

На правах рукописи



МАЛИЧ Крешимир Ненадович

**КОМПЛЕКСНЫЕ ПЛАТИНОМЕТАЛЛЬНЫЕ
МЕСТОРОЖДЕНИЯ ПОЛЯРНОЙ СИБИРИ
(СОСТАВ, ИСТОЧНИКИ ВЕЩЕСТВА
И УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ)**

1.6.10 – Геология, поиски и разведка
твердых полезных ископаемых; минерагения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора геолого-минералогических наук

Новосибирск – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте геологии и геохимии им. академика А.Н. Заварицкого Уральского отделения Российской академии наук (ИГГ УрО РАН), г. Екатеринбург

Научный консультант:

Когарко Лия Николаевна, академик РАН, доктор геолого-минералогических наук, профессор, зав. лабораторией Федерального государственного бюджетного учреждения науки Ордена Ленина и Ордена Октябрьской Революции Института геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского Российской академии наук (ГЕОХИ РАН), г. Москва

Официальные оппоненты:

Арискин Алексей Алексеевич, доктор геолого-минералогических наук, профессор геологического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», г. Москва

Горячев Николай Анатольевич, член-корреспондент РАН, доктор геолого-минералогических наук, профессор, главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Северо-Восточного комплексного научно-исследовательского института им. А.Н. Шило Дальневосточного отделения Российской академии наук (СВКНИИ ДВО РАН), г. Магадан

Масленников Валерий Владимирович, член-корреспондент РАН, доктор геолого-минералогических наук, профессор, главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Южно-Уральского федерального научного центра минералогии и геоэкологии Уральского отделения Российской академии наук (ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН), г. Миасс

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Института геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук (ИГЕМ РАН), г. Москва

Защита состоится 2 марта 2022 г. в 11:00 на заседании диссертационного совета 24.1.050.01 в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения РАН (ИГМ СО РАН) по адресу: 630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, д. 3.

Тел.: +7 (383) 373-03-28, факс: +7 (383) 373-05-61, e-mail: turkina@igm.nsc.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ИГМ СО РАН: <https://www.igm.nsc.ru/index.php/obrazov/dissovety>

Автореферат разослан « » января 2022 г.

Ученый секретарь диссертационного совета 24.1.050.01,
доктор геолого-минералогических наук

О.М. Туркина

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследований. Элементы платиновой группы (ЭПГ) вместе с Fe, Co и Ni, принадлежат к VIII группе элементов и подразделяются на легкие (Ru, Rh, Pd) и тяжелые (Os, Ir, Pt). По температуре плавления ЭПГ образуют две триады. Первая объединяет тугоплавкие ЭПГ Ir-группы (Os, Ir и Ru), вторая – легкоплавкие ЭПГ Pt-группы (Rh, Pt и Pd). Уникальность и многообразие свойств платиноидов определяет их широкое использование во многих областях деятельности человека. Потребность данных элементов со стороны химической, электрохимической, электронной, автомобильной, ювелирной промышленности, науки и медицины неуклонно растет. Постоянно растущий спрос на ЭПГ предопределяет необходимость расширения их минерально-сырьевой базы, что связано с выявлением новых источников платиноидов и использованием новых подходов при прогнозировании месторождений стратегических видов минерального сырья.

В России главным по значимости источником платиновых металлов являются сульфидные платиноидно-медно-никелевые месторождения Норильского района, вмещающие богатейшие комплексные руды на Земле, содержащие 15% земных ресурсов сульфидного Ni и 27% ресурсов Pd наряду с другими стратегическими металлами. По экспертным оценкам имеющихся и отработанных исторических запасов Норильских месторождений общая стоимость всех металлов в ценах 2020 г. превышает 1.3 триллиона долларов, где доля платиноидов составляет около 60% [Barnes et al., 2020]. Уникальные месторождения платиноидов, никеля и меди приурочены к трем промышленно-рудноносным интрузивам (Хараелахскому, Талнахскому и Норильск-1).

Несмотря на длительное изучение ультрамафит-мафитовых интрузивов, с которыми ассоциируют различные по масштабу комплексные сульфидные платиноидно-медно-никелевые (ЭПГ-Cu-Ni) месторождения, проблемы генезиса пород и руд трактуются различно, оставаясь предметом непрекращающихся дискуссий на протяжении XX столетия и до настоящего времени [Годлевский, 1959; Золотухин и др., 1975; Дистлер и др., 1988; Дюжиков и др., 1988; Туганова, 2000; Рябов и др., 2000; Додин, 2002; Naldrett, 2004; Лихачёв, 2006; Starostin, Sorokhtin, 2011; Радько, 2016; Krivolutskaya, 2016; Малич и др., 2018; Malitch et al., 2018; Isotope Geology..., 2019; Barnes et al., 2020 и др.].

Происхождение интрузивов норильского типа объяснялось разными механизмами/моделями: дифференциацией одной магмы [Зенько, 1983]; внедрением различных магм [Туганова, 1991; Czamanske et al., 1995]; моделью магматических проводников [Радько, 1991; Naldrett, 1992; Naldrett et al., 1995]; корово-мантийным взаимодействием [Пушкарев, 1997; Pushkarev, 1999]; ассимиляцией [Li et al., 2003] и метасоматическими моделями для руд [Золотухин и др., 1975] и интрузивов [Зотов, 1979] и др. Ни одна из этих идей не является преобладающей, и даже соавторы придерживаются разных точек зрения [Czamanske et al., 1995; Arndt et al., 2003; Malitch et al., 2014; Sluzhenikin et al., 2014 и др.].

Самыми острыми и до сих пор нерешенными являются вопросы об (i) источниках силикатного и рудного вещества, (ii) продолжительности образования пород и руд интрузивов, (iii) взаимоотношении рудоносных интрузивов с вулканитами и (iv) характере взаимодействия между первичными магмами с континентальной корой и/или субконтинентальной литосферной мантией (SCLM). От решения

данных вопросов зависит эффективность научного прогнозирования богатых ЭПГ-Cu-Ni руд.

Вторым по значимости источником платиновых металлов в России являются россыпные месторождения, тесно связанные с зональными клинопироксенит-дунитовыми массивами, расположенными на Урале, Дальнем Востоке и Восточной Сибири. В данных россыпных месторождениях главным минералообразующим элементом является платина. От данных геологических объектов резко отличаются комплексные золото-иридиево-осмиевые россыпи, связанные с крупнейшим в мире Гулинским массивом ультраосновных и щелочных пород с карбонатитами в пределах Маймеча-Котуйской провинции. Проблемы геологии, петрологии, металлогении и формационной принадлежности ультрамафитов Гулинского, Бор-Урахского и некоторых других массивов Маймеча-Котуйской провинции являются предметом оживленной дискуссии на протяжении многих десятилетий [Бутакова, Егоров, 1962; Жабин, 1965; Ефимов, 1966; Васильев, Золотухин, 1975; Ланда, Ляпунов, 1984; Лихачев и др., 1987; Маракушев, 1987; Егоров, 1991; Лазаренков и др., 1992; Бородин, 1994; Эпштейн, 1994; Когарко и др., 1994, 1996; Kogarko et al., 1995; Геология и формационная принадлежность..., 1997; Малич, Лопатин 1997; Малич, 1999; Сазонов и др., 2001; Когарко, Сенин, 2011; Малич, Когарко, 2011; Малич и др., 2013; Симонов и др., 2015; 2016; 2017; 2019 и др.]. Накопленный фактический материал по благороднометальным месторождениям и рудопроявлениям Маймеча-Котуйской провинции позволяет по-новому осветить вопросы их геологии, минералогии, геохимии и металлогении, впервые увязав аспекты коренной и россыпной платиноносности.

Таким образом, **актуальность** настоящей работы определяется ее направленностью на выявление вещественного состава, изотопно-геохимических параметров силикатного и рудного вещества и условий образования комплексных платинометальных месторождений Полярной Сибири, представленных сульфидными ЭПГ-Cu-Ni рудами ультрамафит-мафитовых интрузивов Норильской и Таймырской провинций и золото-платиноидным оруденением уникального Гулинского массива Маймеча-Котуйской провинции. Появление новых методов исследований, прежде всего изотопно-геохимических, предопределяет необходимость постоянного совершенствования существующих моделей образования и критериев прогнозирования платинометальных месторождений.

Цели исследований состояли в (i) решении фундаментальной проблемы происхождения комплексных платиноидных месторождений арктических регионов России на примере сульфидных ЭПГ-Cu-Ni руд ультрамафит-мафитовых интрузивов Норильской и Таймырской провинций, платиноидного оруденения Гулинского массива Маймеча-Котуйской провинции и (ii) формировании новых подходов при прогнозировании месторождений стратегических видов минерального сырья.

Главные задачи исследования: 1) провести петролого-геохимический анализ различно рудоносных ультрамафит-мафитовых комплексов Российской Арктики на примере Норильской, Таймырской и Маймеча-Котуйской провинций; 2) выявить особенности состава и закономерности локализации благороднометального оруденения на основе детальных исследований ультрамафитов и благороднометальной минерализации пород и россыпей; 3) определить возраст и длительность породо- и рудообразования при помощи комплексных вещественных, U-Pb, Th-U-Pb-

и Re-Os геохронологических исследований различных по металлогеническому потенциалу ультрамафит-мафитовых комплексов Полярной Сибири; 4) выявить изотопно-геохимические параметры силикатного вещества ультрамафит-мафитовых интрузивов (по данным изотопного состава кислорода и Lu-Hf изотопной систематики циркона/бадделейта и Sm-Nd изотопии пород); 5) охарактеризовать изотопно-геохимические параметры рудного вещества для вкрапленных и массивных сульфидных ЭПГ-Cu-Ni руд и Os-Ir минералов (по данным Re-Os, S и Cu изотопии); 6) уточнить модель формирования сульфидного ЭПГ-Cu-Ni оруденения на основе новых геохронологических и изотопно-геохимических данных; 7) разработать новые информативные оценочные индикаторы для прогноза богатых сульфидных ЭПГ-Cu-Ni руд.

Фактический материал и методы исследований. Диссертационная работа основывается на многолетнем (1983-2021) изучении автором геологии, минералогии, геохимии, геохронологии и металлогении ультрамафит-мафитовых интрузивов и массивов ультраосновных и щелочных пород с карбонатитами, расположенных в Полярной Сибири. Работа начата в Ленинградском Горном институте (ЛГИ, 1983-1993 гг.), продолжена во Всероссийском научно-исследовательском институте геологии и минеральных ресурсов Мирового океана (ВНИИ Океангеология, 1994-2000), Горном Университете Леобена, Австрия (2000-2004), Всероссийском научно-исследовательском геологическом институте им. А.П. Карпинского (ВСЕГЕИ, 1985-1986, 2005-2011) и, в завершающую стадию, в Институте геологии и геохимии им. акад. А.Н. Заварицкого УрО РАН (ИГТ УрО РАН, 2011-2021).

Исследования проводились в тесном сотрудничестве с коллегами из Ленинградского Горного Института (СПбГУ), ВНИИ Океангеология, ВСЕГЕИ, ЗАО «НАТИ» (все Санкт-Петербург), ИГЕМ РАН, ГЕОХИ РАН (Москва), ИТиГ ДВО (Хабаровск), КНИИГиМС (Красноярск), Норильской КГРЭ, Заполярной КГРЭ, Территориального агентства по недропользованию по Таймырскому (Долгано-Ненецкому) автономному округу (все Норильск), Управления по недропользованию по Красноярскому краю (Красноярск), Бюро геологических и горных исследований (BRGM, Орлеан, Франция); Университета Претории (Йоханнесбург, Южная Африка); Горного университета Леобена (Леобен, Австрия), Технического университета горного дела и металлургии (Фрайберг, Германия), Университета Оулу (Финляндия), Университета Макуори (Сидней, Австралия), Университета Западной Австралии (Перт, Австралия).

В основу выполненных исследований положен материал (образцы пород, акцессорные минералы, сульфидные руды, благороднометальные минерализации), собранный во время экспедиционных работ в Норильской, Таймырской и Маймеча-Котуйской провинциях. Проведенный системный отбор проб образцов ультраосновных пород Гулинского, Бор-Урахского и Кугдинского массивов Маймеча-Котуйской провинции позволил охватить территорию всех обнаженных частей массивов. Платиноидная минерализация из коренных пород изучена по образцам дунитов и хромитов. Представительные выборки минералов платиновой группы (МПГ) из шлиховых концентратов изучены по ряду шурфов и траншейных выработок р. Ингарингда (Л-270, Л-365, Л-430), р. Гулэ (Л-350), р. Дунитовая (Т-8), руч. Бурлаковский (Т-2), р. Буор-Юрах (Л-98, Л-120) и др. Системный отбор образцов ультрамафит-мафитовых интрузивов Норильской и Таймырской провинций проводился для главных типов ультрамафит-мафитовых

интрузивов и связанной с ними рудной минерализации независимо от того является ли эта минерализация промышленной или соответствует рангу рудопоявления. Для этого выбирались типичные разрезы интрузивов, в которых представлены главные петрографические разновидности пород, образующие наиболее полные и представительные разрезы для каждого типа интрузивов. Методы исследований включали минералого-петрографическое, минералого-геохимическое и изотопно-геохимическое изучение пород и рудных минералов из различных по степени рудоносности ультрамафит-мафитовых интрузивов Полярной Сибири. Геологические схемы и разрезы составлены на основе детального картирования и петрографического изучения пород (более 600 шлифов).

Оценка достоверности результатов исследований обеспечена применением современных аналитических методов на сертифицированном оборудовании с использованием международных стандартных образцов в ведущих лабораториях России и мира. Аналитические определения содержаний петрогенных, рудных и редкоземельных элементов (около 800 анализов) наряду с выявлением химического состава породообразующих, рудных и акцессорных минералов (более 1000 анализов) были выполнены в АО «Механобр-Аналит», Бюро геологических и горных исследований (Орлеан, Франция), Горном университете Леобена (Австрия), Центральной лаборатории (ЦЛ) ВСЕГЕИ (Санкт-Петербург) и ЦКП «Геоаналитик» ИГГ УрО РАН (Екатеринбург). Изотопно-геохимические анализы выполнены в Центре изотопных исследований (ЦИИ) ВСЕГЕИ (около 500 определений), аналитической лаборатории Австралийского научного центра по геохимической эволюции и металлогении континентов (Australian Research Council National Key Centre for Geochemical Evolution and Metallogeny of Continents (ARC GEMOC)), базирующегося в Департаменте Земных и планетарных наук Университета Макуори в Сиднее, Австралия (более 350 определений), и Центре микроскопии, характеристики и анализа (Centre for Microscopy, Characterisation and Analysis (CMCA)) Университета Западной Австралии в Перте (более 70 определений).

Защищаемые положения.

1. Маймеча-Котуйская платинометальная провинция характеризуется иридиево-осмиевыми россыпными месторождениями и проявлениями Гулинского и Бор-Урехского массивов ультраосновных и щелочных пород с карбонатитами. Гулинский массив ультрамафитов обладает сходными чертами с платиноносными ультрамафитами клинопироксенит-дунитовых массивов урал-алаянского и алданского типа и офиолитовыми ультрамафитами дунит-гарцбургитовых массивов. С первыми их объединяет парагенетическая ассоциация пород (дуниты, хромититы, верлиты и клинопироксениты) и значительный россыпеобразующий потенциал (десятки тонн полезного компонента), со вторыми – значительный площадной размер коренных выходов ультрамафитов (сотни км²) и металлогеническая специализация на тугоплавкие платиноиды.

