна, кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник, Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, 199034, Санкт-Петербург, наб. Макарова, 2, Россия, <http://orcid.org/0000-0001-7435-3149>, olya.v.yakubovich@gmail.com;

ЭРНСТ Ричард, профессор, Dept. of Earth Sciences, Carleton University, 1125 Colonel By Drive, Ottawa, K1S 5B6, Canada, по совместительству Томский государственный университет, 634050, Томск, ул. Ленина, 36, Россия, <http://orcid.org/0000-0001-9474-0314>, richard.ernst@ernstgeosciences.com;

ДРУЖИНИНА Жанна Юрьевна, студентка, Санкт-Петербургский государственный университет, 199034, Санкт-Петербург, наб. Университетская, 7/9, Россия, <http://orcid.org/0000-0003-0514-5877>, zhanna.druzhinina@gmail.com.

About the authors

OKRUGIN Aleksandr Vital'evich, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Chief Researcher, Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, 39 Lenin Ave., Yakutsk, 677980, Russia, <http://orcid.org/0000-0002-1248-8993>, a.v.okrugin@diamond.ysn.ru;

YAKUBOVICH Ol'ga Valentinovna, Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Researcher, Institute of Precambrian Geology and Geochronology RAS, 2 Makarov Emb., Saint Petersburg, 199034, Russia, <http://orcid.org/0000-0001-7435-3149>, olya.v.yakubovich@gmail.com;

ERNST Richard, Professor, Department of Earth Sciences, Carleton University, 1125 Colonel By Drive, Ottawa, K1S 5B6, Canada, part-time Tomsk State University, 36 Lenin Ave., Tomsk, 634050, Russia, <http://orcid.org/0000-0001-9474-0314>, richard.ernst@ernstgeosciences.com;

DRUZHININA Zhanna Yur'evna, student, Saint Petersburg State University, 7/9 Universitetskaya Emb., Saint Petersburg, 199034, Russia, <http://orcid.org/0000-0003-0514-5877>, zhanna.druzhinina@gmail.com.