2. Большинство минералов платиновой группы из благороднометалльных россыпей Маймеча-Котуйской провинции образовано Os-Ir сплавами, преобладающими над Pt-Fe сплавами, Ru-Os сульфидами и другими МПГ. Коренными источниками МПГ являются дуниты, хромититы и оливиниты.

3. По данным изучения U-Pb системы в бадделеите/цирконе и Th-U-Pb системы в ториаците установлена временная близость для карбонатитов Гулинского массива

Маймеча-Котуйской провинции и ультрамафит-мафитовых интрузивов Таймырской провинции к пермо-триасовому рубежу и их синхронность с толеит-базальтовым магматизмом Сибирской платформы (~250 млн лет).

4. Ключевая роль при формировании сульфидных ЭПГ-Cu-Ni месторождений Норильской провинции принадлежит глубинным магматическим камерам. Гомогенный изотопный состав серы для массивных и вкрапленных руд Харелахского ($\delta^{34}\text{S}=12.66\pm0.49\text{‰}$) и Талнахского ($\delta^{34}\text{S}=10.92\pm0.62\text{‰}$) месторождений свидетельствует в пользу контаминации мантийных магм «коровым» компонентом не на этапе внедрения интрузивных тел, а в более глубоких условиях, где и была достигнута гомогенизация изотопного состава серы. Вариации изотопного состава меди ($\delta^{65}\text{Cu}$) обусловлены различием изотопных параметров рудного вещества первичных магм, сформировавших сульфидные ЭПГ-Cu-Ni руды промышленных месторождений (от -1.1 до 0.0‰ для Талнахского месторождения и от -0.1 до 0.6‰ для месторождения Норильск-1). Для «изотопно-лёгких» составов меди ($\delta^{65}\text{Cu}$ от -2.3‰ до -0.9‰) сульфидных руд Харелахского месторождения допускается участие внешнего источника меди.

5. Сопряженный характер изотопных параметров серы ($\delta^{34}\text{S}=8-13\text{‰}$), осмия ($^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}=0.1283-0.1366$) и меди ($\delta^{65}\text{Cu}$ от -2.1 до 0.6‰) в Cu-Ni сульфидах является новым изотопно-геохимическим индикатором прогноза богатых сульфидных ЭПГ-Cu-Ni руд.

Научная новизна.

I. Маймеча-Котуйская провинция:

1. Впервые детально исследованы минеральные ассоциации платиноидов из ультрамафитов и благороднометалльных россыпей Гулинского массива.

2. Установлено, что вещественные особенности платиноидной минерализации Бор-Урехского массива близки особенностям состава Os-Ir и Pt-Fe минералов Гулинского массива Маймеча-Котуйской провинции, зональных ультраосновных комплексов Алданской провинции и Платиноносного пояса Урала.

3. Впервые определены вариации Os-изотопного состава для минералов осмия и хромититов Гулинского массива, свидетельствующие в пользу субхондритового источника ЭПГ.

4. Установлены необычные поликомпонентные твердые растворы системы Ru-Os-Ir-Pt($\pm\text{Fe}$), составы которых характерны для недифференцированного в отношении ЭПГ рудного вещества.

5. Обосновываются близкие окислительно-восстановительные условия образования самородного осмия дунитов и Ir-содержащего осмия хромититов Гулинского массива.

6. Установлено, что карбонатиты Гулинского массива по времени образования были синхронны с толеит-базальтовым магматизмом Сибирской платформы.

II. Норильская и Таймырская провинции:

Обобщение литературных и собственных петролого-геохимических данных по ультрамафит-мафитовым интрузивам Норильской провинции позволило выделить три главных геолого-экономических типа: (1) *промышленно-рудоносный*, вмещающий уникальные и крупные малосульфидные платиноидные и сульфидные платиноидно-медно-никелевые месторождения (Октябрьское/Харелахское, Талнахское и Норильск-1); (2) *рудоносный*, с которым ассоциируют мелкие (резервные) месторождения с забалансовыми сульфидными платиноидно-медно-никелевыми рудами

и в котором установлены признаки малосульфидного оруденения (Черногорское, Зуб-Маркшейдерское и Вологочанское); (3) *слаборудоносный* с Cu-Ni сульфидной минерализацией без платиноидов (интрузивы Нижнеталнахский, Зеленогневский и др.).

2. Сравнительная оценка U-Pb, Th-U-Pb- и Re-Os геохронологических и O-Hf-Nd-Os-Cu-S изотопно-геохимических данных для различно рудоносных ультрамафит-мафитовых интрузивов Полярной Сибири выявила более сложную, чем это представлялось ранее, геологическую историю промышленно-рудоносных интрузивов.

3. Впервые показана полигенно-полихронная природа разновозрастных цирконов интрузивов норильского типа, отражающая многоэтапный период формирования промышленно-рудоносных ультрамафит-мафитовых интрузивов.

4. Впервые определен возраст монацита и бадделеита из пород ультрамафит-мафитовых интрузивов Норильской провинции.

5. Обоснована значительная роль глубинных магматических камер при формировании богатых сульфидных ЭПГ-Cu-Ni руд Норильской провинции.

6. Впервые выявлены особенности изотопного состава кислорода в цирконе, свидетельствующие о (i) мантийном происхождении первичных магм, родоначальных для Талнахского интрузива, и (ii) участии корового компонента при формировании рудоносных пород такситового горизонта.

7. На основании Hf-Nd изотопных данных обосновывается положение о трех вещественных источниках (деплетированной мантии, субконтинентальной литосферной мантии и древней коры), участвовавших в формировании промышленно-рудоносных интрузивов.

8. Впервые показаны контрастные особенности изотопного состава серы и меди для сульфидного вещества промышленно-рудоносных интрузивов.

9. На основании сочетания изотопных составов серы, меди и осмия выявлены интрузивные тела с вкрапленными сульфидными рудами, обладающими параметрами рудного вещества, за счет которых были сформированы промышленные платиноидно-медно-никелевые месторождения.

10. Впервые установлена временная близость к пермо-триасовому рубежу и синхронность с толеит-базальтовым магматизмом Сибирской платформы потенциально рудоносных Дюмталейского и Бинюдинского ультрамафит-мафитовых интрузивов Таймырской провинции.

11. По сравнению с другими ультрамафит-мафитовыми интрузивами Норильской провинции силикатное вещество Дюмталейского интрузива характеризуется наиболее деплетированным компонентом ($\epsilon_{\text{Hf}} \sim -8.3$, $\epsilon_{\text{Nd}} \sim -3.5$, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_i \sim 0.70493$).

12. Полученные комплексные данные об источниках силикатного и рудного вещества ультрамафит-мафитовых интрузивов Полярной Сибири являются надёжным фундаментом для сопоставления на изотопном уровне процессов магмо- и рудообразования.

Практическая значимость работы. Часть использованных в работе материалов получена в ходе выполнения многочисленных хозяйственных и тематических научно-исследовательских работ, направленных на выявление вещественных характеристик и различных аспектов генезиса платиноидных месторождений Полярной Сибири.

Проведение ревизии представлений о формационной принадлежности ультрабазитов Гулинского массива с обоснованием их автономности от других магматических образований, позволило по-новому подойти к расчленению

ультраосновных пород в гетерогенных плутонических комплексах при создании серийной легенды Маймеч-Котуйской серии листов Государственной геологической карты Российской Федерации масштаба 1 : 200 000, апробированной на НРС ВСЕГЕИ. Показано, что комплексные золото-иридиево-осмиевые россыпи, связанные с Гулинским массивом, являются уникальным по типу комплексной благороднометальной минерализации и весьма крупным по прогнозным ресурсам тугоплавких платиноидов потенциально промышленным объектом, которому нет аналога в России и в мире. Вещественные характеристики платиноидной минерализации из четвертичных отложений в пределах Бор-Уряхского массива определяют высокие перспективы открытия платиноидных россыпей также в Кугдинском и Одихинском рудных районах Маймеч-Котуйской провинции.

Охарактеризованы изотопно-геохимические индикаторы прогноза сульфидного ЭПГ-Cu-Ni оруденения, которые предлагаются к использованию при оценке рудоносности слабо изученных геологических объектов. Высокие перспективы обнаружения богатых ЭПГ-Cu-Ni руд для Черногорского и Дюмталейского интрузивов обосновываются сходством S-Cu-Os изотопных характеристик для вкрапленных сульфидных руд с таковыми промышленно-рудоносного Талнахского интрузива Норильской провинции. Выявленные закономерности изотопных характеристик силикатного и рудного вещества могут быть эффективно использованы при прогнозной оценке оруденения в слабо изученных ультрамафит-мафитовых интрузивах Российской Арктики.

Личный вклад автора состоял в постановке цели и задач диссертационной работы, планировании и организации широкого спектра оригинальных минералогических, геохимических и изотопно-геохимических исследований, личном участии в полевых работах и большинстве вышеназванных исследований, обобщении полученных результатов, подготовке и представлении их в печать. Инновационный аспект изотопной части исследований заключался в интеграции информации по изотопии (Re-Os, S, Cu, Lu-Hf, Sm-Nd, Rb-Sr, O системы) на макроуровне по породам и минералам и на микроуровне в пределах индивидуальных зерен минералов, используя выборку рудных и акцессорных минералов (МПП, сульфидов, циркона, бадделеита, монацита и ториянита) в образцах, охватывающих главные разновидности пород ультрамафит-мафитовых интрузивов.

Связь работы с научно-техническими программами. Исследования по теме диссертационной работы проводились в рамках выполнения планов НИР ЛГИ, ВНИИ Океангеология, ВСЕГЕИ, ИГГ УрО РАН, хозяйственных работ по заданиям ПГО «Красноярскгеология» (Красноярск), Полярной ГСЭ (Хатанга), Таймыргеолкома (Норильск), по научным проектам Австрийского научного фонда, Австрийской и Финской Академии наук, в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009-2013 годы» Министерства науки и образования РФ (гос. контракт 02.740.11.0726), проектам РФФИ (гранты №№ 96-05-65126-а, 09-05-01242-а, 09-05-12028 офи-м, 13-05-00671-а, 18-05-70073-Арктика) и проектам УрО РАН (№№ 12-У-5-1038 и 12-5-6-019-Арктика) при поддержке системной инфраструктуры Университетов Макуори (Сидней, Австралия), Западной Австралии (Перт, Австралия) и использовании оборудования ЦКП «Геоаналитик» ИГГ УрО РАН (Екатеринбург), дооснащение и комплексное развитие которого осуществляется при финансовой поддержке гранта Министерства науки и высшего образования РФ (соглашение № 075-15-2021-680).

Апробация работы. Основные выводы и рекомендации, полученные в ходе выполнения работы, апробированы на практике при поисково-оценочных работах ПП «Норильскгеология» АО «Норильский ГМК» в Норильской и Маймеча-Котуйской провинциях, а также в рамках геологосъемочных работ масштаба 1:50 000 с сопутствующим структурным колонковым бурением скважин до глубины 1200 м на Гулинском массиве в Маймеча-Котуйской провинции.

Результаты исследований докладывались и обсуждались на Ученых Советах ВНИИ Океангеология, ВСЕГЕИ, ИГГ УрО РАН, на НТС Норильской КГРЭ, Заполярной КГРЭ, Территориального агентства по недропользованию по Таймырскому (Долгано-Ненецкому) автономному округу (все Норильск), Управления по недропользованию по Красноярскому краю (Красноярск), Научном совете РАН по проблемам геохимии (Москва, 2004), а также в Институте Макса Планка (Майнц, 2004), Университете Оулу (Оулу, 2011), Университете Макуори (Сидней, 2013) и Санкт-Петербургском горном университете (2012, 2015). Основные результаты диссертации были также представлены лично на многочисленных всесоюзных, российских и международных совещаниях (более 70 докладов).

Публикации. По теме диссертации опубликовано около 190 научных работ, в том числе 3 монографии, 5 глав в монографиях, геологическая карта, 56 статей в рецензируемых научных журналах по списку ВАК, включая научные зарубежные издания первого квартала, в том числе в тематических выпусках «Рудные месторождения и роль литосферной мантии», «Пермские крупные магматические провинции и сопутствующие минерализации» журнала *Lithos*, «Норильско-талнахские ЭПГ-Cu-Ni месторождения» журнала *Economic Geology*. Публикации, на которых основан материал работы, прошли многократное рецензирование экспертами в области геологии рудных месторождений, геохронологии и изотопной геохимии.

Благодарности. В первую очередь, я признателен моим дорогим родителям, которые увлекли меня геологией и стали наглядным примером для подражания. Благодарен супруге, другу и коллеге И. Ю. Баданиной за многолетнюю поддержку и мотивацию для завершения диссертационной работы. Выражаю искреннюю признательность сибирским геологам Ю. А. Амосову, В. В. Беззубцеву, Ю. С. Глухову, М. М. Гончарову, В. А. Люлько, В. Ф. Кравцову, Ю. К. Краковецкому, Г. И. Легезину, А. К. Мкртычяну, Н. Г. Науменко, В. Ф. Ржевскому, Н. В. Рочеву, А. Г. Самойлову, И. И. Сидорову, О. Н. Симонову, С. Г. Снисару, Б. М. Струнину и М. Л. Шерману, оказавшим неоценимую помощь при проведении полевых исследований.

Весьма плодотворным оказалось многолетнее сотрудничество с И. Ю. Баданиной, Е. А. Белоусовой, С. Н. Бочаровым, В. Л. Гриффиным, В. В. Кнауфом, Л. Н. Когарко, Г. Г. Лопатиным, Р. М. Латыповым, А. П. Романовым, С. Ф. Служеникиным, Е. В. Тугановой и С. М. Тугановой, а также обсуждение результатов исследований с Е. В. Аникиной, А. В. Антоновым, А. М. Асавиным, Т. Б. Баяновой, Е. А. Балмасовой, С. Л. Вотяковым, В. К. Гараниным, Т. Л. Евстигнеевой, Л. Дж. Кабри, К. И. Лоховым, А. Ю. Кисиним, А. В. Козловым, С. М. Козыревым, А. И. Костяновым, Н. А. Криволицкой, Р. Ш. Крымским, А. П. Лихачёвым, Ю. Б. Мариним, Ф. Мелхером, В. В. Мурзиным, С. С. Неручевым, Т. Л. Оже, С. И. О'Рейли, О. В. Петровым, В. Ф. Проскурниным, В. Н. Пучковым, И. С. Пухтелем, Е. В. Пушкаревым, Н. В. Родионовым, М. И. Розиновым, Н. С. Рудашевским, Д. В. Рундквистом, С. А. Сергеевым, О. Н. Симоновым, Л. С. Смольской,

А. В. Соболевым, С. В. Соколовым, Н. В. Сорохтиной, О. А. Р. Талхаммером, С. Г. Тесалиной, Е. В. Толмачёвой, Л. А. Ушинской, В. В. Хиллер, Г. А. Черкашевым, С. С. Шевченко, Е. А. Шуваловым, М. А. Юдовской и С. А. Юнком.

Считаю своим долгом выразить искреннюю благодарность безвременно ушедшим И. Н. Горяинову, И. С. Грамбергу, В. В. Дистлеру, Д. А. Додину, В. Н. Егорову, А. А. Ефимову, В. В. Жданову, В. М. Изойтко, А. А. Кадику, И. Н. Капитонову, В. А. Коротееву, А. А. Краснобаеву, Л. И. Красному, Г. П. Кудрявцевой, М. З. Комаровой, В. Г. Лазаренкову, Н. С. Маличу, А. А. Маракушеву, В. Л. Масайтису, Н. П. Михайлову, Ф. П. Митрофанову, В. Н. Москалёвой, А. Д. Налдретту, В. С. Певзнеру, С. Л. Преснякову, Э. Б. Прилепскому, Ю. Д. Пушкареву, А. А. Степашко, Е. В. Тугановой, В. А. Федоренко, Г. Б. Ферштатеру, Н. М. Чернышеву, Е. Ф. Штумпфлю, Ю. М. Шувалову и А. Д. Щеглову за ценные советы и обсуждение научных вопросов, затронутых в диссертации.

Оформлению диссертационной работы способствовала возможность прохождения докторантуры в ИГГ УрО РАН. Всем коллегам, содействовавшим успешной реализации намеченных исследований и подготовке диссертационной работы, выражаю искреннюю признательность.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 8 глав и заключения общим объемом 269 страниц. Текст сопровождается 28 таблицами и 90 рисунками. Список литературы содержит 552 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе рассматривается экономический потенциал комплексных платиноидных руд трёх геолого-экономических районов Полярной Сибири. Дается информация о комплексных платино-палладиевых месторождениях Норильской провинции, включая коренные, техногенные и россыпные месторождения. Приводятся краткие сведения о сульфидных платиноидно-медно-никелевых рудопрооявлениях Таймырской провинции и комплексных золото-платиноидных россыпных месторождениях Маймеча-Котуйской провинции. Во второй главе приводится геологическая характеристика массивов ультраосновных, щелочных пород и карбонатитов Маймеча-Котуйской провинции. Обосновывается автономность ультрамафитов Гулинского массива с выделением двух различных магматических комплексов в Гулинском плутоне: гулинского клинопироксенит-дунитового и маймеча-котуйского ийолит-карбонатитового, характеризующихся свойственной для каждого из них ассоциацией пород и металлогенической специализацией. Геологические особенности россыпей и прогнозные ресурсы благородных металлов Маймеча-Котуйской провинции рассматриваются на примере потенциально уникальных россыпей тугоплавких платиноидов в районе Гулинского массива, а также россыпей проявления платиноидов, тесно связанного с ультрамафитами Бор-Урехского массива. В третьей главе анализируются морфологические особенности, вещественный состав, окислительно-восстановительные условия образования и изотопные параметры платиноидной минерализации из россыпей и коренных пород Гулинского и Бор-Урехского массивов. В четвертой главе приводится ретроспективный обзор схем расчленения интрузивных образований Норильской провинции. Рассматриваются геологические и петролого-геохимические

особенности изученных промышленно-рудноносных (Талнахский и Хараелахский интрузивы, интрузив Норильск-1), рудоносных (Черногорский, Зуб-Маркшейдерский и Вологодчанский), слабурудоносных (Нижнеталнахский и Круглогорский) ультрамафит-мафитовых интрузивов Норильской провинции и потенциально-рудноносных (Бинюдинский и Дюмталейский) ультрамафит-мафитовых интрузивов Таймырской провинции. В **пятой главе** приводятся результаты датирования акцессорных минералов из карбонатитов Гулинского массива, различно рудоносных пород Дюмталейского и Бинюдинского интрузивов Таймырской провинции и промышленно-рудноносных интрузивов Норильской провинции. В **шестой главе** обсуждаются результаты Cu-S изотопных исследований сульфидных ЭПГ-Cu-Ni и малосульфидных платиноидных руд Норильской и Таймырской провинций. На основании анализа изотопно-геохимической информации рассматриваются генетические ограничения на происхождение сульфидных руд (по данным Cu-, S- и Re-Os изотопии) и ультрамафит-мафитовых интрузивов (по данным O-Hf-Nd изотопии), с обоснованием мантийно-корового взаимодействия при их формировании. В **седьмой главе** даётся ретроспективный обзор генетических моделей образования интрузивов норильского типа, обсуждается модель рудообразующей системы Норильского района с учётом новых изотопно-геохимических данных. В **восьмой главе** детализируются новые индикаторы прогноза богатых ЭПГ-Cu-Ni руд в ультрамафит-мафитовых интрузивах Полярной Сибири. В **заключении** сформулированы основные результаты исследований.

Геолого-экономическая характеристика изученных геологических объектов Полярной Сибири

В пределах Полярной Сибири выделяются три крупных геолого-экономических района, где известны комплексные платинометалльные месторождения и рудопроявления: *Норильский, Таймырский и Маймеча-Котуйский*.

В Норильском регионе выделяются металлогенические зоны и рудные районы с эксплуатируемыми месторождениями Октябрьское, Талнахское и Норильск-1, имеющими определяющее значение для российской минерально-сырьевой базы металлов платиновой группы. В них заключено 12,4 тыс. т платиноидов (Pd, Pt, Rh, Ru, Ir и Os) или почти 81% российских запасов этих металлов [Государственный доклад..., 2018]. Практически все они сосредоточены в сульфидных медно-никелевых рудах, которые разрабатываются подземными рудниками «Октябрьский», «Таймырский», «Комсомольский», «Маяк» и «Скалистый» (месторождения Октябрьское и Талнахское), карьером «Медвежий ручей» и подземным рудником «Заполярный» (месторождение Норильск-1). Октябрьское и Талнахское месторождения не имеют в мире аналогов, отличаясь уникальным сочетанием масштаба и высокого качества руд. В Октябрьском месторождении находится около 40% разведанных и почти треть предварительно оцененных запасов платиноидов России [Государственный доклад..., 2018]; среднее содержание платиноидов в рудах составляет 4,5 г/т, а в их «медистых» и массивных разновидностях достигает 13,5 и 15,5 г/т, соответственно.

Платиноиды сосредоточены в сульфидных ЭПГ-Cu-Ni рудах, которые представлены двумя главными типами. Первый тип характеризует богатые (массивные и «медистые») платиноидно-медно-никелевые сульфидные руды промышленных месторождений, которые тяготеют обычно к нижнему экзоконтакту Талнахского и Хараелахского интрузивов (рис. 1). В структуре запасов они составляют 22% и обеспечивают 73% добычи платиноидов [Государственный доклад..., 2019].

Второй тип образован вкрапленными рудами, расположенными в нижних частях интрузивов, сложенных ультраосновными породами и разновидностями мафитов с такситовой текстурой (рис. 1). Их доля в запасах и добыче платиноидов составляет соответственно 68% и 25%. Среди сульфидов массивных и вкрапленных руд доминируют пирротин, халькопирит и пентландит.

Еще один тип руд приурочен к малосульфидному (МС) обогащенному платиноидами горизонту, который пока не вовлечен в эксплуатацию. Он имеет мощность от 2 до 50 м, встречается исключительно в верхних частях интрузивов вместе с линзами хромита и характеризуется [Служеникин, 2000] высоким содержанием ЭПГ (5,43 г/т в интрузиве Норильск-1, 5,94 г/т в Талнахском интрузиве); значение Σ ЭПГ/S варьирует в пределах от 5 до 20, в отличие от 0,8–1,2 до 3 в медистых рудах талнахско-норильских сульфидных месторождений.

Кроме того, в Норильском районе известны техногенные и россыпные месторождения платиноидов. Техногенные месторождения платиноидов связаны с эксплуатацией сульфидных никелево-медных руд. Они образовались при складировании хвостов обогащения, гидрометаллургического передела и промежуточного продукта – пирротинового и магнетитового концентрата и др. [Стехин и др., 1985; Додин, 2002; и др.]. К россыпным месторождениям относятся платино-палладиевые россыпи, также связанные с норильскими сульфидными месторождениями.

Помимо разрабатываемых месторождений в госрезерве числятся месторождения вкрапленных ЭПГ-Cu-Ni сульфидных руд – Черногорское, Горозубовское

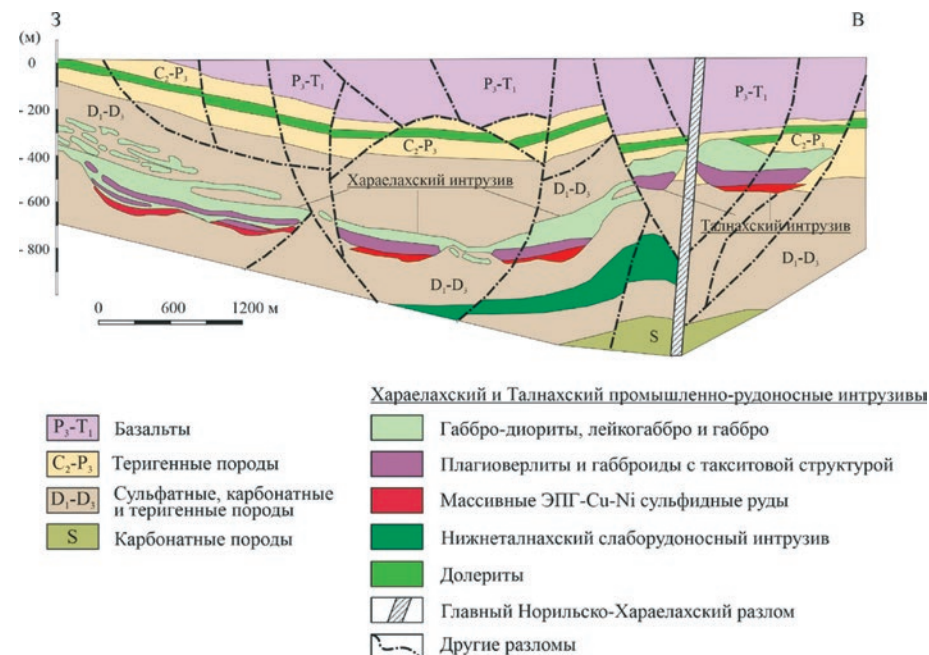


Рис. 1. Геологический разрез Талнахского рудного узла по данным [Дюжиков и др., 1988] с изменениями.

и Норильск-2, которые были разведаны в 50–60-е годы и составляют 6% от запасов эксплуатируемых объектов [Люлько и др., 2002], а также Вологодчанское месторождение вкрапленных руд [Матвеев и др., 2005, фонды ООО «Норильскгеология»]. Имеются научно обоснованные перспективы расширения сырьевой базы платиновых металлов за счет сульфидного платиноидно-медно-никелевого оруденения не только в Норильско-Хараслахской зоне, а также в пределах Имангдинской, Курейско-Северореченской и ряда других рудных зон [Металлогеническая карта..., 1987; Люлько и др., 2002; Петров и др., 2009; О состоянии и использовании..., 2018; Годовой отчет ПАО «ГМК...», 2021 и др.].

Петролого-геохимический анализ ультрамафит-мафитовых интрузивов, расположенных в различных частях стратиграфического разреза (рис. 2) Норильской провинции, позволил выделить в их составе три геолого-экономических типа [Петров и др., 2009; Malitch et al., 2014, 2018].

1. *Промышленно-рудноносные интрузивы* объединяют интрузивы ультрамафит-мафитового состава норильского (норильско-талнахского) типа, содержащие четко выраженный горизонт перидотитов и повышенное количество хрома, с которыми ассоциируют вкрапленные, прожилково-вкрапленные и массивные



Рис. 2. Стратиграфический разрез, показывающий расположение промышленно-рудноносных (Хараслахского, Талнахского и Норильск-1), рудоносных (Черногорского, Зуб-Маркшейдерского и Вологодчанского) интрузивов и слаборудноносного Нижнеталнахского интрузива [по данным Дюжикова и др. [1992] и Czamanske et al. (1995)].

залежи, жилы и шлиры, образующие крупные и уникальные комплексные месторождения платиноидно-медно-никелевых (с кобальтом, золотом, серебром и др.) руд. В верхних частях интрузивов выявлен *малосульфидный платиноидный* горизонт, приуроченный к лейкогаббро с линзами ультрамафитов и пород с такситовой текстурой. Породы интрузивов проявляют отчетливую однородность в отношении изотопного состава неодима ($\epsilon Nd = 1.0 \pm 0.5$) при сходных значительных вариациях значения $^{87}Sr/^{86}Sr_i$ (0.7055–0.7075). Примеры: интрузивы *Норильск-1, Талнахский, Хараслахский*.

2. *Рудоносные интрузивы с забалансовыми платиноидно-медно-никелевыми рудами* включают интрузивы ультрамафит-мафитового состава горозубовской и имангдинской группы, обладающими сходными породными, минералогическими, геохимическими и Nd-Sr изотопными характеристиками с таковыми промышленно-рудноносных интрузивов. С рудоносными интрузивами ассоциируют вкрапленные, реже прожилково-вкрапленные руды, образующие мелкие и средние месторождения медно-никелевых руд, а также средние и крупные месторождения платиноидов. Данная группа интрузивов характеризуется установленными признаками малосульфидного оруденения (Черногорский и Имангдинский интрузивы), либо по геолого-петрологическим признакам перспективна на выявление МС-горизонта (Зуб-Маркшейдерский, Вологодчанский и др.). Примеры: интрузивы *Черногорский, Норильск-2, Имангдинский, Зуб-Маркшейдерский, Вологодчанский, Южнопоясинский*.

3. *Слаборудоносные интрузивы* объединяют мафит-ультрамафитовые интрузивы нижнеталнахского типа, с которыми связано медно-никелевое рассеянное оруденение в виде рудопоявлений и минерализации вкрапленного (редко шлирового) типа с незначительным (сотые доли %, реже до десятых долей %) содержаниями меди и никеля. В отличие от интрузивов первых двух геолого-экономических типов, породы слаборудноносных интрузивов имеют низкое содержание хрома и платиноидов (тысячные доли г/т, реже сотые доли г/т в единичных интрузивах) и не перспективны на МС-оруденение. Породы слаборудноносных интрузивов обладают отличными от промышленно рудоносных и рудоносных интрузивов значениями $\epsilon Nd \sim -5$ и $^{87}Sr/^{86}Sr_i = 0.7076-0.7086$. Примеры: интрузивы *Нижнеталнахский, Зеленогорский, Нижненорильский* и др.

Ресурсный потенциал платиновых металлов *Таймырского геолого-экономического района* определяется одноименной никеленосной металлогенической провинцией [Геологическое строение..., 1987; Беззубцев, 1989; Додин, 2002; и др.]. В пределах Центрального и Западного Таймыра рудопоявления ЭПГ связаны с ультрамафит-мафитовыми интрузивами боотанкагского, дьякатаринского, дюмталейского и бинюдинского типов в тесной ассоциации с сульфидными Cu-Ni рудами [Геология и полезные ископаемые..., 2002]. Многие рудопоявления до сих пор слабо изучены, хотя и являются потенциально перспективными на обнаружение здесь промышленно-значимых объектов. На севере Таймыра установлены шлиховые ореолы МПГ, коренным источником которых являются ультрамафиты кунарского дунит-гарцбургитового комплекса Челюскинского ультрамафитового пояса [Залялеев, Беззубцев, 1975]. Среди МПГ преобладают минералы осмия, рутения и рутениридоосмия над минералами иридия, Pt-Fe сплавами и другими МПГ [Malitch, 2004; Малич и др., 2011а и др.].

Основные перспективы выявления богатых ЭПГ-Cu-Ni руд на Таймыре связаны с Бинюдинским и Дюмталейским ультрамафит-мафитовыми интрузивами (рис. 3) в пределах соответственно Бинюдинско-Тарейского и Луктахского рудных

районов [Комарова и др., 1999; Служеникин и др., 1999; Курбатов, Романов, 2008; Государственная геологическая..., 2009; Романов и др., 2011; Малич и др., 2018 и др.]. На уровне ресурсной оценки по P_{2+3} они оцениваются как перспективные на открытие средних месторождений [Романов и др., 2011]. Бинюдинский интрузив сложен в верхней и средней частях дунитами, плагиодунитами и плагиоверлитами, в нижней части – меланотроктолитами, вмещающими сульфидную платиноидно-медно-никелевую минерализацию. В настоящее время для Бинюдинского рудопроявления по материалам ограниченного объема буровых работ ресурсные оценки Ni составляют 500 тыс. т, ЭПГ – 50 т; для всего Бинюдинского рудного района – 1500 тыс. т Ni, ЭПГ – 150 т [Романов и др., 2011]. Дюмталейский интрузив представлен, главным образом, феррогаббро с титаномagnetитовыми рудами в средней части и троктолитовым феррогаббро с сульфидным ЭПГ-Cu-Ni оруденением – в нижней. Прогнозные ресурсы по категории P_2+P_3 составляют: Cu – 23880 тыс. т, Ni – 17369 тыс. т, Co – 1335 тыс. т, ЭПГ – 1 879 тыс. т [Романов и др., 2011]. Бинюдинский и Дюмталейский интрузивы отнесены с определенной долей условности в группу *потенциально рудоносных* интрузивов.

Маймеча-Котуйский геолого-экономический район на севере Сибирской платформы традиционно рассматривался как перспективный на апатит-магнетитовые и флогопитовые руды, нефелиновое сырье и редкоземельные металлы, ассоциирующие с ийолит-карбонатитовыми массивами маймеча-котуйского комплекса [Эпштейн и др., 1961; Егоров, 1985; 1991; Эпштейн, 1994 и др.].

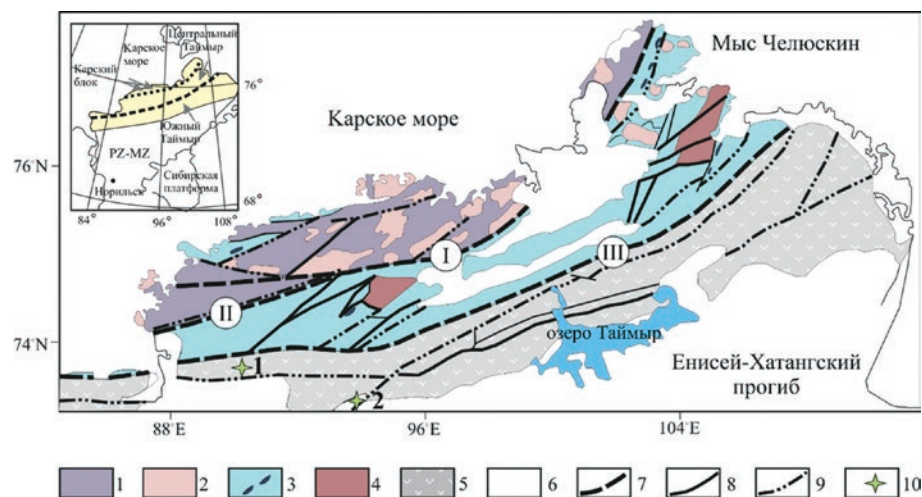


Рис. 3. Геологическая схема полуострова Таймыр по [Верниковский, 1996; Проскурнин и др., 2014]. Условные обозначения: 1 – Карская континентальная окраина (PR-PZ); 2 – коллизионные гранитоиды (264-300 млн лет); 3 – Центральнотаймырский докембрийский аккреционный пояс с офиолитами; 4 – Мамонт-Шренковский и Фаддеевский выступы; 5 – Южнотаймырский складчатый пояс (PZ-MZ); 6 – юрско-кайнозойские отложения; 7 – главные надвиги: I – Таймырский, II – Диабазовый, III – Пясино-Фаддеевский; 8 – разломы; 9 – надвиги; 10 – местоположение Бинюдинского (1) и Дюмталейского (2) интрузивов.

В результате проведения геологической съемки масштаба 1:200 000, поисковых и тематических работ получен оригинальный фактический материал по геологии, минералогии и геохимии крупнейшего в мире Гулинского массива ультраосновных и щелочных пород с карбонатитами (рис. 4) и связанных с ним комплексных золото-платиноидных россыпей [Малич, 1991; 1995; Малич и др., 1996; 2013; Лазаренков и др., 1993; Сазонов и др., 1994; 2001; Симонов и др., 1995; Малич, Лопатин, 1997; Геология и формационная..., 1997; Малич, 1999; Malitch et al., 2002; Merkle et al., 2012], позволивший по-новому оценить металлогенический потенциал Маймеча-Котуйской провинции. Значительные прогнозные ресурсы благородных металлов (более 15 тонн) и, в частности, осмия в россыпях, связанных с ультрамафитами Гулинского массива [Симонов и др., 1995; Малич и др., 1998а; 1998б; Лопатин, 2001], сопоставимы с уникальными россыпными месторождениями Витватерсранда (ЮАР) [Cousins, 1973], являющимися крупнейшим поставщиком осмия на мировой рынок.

Защищаемые положения и их обоснование

1. Маймеча-Котуйская платинометальная провинция России характеризуется иридиево-осмиевыми россыпными месторождениями и проявлениями Гулинского и Бор-Уряхского массивов ультраосновных и щелочных пород с карбонатитами. Гулинский массив ультрамафитов обладает сходными чертами с платиноносными ультрамафитами клинопироксенит-дунитовых массивов урал-алаянского и алданского типа и офиолитовыми ультрамафитами дунит-гарцбургитовых массивов. С первыми их объединяет парагенетическая ассоциация пород (дуниты, хромититы, верлиты и клинопироксениты) и значительный россыпеобразующий потенциал (десятки тонн полезного компонента), со вторыми – значительный площадной размер коренных выходов ультрамафитов (сотни км²) и металлогеническая специализация на тугоплавкие платиноиды.

1.1. Геологическая характеристика ультрамафитов Гулинского массива. Гулинский массив контролируется субмеридиональной Таймыро-Байкальской и субширотной Енисей-Котуйской палеорифтогенными структурами [Дюжиков, 1985]. По геолого-геофизическим данным его площадь вместе с погребенной частью составляет около 2000 кв. км. Форма массива пластинообразная с пологим погружением на северо-запад, в плане близкая к эллипсу, длинная ось которого вытянута в северо-восточном направлении [Геология и формационная..., 1997; Малич, Лопатин, 1997]. В обнаженной части массив сложен, главным образом, дунитами, хромититами, верлитами и клинопироксенитами в составе гулинского клинопироксенит-дунитового комплекса. Преобладающие дуниты образуют в плане серповидное тело протяженностью около 30 км и шириной 10-15 км, занимая площадь около 450 кв. км (рис. 4). В зонах эндоконтакта массива нередко наблюдаются дунитовые брекчии, сцементированные мелкозернистым пироксен-флогопитовым агрегатом. Таким образом, Гулинский массив является крупнейшим выходом дунитов, на долю которых приходится не менее 2/3 обнаженной его части. В юго-западной части они перекрыты толщей меймечитов – ультраосновных вулканитов маймечинской свиты, а в центральной – прорваны штокообразными телами маймеча-котуйского ийолит-карбонатитового комплекса площадью около 30 км² (рис. 4).

Детальная минералого-геохимическая характеристика ультрамафитов Гулинского массива приведена в ряде работ [Васильев, Золотухин, 1975; Ланда, Ляпунов, 1984;

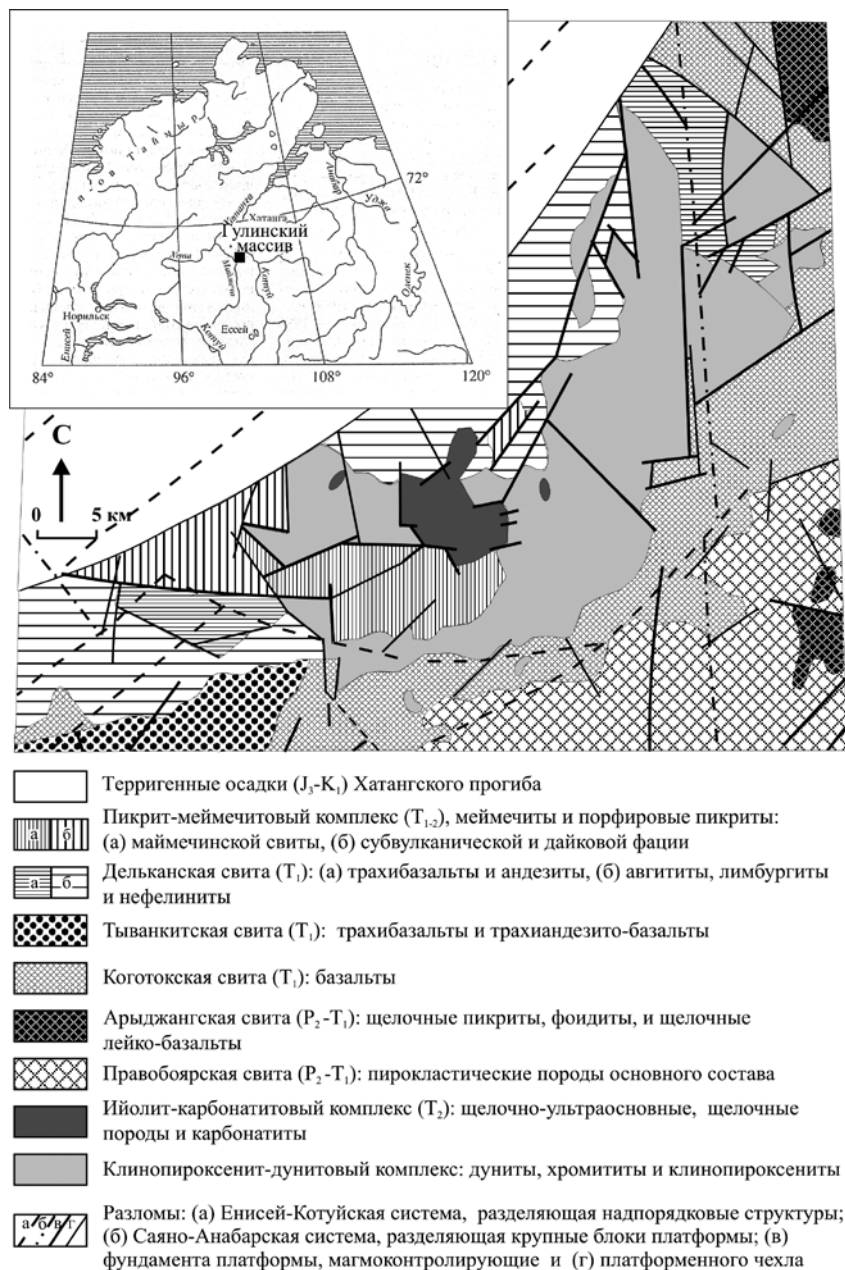


Рис. 4. Схемы расположения и геологического строения Гулинского массива ультраосновных и щелочных пород с карбонатитами [Малич, Лопатин, 1997].

Малич, 1991; 1995; 1999; Балмасова и др., 1992а; Лазаренков и др., 1993; Когарко и др., 1994; Осмиеносность Гулинского..., 1995; Малич, Лопатин, 1997; Сазонов и др., 2001; Симонов и др., 2015; 2016; Малич и др., 2018 и др.]. Все ультраосновные породы Гулинского массива резко обеднены щелочами и принадлежат семейству ультраосновных пород нормального ряда. С глубины 535 метров и ниже дуниты не затронуты процессами серпентинизации, обладают широким развитием структур пластических деформаций, постоянством состава оливина (Fo₉₂), U-образным типом распределения редкоземельных элементов и значением Ni/Co (~23), типичным для мантийных производных. Выявленный [Малич, 1991; 1995; 1999 и др.] уровень и характер распределения ЭПГ в ультраосновных породах позволил установить, что в различно серпентинизированных дунитах и приуроченных к ним хромититах ведущими являются ЭПГ триады тугоплавких платиноидов – осмий, иридий и рутений. Содержание ЭПГ в хромититах выше (в 3 раза и более), чем в дунитах. Клинопироксениты и меймечиты обладают платино-палладиевой специализацией, соответствующей платино-палладиевому геохимическому максимуму.

Многообразие точек зрения на формационную принадлежность интрузивных ультрамафитов Маймеча-Котуйского региона впервые приведено Ю.Р. Васильевым и В.В. Золотухиным [1975]. Следует признать, что основное внимание исследователей было приковано к щелочно-ультраосновным, щелочным породам и карбонатитам [Бутакова, Егоров, 1962; Магматические формации..., 1979; Егоров, 1985; 1989; 1991; Эпштейн, 1994 и др.], а также меймечитам – специфичным эффузивам ультраосновного состава [Мальков, 1971; Соболев, Слуцкий, 1984; Ланда, 1987; Когарко и др., 1988; Соболев и др., 1991; 2009; Arndt et al., 1995; Fedorenko, Czamanske, 1997; Carlson et al., 2006; Elkins-Tanton et al., 2007; Рябчиков и др., 2009; Васильев и др., 2014; 2017 и др.]. Вместе с тем, полиформационная природа ультрамафитов Гулинского массива обосновывалась многими исследователями [Жабин, 1965; Бородин и др., 1966; Ефимов, 1966; Васильев, Золотухин, 1975; Малич, 1991; Бородин, 1994, Малич, Лопатин, 1997 и др.], отмечавшими, что по вещественно-парагенетическому составу и металлогенической специализации как ультрамафиты, так и щелочно-ультраосновные, щелочные породы и карбонатиты данного массива необходимо выделять в составе самостоятельных формаций (комплексов). Другими исследователями [Бутакова, Егоров, 1962, Егоров, 1991 и др.] также признается нетипичность Гулинского плутона для массивов щелочно-ультраосновных пород и карбонатитов по целому ряду признаков, и в первую очередь, ввиду преобладания ультрамафитов нормальной щелочности (94%) над карбонатитами и щелочными породами (6%), что указывает, с нашей точки зрения [Малич, Лопатин, 1997], на невозможность использования их в качестве петротипа для маймеча-котуйского ийолит-карбонатитового комплекса.

Главные отличия гетерогенного Гулинского плутона от автономных ийолит-карбонатитовых массивов центрального типа сводятся к следующему:

1) специфичный состав ультрамафитов (дуниты, хромититы, верлиты, клинопироксениты), обладающих значительным россыпеобразующим потенциалом, не характерен для массивов щелочно-ультраосновных пород и карбонатитов Маймеча-Котуйского, Карело-Кольского, Сетте-Дабанского и Алданского регионов, соответствующая таковому в платиноносных клинопироксенит-дунитовых массивах Алдана, Урала, Дальнего Востока, Аляски и других регионов;

2) металлогеническая специализация ультрамафитов на тугоплавкие платиноиды резко отличается от автономных массивов ийолит-карбонатитовой формации,

специализированной на апатит, флогопит, нефелиновое сырье, редкие металлы и редкие земли, но близка металлогенической специализации альпинотипных ультрамафитов дунит-гарцбургитовой формации;

3) значительное распространение ультраосновных пород массива (около 450 км²) сопоставимо по площади с таковым в массивах альпинотипных ультрамафитов Урала, Корякии, Тасмании, Новой Каледонии и других регионов планеты, что, вероятнее всего, обусловлено морфологией тела ультрамафитов, отвечающей силло-лакколиту, тем самым отличаясь и по данным параметрам от ийолит-карбонатитовых массивов центрального типа, характеризующихся значительно меньшими размерами.

Анализ геологических и минерало-геохимических данных по ультраосновным породам Гулинского массива позволил [Малич, 1991; Малич, Лопатин, 1997; Геология и формационная..., 1997 и др.] уточнить формационную принадлежность ультрамафитов и обосновать выделение двух различных магматических комплексов в гетерогенном Гулинском плутоне: гулинского клинопироксенит-дунитового и маймеча-котуйского ийолит-карбонатитового характеризующихся свойственной для каждого из них ассоциацией пород и металлогенической специализацией. В соответствии с требованиями статьи V.9 Петрографического кодекса [1995] подробное описание петротипа для выделенного гулинского клинопироксенит-дунитового комплекса на примере одноименного Гулинского массива приведено в работе [Геология и формационная..., 1997].

1.2. Геологическая характеристика золото-платиноидных россыпей. Основными россыпеобразующими структурами в Гулинском рудном районе являются долины рек и ручьев, дренирующих преимущественно ультраосновные породы Гулинского массива. Комплекс современных и верхнечетвертичных аллювиальных отложений рек Ингарингда, Сабыда, Гулэ, Селингда и их притоков осмиеносны и золотоносны на всем их протяжении. Продуктивны русловые и террасовые пласты. Наибольшее значение по количеству полезных компонентов имеют пласты террасового комплекса, в котором платиноидная и золотая минерализации сосредоточены в песчано-галечниковом глинистом с валунами слое, особенно в его нижней части, достигая наибольших концентраций на границе рыхлых отложений и плотика. Гранулометрический состав МППГ россыпей определяется тремя классами крупности, минералов золота — шестью. Их значимость в порядке убывания крупности следующая (в мм): для МППГ — от 0.25 до 0.5 (60%), от 0.125 до 0.25 (30%) и от 0.5 до 1 (около 10%); для минералов золота — от 1 до 2 (26%), более 4 (22 %), от 2 до 4 (20%), от 0.5 до 1 (20%), от 0.25 до 0.5 (11%) и от 0.125 до 0.25 (около 1%).

Характерная черта россыпей р. Ингарингда и Гулэ — отсутствие в них признаков значительных перемещений металла. Кристаллические индивиды и поликристаллические агрегаты минералов осмия, а также полиминеральные агрегаты МППГ слабо окатаны, либо совершенно не окатаны, часто находятся в срастании с оливином и хромшпинелидом.

Золото-платиноидные россыпи, развитые в пределах современной гидросети в районе коренных выходов Гулинского клинопироксенит-дунитового массива, имеют аллювиальное, а возможно частично и флювиогляциальное происхождение. Эрозия массива ультрамафитов, очевидно, началась в меловой период, так как зерна хромшпинелидов, характерные для дунитов, обнаружены в терригенных отложениях раннего мела. Таким образом, россыпи образовались при дезинтеграции

ультрамафитов (дунитов и хромититов) с последующим высвобождением минералов благородных элементов и их механическим переносом водными потоками рек.

1.3. Прогнозные ресурсы благородных металлов. Для участков рек Ингарингда и Гулэ, имеющих достаточное количество поисковых линий, прогнозные ресурсы оценены по категории Р₁ (табл. 1). Для других участков подсчет прогнозных ресурсов проведен по категориям Р₂ и Р₃ (табл. 1). При оценке ресурсов категории Р₁ оконтуривание продуктивного пласта проводилось по бортовому содержанию равному 100 мг/м³. В зависимости от геоморфологических условий и различного гипсометрического уровня выделено три пласта: «русловой», «верхний» и «нижний», по которым блокировка и подсчет ресурсов производились отдельно. В частности, россыпь, расположенная в верхнем-среднем течении р.Ингарингда, характеризуется прогнозными ресурсами полезного компонента в первые единицы тонн и имеет следующие параметры: протяженность — 26.4 км, средняя ширина пласта — 175 м, средняя мощность пласта — 1.2 м, средняя мощность торфов — 7.4 м, среднее содержание ЭПГ — 383 мг/м³ [Малич и др., 1998а; 1998б].

Говоря о перспективах россыпной металлоносности района, связанной с современными аллювиальными отложениями, нельзя исключать возможности выявления здесь и других генетических типов россыпей — прибрежно-морских, погребенных, а также кор выветривания. Отметим, что все россыпи в пределах Гулинского массива являются комплексными. Общие ресурсы благородных металлов в районе Гулинского массива оцениваются десятками тонн.

Основной россыпеобразующей структурой в районе Бор-Уряхского массива (расположенного в 110 км южнее Гулинского массива) является долина р. Буор-Юрях, которая берет начало в месте слияния двух истоков в центральной части массива и течет на северо-восток, прорезая ультрамафиты массива и вмещающие породы кольцевого хребта. По данным шлихового опробования четвертичные отложения в районе Бор-Уряхского массива являются перспективными на благородные металлы,

Таблица 1. Прогнозные ресурсы платиноидов и золота в районе Гулинского массива [Малич и др., 1998б]

Участки, полезный компонент	Прогнозные ресурсы по категориям, кг			Всего, кг
	P ₁	P ₂	P ₃	
ЭПГ				
р. Ингарингда	2214		1987	4111
р. Селингдэ		54	9500	9554
р. Сабыда		55		55
р. Восточная		36		36
Всего	2214	145	11487	13756
Золото				
р. Гулэ	1848		1207	3055
р. Сабыда		293	2882	3175
р. Маймеча		106	108	214
Всего	1848	399	4197	6444

с содержанием полезного компонента от 11 до 265 мг/м³. Высоки перспективы открытия сходных благороднометалльных россыпей проявлений также в Кугдинском и Одихинчинском рудных районах.

1.4. Понятие крупности месторождения динамично во времени так как оно определяется и природными характеристиками объекта, и потребностями народного хозяйства [Россыпные месторождения..., 1997]. В данной связи, важнейшим показателем качества минерально-сырьевой базы платиновых металлов является степень концентрации запасов полезного компонента в месторождениях различной крупности. Например, согласно предложенной В.П. Орловым [1991] классификации, крупные месторождения по своим запасам должны соответствовать приблизительно половине годовой добычи данных элементов в России или от 10 до 15% от их мировой добычи. К уникальным месторождениям предлагается относить лишь объекты, запасы которых сопоставимы с годовой добычей в мире или России на момент открытия месторождения. Если использовать предложенную классификацию, то помимо месторождений норильско-талнахского типа и россыпного месторождения платины Кондерского клинопироксенит-дунитового массива Алданской провинции [Россыпные месторождения..., 1997; Малич, 1999] в ранг уникальных попадают россыпные месторождения тугоплавких платиноидов в Маймеча-Котуйском регионе. Новые данные по металлогеологии Гулинского массива позволяют обосновать выявление новой платинометалльной провинции России в Маймеча-Котуйский регионе.

2. Большинство минералов платиновой группы (МПГ) из благороднометалльных россыпей Маймеча-Котуйской провинции образовано Os-Ir сплавами, преобладающими над Pt-Fe сплавами, Ru-Os сульфидами и другими МПГ. Коренными источниками МПГ являются дуниты, хромититы и оливиниты.

2.1. Вещественный состав МПГ иридиево-осмиевых россыпей Маймеча-Котуйской провинции. Находки минералов платиноидов в районе Гулинского и Бор-Уряхского массивов были сделаны в конце восьмидесятых годов Л.А. Лопатиной, Г.Г. Лопатиным и Н.Г. Науменко. В ряде работ [Лихачев и др., 1987; Балмасова и др., 19926; Малич, Рудашевский, 1992; Сазонов и др., 1994; Осмиеносность Гулинского клинопироксенит-дунитового..., 1995; Малич, 19966; Малич и др., 19986; Малич, Лопатин, 1997; Малич, Баданина, 1998; Малич, 1999; Сазонов и др., 2001; Malitch et al., 2002; Malitch, Thalhammer, 2002; Малич, Когарко, 2011; Малич и др., 2011а; 2011б; 2011в; Merkle et al., 2012 и др.] приводится характеристика химического состава МПГ из ультрамафитов и россыпных образований, ассоциирующих с Гулинским и Бор-Уряхским массивами.

Подавляющее большинство минералов платиноидов образованы Os-(Ir-Ru) твердыми растворами, обнаруживающими значительные вариации состава от знака к знаку (рис. 5). По классификации Д. Харриса и Л. Кабри [Harris, Cabri, 1991] данные МПГ относятся к минералам осмия (осмию и Ir-содержащему осмию). Ранее эти МПГ по классификации Д. Харриса и Л. Кабри [Harris, Cabri, 1973] назывались самородным осмием и иридоосмием, соответственно. Лишь в единичных зернах МПГ установлена зональность. Сумма Os+Ir+Ru в Os-(Ir-Ru) твердом растворе составляет, как правило, 99 мас.%. Другим ЭПГ, систематически определяемым в некоторых зернах, является Pt (до 2.54 мас.%, в среднем составляя 2.21 мас.% при стандартном отклонении (CO) равном 0.13). Такие элементы как Pd (до 1.04 мас.%), Rh (до 0.63 мас.%) и Fe (до 0.24 мас.%) спорадически были выявлены в различных зернах, не являясь постоянной примесью в пределах всего зерна.

Для контрольной выборки минералов осмия (рис. 5а) средние содержания Os и Ir связаны обратно пропорциональной зависимостью. Средние составы минералов осмия, нанесенные на тройную диаграмму Os-Ir-Ru (рис. 5б), образуют два тренда: 1) содержание Ru возрастает с понижением концентрации Os в интервале от 100 до 80 ат.%; 2) содержание Ru не меняется наряду с замещением осмия иридием в интервале менее 80 ат.%. Изменчивость состава минералов осмия обусловлена замещением в твердом растворе осмия иридием и, реже, рутением (рис. 5). Данные тренды составов типичны для Os-Ir сплавов в железо-платиновых твердых растворах зональных клинопироксенит-дунитовых массивов Алданской провинции (Кондерском, Инаглинском и др. [Малич, 1999]). Анализ фазовой диаграммы равновесия Os-Ir [Massalski, 1993] определяет температурный интервал образования минералов осмия не ниже 2800°C. Такие высокие температуры достижимы лишь вблизи границы ядро – мантия [Bird, Bassett, 1980]. Таким образом, подавляющее большинство изученных МПГ являются Os-(Ir-Ru) твердыми растворами, весьма выдержанными (гомогенными) по составу в пределах кристаллического индивида либо агрегата кристаллов, но демонстрирующих широкие вариации концентраций Os и Ir от знака к знаку.

В полифазных минеральных агрегатах также установлен Os-содержащий иридий, как правило, сосуществующий с Ir-содержащим осмием [Malitch et al., 2002]. На рис. 5б показаны две группы сосуществующих составов минералов осмия и иридия, примыкающих к полю несмешиваемости между гексагональными твердыми растворами на основе осмия и рутения и кубическими твердыми растворами на основе иридия. Отличительной особенностью минералов осмия из аллювия р. Буор-Юрх является их более иридиевый состав (рис. 6а). По классификации Д. Харриса и Л. Кабри [Harris, Cabri, 1991] подавляющее большинство данных минералов относится к Ir-содержащему осмию. Среди МПГ из россыпей Гулин-

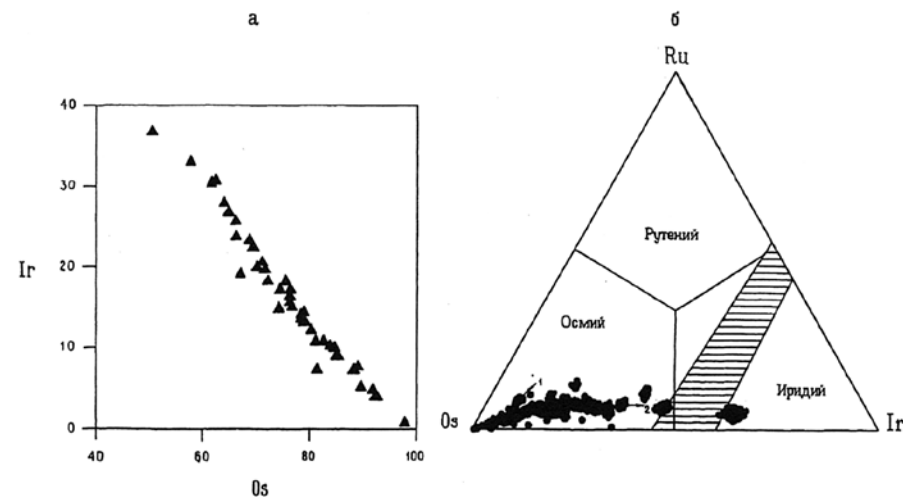


Рис. 5. Химические составы минералов осмия (а,б) и иридия (б) Гулинского массива в координатах Ir-Os (а), ат.% и Ru-Os-Ir (б), ат.% [Малич, 1999; Malitch et al., 2002]. Заштрихованное поле соответствует области несмешиваемости по [Harris, Cabri, 1991].

ского массива в резко подчиненном количестве обнаружены индивидуальные зерна железо-платиновых твердых растворов, для которых типичны включения Os-Ru-Ir сплавов и лаурита (RuS_2). Также встречены минеральные ассоциации иридия и лаурита, иридиевого осмия и лаурита, осмия и эрликманита (OsS_2).

Ru-Os сульфиды, представленные минералами ряда лаурит (RuS_2) – эрликманит (OsS_2), характеризуются значительными вариациями состава (рис. 6б). Рутениевый номер – $\text{Ru}\# = [100 \cdot \text{Ru}_{\text{ат.}\%} / (\text{Ru} + \text{Os})_{\text{ат.}\%}]$ – Ru-Os сульфидов варьирует от 99 до 2. Этот тренд составов соответствует таковому для минералов серии лаурит–эрликманит из подформных хромитов [Melcher et al., 1997; Garuti et al., 1999; Malitch et al., 2003 и др.]. При этом в составе лаурита (рис. 6б) отмечается известный тип замещения рутения осмием. В отличие от лаурита, эрликманит представлен двумя сериями твердых растворов, которые характеризуются различными типами изоморфизма. Подчиненная выборка составов эрликманита характеризуется обычным типом замещения Ru – Os в непрерывном ряде твердых растворов между эрликманитом и лауритом (рис. 6б). Доминирующая выборка составов обладает необычным типом замещения Os – Ir (рис. 6в) (Os от 67.61 до 37.95 мас.%, Ir от 31.94 до 5.50 мас.% и Ru от 9.78 до 0.35 мас.%), определяя изоморфизм между эрликманитом и неназванным МПГ IrS_2 . Данный тип изоморфизма типичен для Os-Ir сплавов Гулинского массива. Незначительные концентрации других элементов в эрликманите включают Pt, Fe, Ni и As (до 0.33, 1.81, 0.31 и 0.91 мас.%, соответственно).

Наряду с морфологией и химическим составом минералов осмия выявлены их другие минералого-геохимические параметры [Малич, 1995; 1996; Малич, Костоянов, 1999; Морфология, химический состав..., 2004; Малич и др., 2011а; 2011б и др.]: цвет, отражательная способность, микротвердость, структура, изотопный состав. Кроме того, установлен широкий спектр включений МПГ, а также

оксидных и силикатных включений, захваченных минералами осмия [Осмиеносность Гулинского клинопироксенит-дунитового..., 1995; Малич, Оже, 1998 и др.]. В частности, выявлено пять типов включений: 1) монофазные силикатные (форстерит, серпентин и др.) и оксидные (хромит, хроммагнетит); 2) полифазные силикатные и оксидные; 3) монофазные сульфидов (пентландит, джерфшерит); 4) полифазные сульфидов и МПГ (изоферроплатина, мончеит и теллуropалладинит); 5) монофазные МПГ (лаурит, эрликманит, рутениридосмин). Изученные силикатные и оксидные включения размером от 5 до 30 мкм представлены как индивидуальными минералами, так и сложными по строению минеральными ассоциациями. Для многих включений характерна форма типа «негативных» кристаллов. Наиболее широко развиты хромшпинелид (хромит), форстеритовый оливин и серпентин. Менее распространены клинопироксен, гортонолитовый оливин, хроммагнетит, ферришпинелид, амфибол, флогопит, биотит, ильменит, сфен.

Выявленный спектр включений, захваченных минералами осмия, типичен для МПГ из россыпей, связанных с зональными ультрамафитовыми комплексами урал-аляскинского и алданского типов. Вместе с тем, описанные ранее [Рудащевский и др., 1982; Nixon et al., 1990; Johan et al., 1991; Auge, Legendre, 1992; Мочалов, 2001; Johan, 2006 и др.] сходные включения ассоциируют с железо-платиновыми твердыми растворами. В то же время, содержащие Pt и Pd включения МПГ (Pt-Fe твердый раствор Pt_3Fe , мончеит PtTe_2 , теллуropалладинит Pd_3Te_4), обнаруженные в минералах осмия, свидетельствуют о присутствии данных платиноидов в минералообразующей системе.

В составе полиминеральных ассоциаций платиноидов выявлены необычные поликомпонентные твердые растворы системы Ru-Os-Ir-Pt-Fe: (Ru, Pt, Os, Ir), (Pt, Ru, Os, Fe, Ir), (Pt, Ru, Os, Fe) и (Pt, Ru, Fe) [Малич, Баданина, 1998]. Данные твердые растворы платиноидов обнаружены в виде реликтов неизмененного первичного протораствора и структур распада твердого раствора в Pt-Fe минералах. Отличительная черта изученных поликомпонентных твердых растворов – значительная изменчивость их состава. Предельные химические формулы данных минеральных образований могут быть представлены как: $\text{Pt}_{0.53}\text{Ru}_{0.18}\text{Fe}_{0.16}\text{Os}_{0.05}\text{Rh}_{0.04}\text{Ir}_{0.03}\text{Ni}_{0.01}$ и $\text{Ru}_{0.32}\text{Pt}_{0.25}\text{Os}_{0.19}\text{Ir}_{0.12}\text{Fe}_{0.08}\text{Rh}_{0.03}\text{Ni}_{0.01}$. Характерно, что близкие по составу поликомпонентные твердые растворы системы Ru-Os-Ir-Pt-Fe были обнаружены в уникальных палеоархейских россыпях Витватерсранда, Южная Африка [Feather, 1976; Баданина, Малич, 2017] и в россыпях вне видимой связи с коренными источниками в пределах Корякского нагорья на Дальнем Востоке [Рудащевский, 1989]. Учитывая, что платина с тугоплавкими платиноидами образует ограниченные изоморфные смеси [Савицкий, Полякова, 1975; Massalski, 1993], формирование изученного минерального парагенезиса платиноидов свидетельствует о мантийных условиях, характеризующихся повышенными P-T параметрами [Малич, Баданина, 1998].

Установленный набор минералов платиноидов в россыпях, ассоциирующих с Гулинским массивом, за исключением ряда редких из них, соответствует набору МПГ из россыпных месторождений, связанных с другими клинопироксенит-дуниновыми массивами (табл. 2). При этом процентное соотношение встречаемости Os-Ir-(Ru) и Pt-Fe минералов в россыпях Гулинского массива не соответствует ранее известным [Platinum-group elements..., 1981; Геология и генезис месторождений..., 1994; Cabri et al., 1996; Малич, Лопатин, 1997; Россыпные месторождения..., 1997; Okrugin, 1998; Малич, 1999; Мочалов, 2001; Tolstikh et al., 2002; 2005; 2015 и др.], подчеркивая уникальность их иридиево-осмиевой специализации.

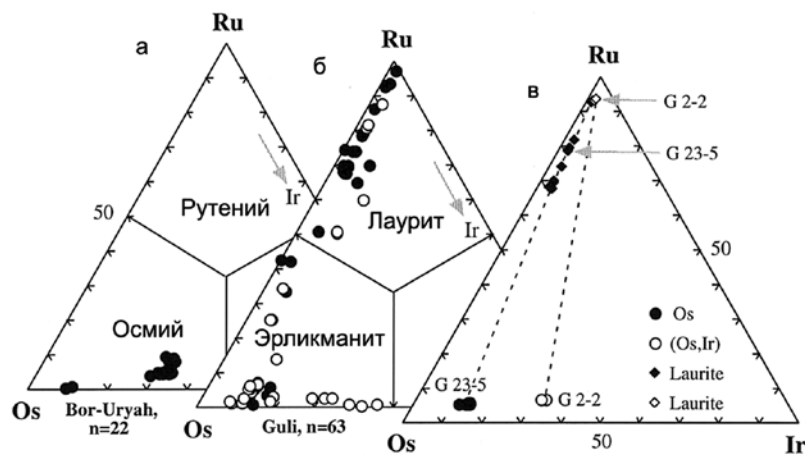


Рис. 6. Химические составы минералов осмия Бор-Уряхского массива (а), Ru-Os сульфидов Гулинского массива (б) и сосуществующих Os-Ir сплавов и Ru-Os сульфидов (в) Гулинского массива в координатах Ru-Os-Ir, ат. % [Malitch et al., 2002]; (б) полые круги – включения в МПГ, залитые круги – сростания с МПГ.

Исследование платиноидной минерализации Бор-Уряхского массива основано на 19 зернах Os-Ir и Pt-Fe сплавов размером от 0.1 до 0.25 мм, отобранных из четвертичных и современных отложений р. Буор-Юрях в пределах поисковых линий Л-120 и Л-98 в северо-восточной части массива [Малич, Когарко, 2011]. Платиноидная минерализация Бор-Уряхского массива представлена как субидiomорфными и идиоморфными кристаллами, так и агрегатами идиоморфных кристаллов, среди которых Os-Ir сплавы преобладают над Pt-Fe сплавами (12 и 7 зерен, соответственно). Большинство (11 из 12) богатых осмием МПГ Бор-Уряхского массива являются Ir-содержащим осмием, с незначительным количеством ченгидеита (Ir₃Fe). Os-Ir сплавы встречаются также в виде включений и ламелей в зернах Pt-Fe сплавов, которые характеризуются составом, близким к Pt₂Fe (где Pt равна сумме ат.% ЭПГ, Fe – сумме ат.% железа, никеля и меди). По геохимической специализации Pt-Fe твердые растворы можно подразделить на две группы. Первая содержит повышенные содержания иридия и родия (около 5 ат.% и 8 ат.%, соответственно). Pt-Fe сплавы второй группы характеризуются меньшими концентрациями примесных ЭПГ (0–0.96 ат.% иридия и 1.23–2.10 ат.% родия). Минерал со стехиометрией Pt₂Fe не известен в синтетической системе Pt–Fe [Massalski, 1990]. Однако природные Pt-Fe твердые растворы с химическим составом, близким к Pt₂Fe, известны для ультрамафитовых комплексов уральского и алданского типов, офиолитовых массивов и дифференцированных ультрамафит-мафитовых интрузивов [Cabri et al., 1996; Weiser, Bachmann, 1999; Служеникин, 2000; Malitch, Thalhammer, 2002; Малич, Баданина, 2015 и др.].

Согласно классификации Л. Кабри и М. Фезера [Cabri, Feather, 1975] в системе Pt-Fe известны четыре минерала Pt-Fe: самородная платина с разупорядоченной гранецентрированной кубической структурой (*fcc*, пространственная группа *Fm3m*) и содержанием платины > 80 ат.%; железистая платина с разупорядоченной гранецентрированной кубической структурой (*fcc*, пространственная группа *Fm3m*) и содержанием Fe между 20 и 50 ат.%; изоферроплатина с упорядоченной примитивной кубической структурой (*pcc*, пространственная группа *Pm3m*) и содержанием Fe между 25 и 35 ат.%; и тетраферроплатина с тетрагональной структурой (пространственная группа *P4/mmm*) и содержанием железа примерно 45–55 ат.%, что соответствует ~PtFe. Выполненное ранее рентгеноструктурное исследование Pt-Fe железных твердых растворов Гулинского, Кондерского, Инаглинского и Нижнетагильского массивов [Malitch, Thalhammer, 2002] позволило сделать вывод, что все изученные Pt-Fe минералы, за исключением одного образца тетраферроплатины из Нижнетагильского массива, являются железистой платиной, характеризующейся разупорядоченной гранецентрированной кубической структурой (*Fm3m*) и содержанием Fe между 20.52 и 36.16 ат.%. Несмотря на отсутствие рентгеноструктурных данных для Pt-Fe твердых растворов Бор-Уряхского массива по химическому составу (табл. 1 в [Малич, Когарко, 2011]) данные минералы соответствуют железистой платине.

Соотношения фаз равновесия Os-содержащих сплавов Бор-Уряхского массива, основанные на бинарной системе Os-Ir [Massalski, 1990], а также наличие включений богатых осмием сплавов в Pt-Fe минералах свидетельствуют о высокой температуре образования МПГ. Таким образом, не вызывает сомнения, что коренным источником платиноидной минерализации являются ультрамафиты Бор-Уряхского массива. Предполагается [Малич, Когарко, 2011], что изученные Pt-Fe сплавы характеризуют различные коренные источники. Действительно,

**Таблица 2. МПГ минералого-геохимических типов россыпей
клинопироксенит-дунитовых массивов [Малич, Лопатин, 1997]**

Минерал		Минералого-геохимический тип	
Вид, разновидность	Химическая формула	Иридиево- платиновый	Иридиево- осмиевый
Минералы осмия:			
а) осмий самородный	Os	В	ИИИ АА
б) Ir-содержащий осмий	(Os, Ir)	В	ИИИ ААВ
Рутениридосмин	(Os, Ir, Ru)	В	ВА
Os-содержащий иридий	(Ir, Os)	ВВ	А
Т.р. Ru, Ir, Os, Pt	(Ru, Ir, Os, Pt)	-	А
Т.р. Ru, Pt, Os, Ir	(Ru, Pt, Os, Ir)	-	А
Т.р. Pt, Ru, Os, Fe	(Pt, Ru, Os, Fe)	-	А
Т.р. Pt, Ru, Fe	(Pt, Ru, Fe)	-	А
Изоферроплатина, железистая платина	Pt ₃ Fe, Pt ₂ Fe	ИИИ А	ИВА
Тетраферроплатина	PtFe	ВА	-
Туламинит	Pt ₂ FeCu	ВА	-
Сперрилит	PtAs ₂	ИА	А
Эрликманит	OsS ₂	ВА	ВАА
Лаурит	RuS ₂	ИБ	ВА
Куперит	PtS	В	А
Брэггит	(Pt,Pd)S	ВА	-
Купроирисит	CuIr ₂ S ₄	В	А
Купорродсит	CuRh ₂ S ₄	В	-
Маланит	CuPt ₂ S ₄	В	-
Инаглиит	Cu ₃ PbIr ₈ S ₁₆	В	-
Кондерит	Cu ₃ PbRh ₈ S ₁₆	В	-
Ирарсит	IrAsS	ВА	А
Холлингвортит	RhAsS	ВА	-
Дисульфиды системы Os-Ru-Ir	(Ru,Os,Ir)S ₂	-	АВ
Мончеит	PtTe ₂	-	В
Теллурупалладинит	Pd ₉ Te ₄	В	В

Примечание. Т.р. – твердый раствор; И – индивиды, мономинеральные агрегаты; А – полиминеральные агрегаты; В – включения в индивидах и агрегатах. Распространенность минералов: ИИИ, ААА – от 10 до 100 мас.%; ИИ, АА, ВВ – от 1 до 10 мас.%; И, А, В – от 0.1 до 1 мас.%. В химических формулах минералов указаны элементы с содержанием более 10 ат. %. Таблица составлена по данным автора с использованием материалов А.Г. Мочалова и др. [Геология и генезис..., 1994] по иридиево-платиновому типу.

ранее выявленные высокие концентрации палладия в железо-платиновых твердых растворах из клинопироксенитов контрастируют с иридиевой специализацией Pt-Fe сплавов из хромититов и дунитов зональных клинопироксенит-дунитовых массивов [Johan et al., 1989; Малич, 1999; Malitch, Thalhammer, 2002; Malitch et al., 2020b и др.]. Богатые осмием сплавы Гулинского массива, представленные самородным осмием и Ir-содержащим осмием, типичны для дунитов и хромититов, соответственно [Малич и др., 2011b]. Основываясь на геологической позиции платиноидной минерализации и с учетом выявленных закономерностей геохимической специализации МПГ [Johan et al., 1989; Малич, 1999; Malitch, Thalhammer, 2002; Малич и др., 2011b; Barkov, Cabri, 2019; Malitch et al., 2020b и др.] коренным источником изученных Os-Ir сплавов, Ru-Os сульфидов и обогащенных иридием и родием Pt-Fe твердых растворов являются хромититы и дуниты. Источником Pt-Fe сплавов с низкими концентрациями примесных ЭПГ предположительно являются оливиниты.

2.2. Вещественный состав и условия образования МПГ из коренных пород Гулинского массива. Минералы платиноидов, характерные для хромититов Гулинского массива, представлены Ir-содержащим осмием (Os,Ir) и лауритом (RuS₂), которые преобладают над тетраферроплатиной (PtFe) и заккариинитом (RhNiAs) [Малич, Рудашевский, 1992; Осмиеносность Гулинского клинопироксенит-дунитового..., 1995, Малич и др., 2011b]. Для дунитов характерен самородный осмий (Os) [Балмасова и др., 1992b]. Ir-содержащий осмий (Os₆₆Ir₂₈Ru₅) кроме преобладающего осмия содержит иридий (~28 ат.%) и рутений (~5 ат.%). Закономерное отличие химического состава платиноидной минерализации в дунитах и хромититах может быть обусловлено либо фракционной кристаллизацией в мантийном источнике, либо уменьшением Os/Ir отношения в минералах осмия после внедрения силикатного расплава в коровых условиях [Merkle et al., 2012]. Лаурит кроме рутения и серы содержит незначительные концентрации осмия и иридия, которые изменяются в пределах 0.70-1.64 и 0.50-0.93 ат.% соответственно. Высокотемпературная природа образования Ru-Os сульфидов была подтверждена экспериментально [Andrews, Brenan, 2002]. Верхняя термальная стабильность лаурита оказалась равной 1200-1250°С при logfS₂ = -1; при этом лаурит может находиться в равновесии с Os-Ir сплавами при 1200-1250°С и logfS₂ в интервале от -0.39 до -0.07 [Andrews, Brenan, 2002]. На примере природных Os-содержащих сплавов и лаурита Гулинского (рис. 6в) и Шеландского [Badanina et al., 2013] массивов выявлена идеальная сходимость с экспериментально полученными результатами [Andrews, Brenan, 2002], свидетельствующими о совместной кристаллизации данных МПГ (1200-1250°С и fS₂ = 10^{-0.39}-10^{-0.07}).

Окислительно-восстановительный режим глубинных процессов, мерой которого может служить собственная летучесть кислорода (intrinsic oxygen fugacity, fO₂), наряду с температурой и давлением является одним из определяющих условий эволюции пород верхней мантии, процессов ее плавления и дегазации [Борисов и др., 1991]. Экспериментальные исследования МПГ из дунит-гарцбургитовых и клинопироксенит-дунитовых массивов с использованием твердых электрохимических ячеек позволили определить значения fO₂ для Ru-Os-Ir и Pt-Fe сплавов и уточнить окислительно-восстановительные условия их формирования [Кадик и др., 1993; 1998; Малич и др., 2011b; Баданина и др., 2015]. В частности, значения fO₂ самородного осмия дунитов и Ir-содержащего осмия хромититов Гулинского массива при 800-1100°С находятся между стандартными буферными равновесиями

вюстит – магнетит (WM) и кварц – фаялит – железо (QFI) и по наклону соответствуют зависимости буфера fO₂ WM [Малич и др., 2011b]. Сходство значений собственной летучести кислорода минералов самородного осмия и Ir-содержащего осмия свидетельствует о том, что образование этих минералов происходило в близких окислительно-восстановительных условиях. Действительно, гулинские хромититы, обладающие ярко выраженным подиформным характером залегания, пространственно и генетически связаны с дунитами. Выявленные окислительно-восстановительные условия минералов осмия из ультрамафитов Гулинского массива наряду с проведенными исследованиями для Ru-Os-Ir и Pt-Fe сплавов [Кадик и др., 1993; 1998; Баданина и др., 2015] свидетельствуют о сходстве значений fO₂ для исследованных МПГ мантийных перидотитов и ультраосновных магматических комплексов.

Со времени одной из первых работ К. Аллегра и Дж. Лака [Allegre, Luck, 1980] исследования по Re-Os систематике применительно к благороднометалльной минерализации из россыпей, связанных с офиолитовыми и зональными массивами, показали [Hattori, Hart, 1991; Hattori, Cabri, 1992; Костоянов, 1998; Малич, Костоянов, 1999; Malitch et al., 2002; Костоянов и др., 2003 и др.], что МПГ образовались в тесной ассоциации с ультраосновными породами, а не в гипергенных условиях как это предположено в ряде работ [Augustithis, 1965; Cousins, Kinloch, 1976; Bowles, 1986; 1995 и др.]. Устойчивость Os-изотопной систематики Os-содержащих минералов позволяет использовать начальные изотопные составы осмия в качестве эффективного инструмента при решении вопросов их происхождения, источников рудного вещества и изотопной эволюции [Малич и др., 2000; Hattori, 2002; Malitch, 2004; Walker et al., 2005; Pearson et al., 2007; Shi et al., 2007; Nowell et al., 2008; Marchesi et al., 2011; González-Jiménez et al., 2014; 2015; Tessalina et al., 2015; Badanina et al., 2016; Dijkstra et al., 2016; Malitch et al., 2017; 2020b; Prichard et al., 2017; Luguet et al., 2019 и др.]. Os-изотопные данные для хромитита и Ir-содержащего осмия из хромитита Гулинского массива характеризуются идентичными значениями ¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os (0.1242±0.0004 и 0.1243±0.0001, соответственно [Малич и др., 2011b]). Выявленное сходство начального изотопного состава осмия хромититов и Ir-содержащего осмия свидетельствует о том, что Os-изотопная систематика хромититов контролируется начальным изотопным составом осмия Os-содержащих сплавов. Пониженные относительно хондритового однородного резервуара (CHUR=0.12863±0.00046 [Chen et al., 1998]) значения ¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os указывают на субхондритовый источник ЭПГ.

3. По данным изучения U-Pb системы в бадделеите/цирконе и Th-U-Pb системы в ториаците установлена временная близость для карбонатитов Гулинского массива Маймеча-Котуйской провинции и ультрамафит-мафитовых интрузивов Таймырской провинции к пермо-триасовому рубежу и их синхронность с толеит-базальтовым магматизмом Сибирской платформы (~250 млн лет).

Циркон и бадделеит как инертные минералы обладают уникальной особенностью сохранять изотопно-геохимические метки наиболее ранних событий (U-Pb возраст, изотопные систематики Lu-Hf и кислорода), относящихся ко времени образования пород и их вещественных источников. Ториацит по сравнению с цирконом и бадделеитом является более поздним минералом, который обычно кристаллизуется на заключительных стадиях становления и/или преобразования

магматических комплексов. Поэтому вместе с цирконом и бадделейтом ториацит является важным источником получения геохронологической информации.

3.1. U-Pb возраст бадделейта и Th-U-Pb возраст ториацита карбонатитов Гулинского массива Маймеча-Котуйской провинции. Значительный разброс геохронологических данных для породных ассоциаций Гулинского массива ультраосновных и щелочных пород с карбонатитами (180–711 млн лет) предопределяет возможность контрастной интерпретации их генезиса [Егоров, 1991; Dalrymple et al., 1995; Когарко и др., 1996; Малич, 1999; Kamo et al., 2003; McKelson et al., 2005; Мамаева, 2006; Kogarko, Zartman, 2007; Малич и др., 2011б и др.]. Новые изотопно-геохимические данные основаны на результатах торий-уран-свинцового датирования ториацита (36 определений) и уран-свинцового датирования бадделейта (6 определений) [Малич и др., 2015], выделенных по технологии ppm-минералогии (см. подробнее на <http://www.natires.com>) из крупнообъемной пробы (G-15) кальцитовых карбонатитов Гулинского массива.

Изученный ториацит образует кубические кристаллы, субидиоморфные и идиоморфные кристаллические агрегаты размером от 0.8 до 1.2 мм, для которых характерны многочисленные включения фторапатита и бадделейта (рис. 1 в [Малич и др., 2015]). По результатам рентгеноспектрального микроанализа ториацит характеризуется высокими содержаниями урана (до 4.83 мас.%), свинца (1.07–1.14 мас.%) и церия (0.69–1.34 мас.% Ce_2O_3). Среднее значение содержаний ThO_2 , UO_2 и PbO по данным 36 анализов составило: $\text{ThO}_2 = 92.19 \pm 1.89$ мас.%, $\text{UO}_2 = 3.95 \pm 0.77$ мас.% и $\text{PbO} = 1.11 \pm 0.02$ мас.%. Сумма химических элементов ториацита варьирует в узких пределах (98.5–100.5 мас.%), что свидетельствует в пользу ненарушенности Th-U-Pb системы данного минерала. При химическом датировании ториацита его возраст характеризуется узким интервалом значений 244–254 млн лет, при среднем значении 250.1 ± 2.9 млн лет, среднеквадратичном отклонении (СКВО) = 0.09 и вероятности соответствия (P) = 1.00 (рис. 7).

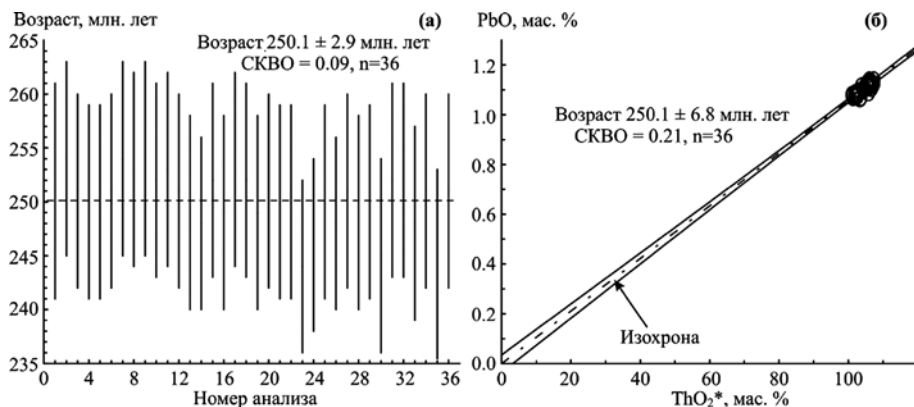


Рис. 7. Вариации значений возраста ториацита из карбоната Гулинского массива [Малич и др., 2015], рассчитанного по (а) единичным точкам с величиной их средневзвешенного возраста по методике [Montel et al., 1996] и (б) совокупности точек графика ThO_2^* -PbO по методике [Cocherie, Albarede, 2001; Suzuki, Adachi, 1991]. Погрешности рассчитанных значений возраста приведены на уровне 1 σ .

При построении зависимости ThO_2^* -PbO по совокупности точек (с использованием виртуальной точки [Cocherie, Albarede, 2001]), расчёт возраста по углу наклона изохроны даёт значение 250.1 ± 6.8 млн лет, СКВО = 0.21, P = 1.00 (рис. 7), где $\text{ThO}_2^* = (\text{ThO}_2 + \text{UO}_2^{\text{экв}})$, $\text{UO}_2^{\text{экв}}$ – содержание урана, пересчитанное в эквивалентное содержание тория [Suzuki, Adachi, 1991]. Шесть зерен бадделейта из карбоната Гулинского массива образуют компактный $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ возрастной кластер (250.8 ± 1.2 млн лет, СКВО = 0.2, P = 0.66, рис. 3 в [Малич и др., 2015]).

Новые геохронологические данные согласуются с оценкой возраста, полученной Rb-Sr-методом по паре минералов флогопит-кальцит из карбоната Гулинского массива (248.6 ± 2.8 млн лет с начальным отношением $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i = 0.70314 \pm 0.00007$, n = 2 [Мамаева, 2006]), а также близки к значению $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ возраста бадделейта (250.2 ± 0.3 млн лет [Kamo et al., 2003]) из кальцитового карбоната Гулинского массива и изохронному $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ возрасту (250.0 ± 8.7 млн лет [Kogarko, Zartman, 2007]) для всей совокупности преимущественно щелочно-ультраосновных пород Гулинского массива.

Таким образом, геохронологические результаты свидетельствуют о возрастной близости карбонатитов к пермо-триасовому рубежу и синхронности с толеит-базальтовым магматизмом Сибирской платформы (248.7 ± 0.6 – 250.3 ± 1.1 млн лет [Reichow et al., 2009]). Сходные геохронологические данные для ториацита и бадделейта, полученные двумя разными методами (химического датирования и лазерной абляции в совокупности с масс-спектрометрией с ионизацией в индуктивно-связанной плазме (LA ICP-MS), соответственно), определяют кальцитовые карбонатиты как наиболее поздние образования в пределах Гулинского массива, составляющие незначительный компонент одного из главных эпизодов магматической активности на рубеже Палеозоя и Мезозоя (~250 млн лет назад), в результате чего была сформирована одна из самых значительных провинций толеитовых платобазальтов на Земле [Ernst, Buchan, 2002; Reichow et al., 2009 и др.].

3.2. U-Pb возраст и геохимические особенности циркона потенциально рудоносных Бинюдинского и Дюмталейского интрузивов Таймырской провинции. Несмотря на длительное изучение пород и руд ультрамафит-мафитовых интрузивов Таймырской провинции, их геохронологические данные были охарактеризованы только в нескольких работах [Петров и др., 2009; Романов и др., 2011; Баданина и др., 2014; Augland et al., 2019 и др.]. Новые изотопно-геохимические данные основаны на результатах уран-свинцового датирования циркона (25 определений) из сульфидсодержащих меланотроктолитов Бинюдинского интрузива и различно рудоносных пород Дюмталейского интрузива [Малич и др., 2016; 2020]. Цирконы представлены идиоморфными и субидиоморфными, прозрачными и полупрозрачными, иногда трещиноватыми кристаллами призматического габитуса, окрашенными в бледно-бежевые тона; коэффициент удлинения цирконов варьирует от 1:1 до 2:1. Цирконы в наибольшем сечении не превышают 160 микрон, характеризуются в катодолуминесцентных лучах блоковым или слабо выраженным секториальным строением, вплоть до полного отсутствия зональности.

Цирконы Бинюдинского интрузива характеризуются концентрациями Th в пределах 568–1856 г/т (среднее – 1212 г/т), U – 412–964 г/т (среднее 688 г/т) и значением Th/U – 1.38–1.93 (среднее 1.66). Цирконы Дюмталейского интрузива обладают более высокими содержаниями Th (2364–6996 г/т, среднее – 3965 г/т), U (2657–4644 г/т, среднее – 3425 г/т) и более значимыми вариациями Th/U (0.51–2.35, среднее – 1.25).

Изученные зерна циркона характеризуются разным уровнем суммарных концентраций РЗЭ и характером распределения редкоземельных элементов [Малич и др., 2016]. Цирконы из рудоносных меланотроктолитов (обр. С1-4, Б-3) Бинюдинского интрузива и оливинового феррогаббро (обр. 43-20) Дюмталейского интрузива обладают меньшими суммарными концентрациями РЗЭ (188-290 и 789-944, соответственно), более выраженной цериевой аномалией и отсутствием отрицательной европиевой аномалии по сравнению с цирконом из оливинового феррогаббро (обр. 43-28) Дюмталейского массива.

Проанализированные зерна циркона из рудоносных пород Бинюдинского и Дюмталейского интрузивов характеризуются в пределах погрешности сходными значениями $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ возраста (245.7 ± 12 млн лет, среднее квадратичное отклонение (СКВО)=0.25, вероятность соответствия (P)=0.62 и 256.2 ± 0.89 млн лет, СКВО=2.0, P=0.16, соответственно). Характерно, что проанализированные зерна циркона из нерудоносных пород Дюмталейского интрузива обладают сходными значениями $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ возраста: $T_1 = 250.9 \pm 3.1$ млн лет (СКВО=1.4, n=10) и $T_2 = 253 \pm 1$ млн лет (СКВО=0.65, n=10), соответственно (рис. 8).

Таким образом, для цирконов Бинюдинского и Дюмталейского интрузивов характерны как различные, так и сходные параметры. По уровню содержания Th и U и по характеру распределения РЗЭ цирконы Бинюдинского интрузива отличаются от таковых Дюмталейского интрузива. Тем не менее, вариации содержания Th и U в цирконах Бинюдинского и Дюмталейского интрузивов близки таковым в цирконах рудоносных и промышленно-рудоносных интрузивов Норильской провинции [Малич и др., 2018; Isotope Geology..., 2019]. На бинарной диаграмме Th-U поля составов цирконов различно рудоносных интрузивов Норильской провинции, несмотря на некоторые отличия, близки или перекрываются друг с другом. Они также частично перекрываются с полем составов цирконов из слюдитов [Rudnick et al., 1998] – производных мантийного метасоматоза, но отличаются от цирконов других геологических образований.

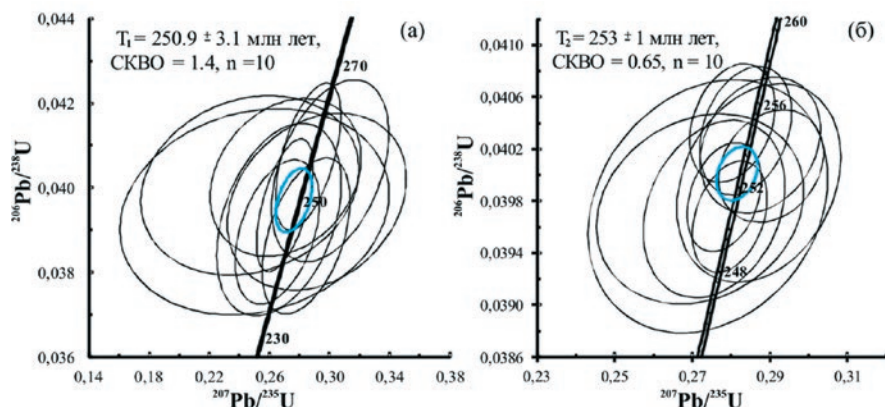


Рис. 8. Диаграммы с конкордией для циркона из монцодиорита (а) и габбро (б) Дюмталейского интрузива в координатах $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ – $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ [Малич и др., 2020]. Эллипсы – погрешности каждого анализа на уровне 1σ. Погрешности вычисленных значений возраста – 2σ.

Сходный U-Pb возраст цирконов Бинюдинского и Дюмталейского интрузивов свидетельствует о возрастной близости к пермо-триасовому рубежу и синхронности с толеит-базальтовым магматизмом Сибирской платформы (248.7 ± 0.6 – 250.3 ± 1.1 млн лет [Reichow et al., 2009], 248 ± 1 млн лет [Rene, Basu, 1991]). По возрастным параметрам изученные интрузивы отличаются от промышленно-рудоносных интрузивов Норильской провинции, для которых характерна значительно более длительная история их образования [Петров и др., 2009; Малич и др., 2010; 2012; 2018; Malitch et al., 2010; 2018; Isotope Geology..., 2019 и др.].

4. Ключевая роль при формировании сульфидных ЭПГ-Cu-Ni месторождений Норильской провинции принадлежит глубинным магматическим камерам. Гомогенный изотопный состав серы для массивных и вкрапленных руд Хараелахского ($\delta^{34}\text{S} = 12.66 \pm 0.49\%$) и Талнахского ($\delta^{34}\text{S} = 10.92 \pm 0.62\%$) месторождений свидетельствует в пользу контаминации мантийных магм «коровым» компонентом не на этапе внедрения интрузивных тел, а в более глубоких условиях, где и была достигнута гомогенизация изотопного состава серы. Вариации изотопного состава меди ($\delta^{65}\text{Cu}$) обусловлены различием изотопных параметров рудного вещества первичных магм, сформировавшихся сульфидные ЭПГ-Cu-Ni руды промышленных месторождений (от -1.1 до 0.0‰ для Талнахского месторождения и от -0.1 до 0.6‰ для месторождения Норильск-1). Для «изотопно-лёгких» составов меди ($\delta^{65}\text{Cu}$ от -2.3‰ до -0.9‰) сульфидных руд Хараелахского месторождения допускается участие внешнего источника меди.

Использование изотопно-геохимических подходов при изучении ультрамафит-мафитовых интрузивов и ассоциирующих с ними сульфидных ЭПГ-Cu-Ni руд весьма эффективно для выявления источников силикатного и рудного вещества, роли коровых компонентов и уточнения генезиса интрузивов и оруденения. В частности, на основе Os-, Pb- и Cu-изотопных составов сульфидных ЭПГ-Cu-Ni руд признаётся важная роль промежуточных магматических камер при образовании ЭПГ-Cu-Ni месторождений Норильской провинции [Wooden et al., 1992; Walker et al., 1994; Arndt et al., 2003; Спиридонов, 2010; Malitch, Latypov, 2011; Malitch et al., 2014; Малич и др., 2018]. Изотопные данные по составу кислорода и гафния в цирконе/бадделеите в совокупности с Nd-изотопными данными пород и S-Cu-Os изотопным составом руд обеспечили новый набор ограничений на происхождение промышленно-рудоносных интрузивов норильского типа [Malitch et al., 2008; 2010; 2013; 2014; 2018; 2020a; Петров и др., 2009; 2011; Malitch, Petrov, 2010; Malitch, Latypov, 2011; Малич и др., 2018; Баданина и др., 2019; Isotope Geology..., 2019 и др.].

4.1. Генетические ограничения на происхождение сульфидных ЭПГ-Cu-Ni руд по данным Cu-S изотопии. Понимание главных событий сульфидного платиноидно-медно-никелевого рудообразования невозможно без анализа источников и поведения главных рудообразующих компонентов, составляющих сульфидные ЭПГ-Cu-Ni руды, а именно осмия, серы и меди. Изученные руды *промышленно-рудоносных* интрузивов представлены тремя главными типами. Первый тип характеризуют массивные платиноидно-медно-никелевые сульфидные руды промышленных месторождений, которые тяготеют обычно к нижнему экзоконтакту Талнахского и Хараелахского интрузивов (рис. 1). Второй тип представлен вкрапленными рудами, расположенными в нижних частях интрузивов, сложенных

ультраосновными породами и преимущественно основными породами с такситовой текстурой (рис. 1). Третий тип образует малосульфидный обогащенный платиноидами горизонт, приуроченный к верхним частям интрузива Норильск-1. Для *рудноносных* и *потенциально-рудноносных* интрузивов характерны вкрапленные сульфидные платиноидно-медно-никелевые руды, тогда как *слаборудноносные* интрузивы обладают вкрапленной сульфидной Cu-Ni минерализацией. Среди сульфидов вкрапленных и массивных руд доминируют пирротин, халькопирит и пентландит.

4.1.1. Генетические ограничения на происхождение сульфидных руд по данным Cu-изотопии. В целях выявления источников рудного вещества Cu-изотопный анализ сульфидов был апробирован для широкого спектра геологических объектов, включая сульфидные платиноидно-медно-никелевые месторождения [Zhu et al., 2000; Larson et al., 2003; Петров и др., 2009; Malitch et al., 2014; Ripley et al., 2015; Zhao et al., 2017; 2019; Малич и др., 2018; Прасолов и др., 2018; Isotope Geology..., 2019; Tang et al., 2020 и др.], порфировые меторождения [Larson et al., 2003; Graham et al., 2004; Mathur et al., 2005; 2009; 2012; Asael et al., 2007; Wu et al., 2017], скарновые месторождения [Larson et al., 2003; Graham et al., 2004; Maher, Larson, 2007], вулканогенные массивные сульфидные отложения и современные черные курильщики [Zhu et al., 2000; Rouxel et al., 2004; Mason et al., 2005], другие гидротермальные отложения (месторождения самородной меди Мичигана [Larson et al., 2003]), осадочные Cu месторождения [Asael et al., 2007] и др. К характерным особенностям изотопного состава меди в различных рудообразующих системах относятся: (1) значения $\delta^{65}\text{Cu}$ Cu-содержащих минералов, которые близки к нулю; (2) диапазон значений $\delta^{65}\text{Cu}$ в большинстве геологических образований превышает 1‰; (3) минералы, подверженные низкотемпературным окислительно-восстановительным процессам, имеют более переменные значения $\delta^{65}\text{Cu}$, чем минералы, образовавшиеся при высоких температурах [Larson et al., 2003; Mathur et al., 2009; 2012 и ссылки в них].

Данные об изотопном составе меди для расслоенных интрузивов, таких как Бушвельд, Стиллуотер и Сэдбери, с которыми ассоциируют мировые платиноидные и медно-никелевые месторождения [Zhu et al., 2000; Larson et al., 2003] характеризуются ограниченным диапазоном значений $\delta^{65}\text{Cu}$ в халькопирите, не превышающем 1–1.5‰, при этом основной кластер значений $\delta^{65}\text{Cu}$ составляет от –0.23‰ до +0.13‰ [Zhu et al., 2000] или от –0.20‰ до –0.1‰ [Larson et al., 2003]. Аналогичные или даже более узкие диапазоны значения $\delta^{65}\text{Cu}$ были зарегистрированы в мантийных перидотитах [от 0.0‰ до 0.18‰; Ben Othman et al., 2006], базальтах [от –0.10 до –0.03‰; Luck et al., 2003] и гранитах (–0.46 до 1.51‰, с основным кластером значений в пределах от –0.14 до ≤ 0.25 ‰ и средним $\delta^{65}\text{Cu}$ 0.01 ± 0.30 ‰ [n=30, при исключении двух образцов, выходящих за пределы кластера основных данных, Li et al., 2009b]). Эти результаты показывают, что фракционирование изотопов Cu в процессах земной дифференциации является незначительным. Однако углистые хондриты обладают значениями $\delta^{65}\text{Cu}$ в диапазоне от –1.5 до 0.0‰, а обычные хондриты вместе с железными метеоритами варьируют в пределах от –0.5 до 0.5‰ [Luck et al., 2003; 2005], что свидетельствует о фракционировании изотопных составов меди [Luck et al., 2003; 2005]. Следует отметить, что морская вода имеет $\delta^{65}\text{Cu}$ от 0.75 до 1.35‰, что намного тяжелее, чем предполагалось [Bermin et al., 2006].

Значимые $\delta^{65}\text{Cu}$ вариации, достигающие около 3‰ (от –2.3‰ до +0.6‰), были выявлены в сульфидных рудах промышленно-рудноносных интрузивов Норильского

района (рис. 9). Эти Cu-изотопные результаты превышают типичный диапазон значений $\delta^{65}\text{Cu}$ в высокотемпературных сульфидах, образованных мантийными магмами [от –1.0 до 1.0‰; Zhu et al., 2000; Larson et al., 2003; Ripley et al., 2015; Zhao et al., 2017; 2019; Tang et al., 2020 и др.]. При этом сульфидные ЭПГ-Cu-Ni сульфидные руды промышленно-рудноносных интрузивов Норильского района образуют тренд дискретных изотопных составов меди (рис. 9).

Вариации изотопного состава меди в массивных и вкрапленных сульфидных рудах Хараелахского интрузива характеризуется сходными значимо «изотопно-легкими» характеристиками ($\delta^{65}\text{Cu}$ от –2.3 до –0.9‰). Для большинства сульфидных вкрапленных и массивных руд Талнахского интрузива наблюдается незначительное «облегчение» изотопного состава меди ($\delta^{65}\text{Cu}$ варьирует от –1.1 до 0.0‰). «Изотопно-тяжелая» медь установлена во вкрапленных ЭПГ-Cu-Ni сульфидных рудах интрузива Норильск-1 ($\delta^{65}\text{Cu} = -0.1 \dots +0.6$ ‰), с максимальным фактором утяжеления в горизонте малосульфидных платиноидных руд ($\delta^{65}\text{Cu} = 1.0 \pm 0.15$ ‰). По данным Cu-изотопной систематики вкрапленные сульфидные руды других ультрамафит-мафитовых интрузивов Норильской и Таймырской провинций (рис. 9) попадают в узкий кластер значений $\delta^{65}\text{Cu}$ (от –1.1 до 0‰), типичный для массивных и вкрапленных руд промышленно-рудноносного Талнахского интрузива ($\delta^{65}\text{Cu}$ среднее = -0.24 ± 0.25 ‰ и -0.7 ± 0.4 ‰, соответственно), углистых хондритов и железных метеоритов [Luck et al., 2003; 2005].

Различные процессы могут вызывать наблюдаемые изменения в Cu-изотопном составе сульфидных ассоциаций, включая (i) наличие магм/сульфидных жидкостей с различным изотопным составом, (ii) магматическое и/или (iii) немагматическое фракционирование изотопов меди. Показано, что окислительно-восстановительные реакции играют важную роль во фракционировании изотопов Cu при низких температурах [Zhu et al., 2002; Graham et al., 2004; Rouxel et al., 2004; Asael et al., 2006; Markl et al., 2006]. В общем случае вариации изотопного состава меди

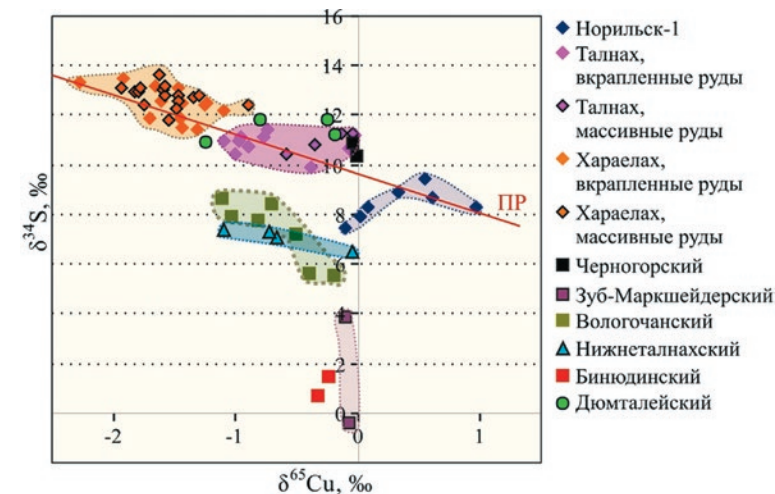


Рис. 9. Вариации изотопного состава серы и меди в различных рудоносных интрузивах Полярной Сибири в координатах $\delta^{34}\text{S}$ – $\delta^{65}\text{Cu}$ [Malitch et al., 2014; Малич и др., 2016].

могут быть обусловлены фракционированием флюидно-минеральных веществ во время осаждения, физико-химическими условиями флюида (например, окислительно-восстановительными изменениями), влиянием гидротермальных процессов [Graham et al., 2004; Rouxel et al., 2004] и фракционированием между различными сложными соединениями в растворе [Maréchal, Albarède, 2002]. Было также показано, что окислительно-восстановительные реакции продуцируют богатые Cu минералы в различных валентных состояниях, то есть Cu (I) и Cu (II), и могут дополнительно варьировать в зависимости от насыщенности раствора [Mason et al., 2005]. В порфировых медных рудах значения $\delta^{65}\text{Cu}$ составляют значительный диапазон от -16.96 до $+9.98\text{‰}$ [Mathur et al., 2009] и ссылки в нем]: халькопирит из первичной высокотемпературной минерализации имеет относительно ограниченный кластер значений $\delta^{65}\text{Cu}$ от $+1$ до -1‰ , тогда как вторичные минералы, образованные при низкотемпературных процессах, имеют значения $\delta^{65}\text{Cu}$ от -16.96 до $+9.98\text{‰}$ [Mathur et al., 2009]. Вторичный халькоцит обладает относительно тяжелым изотопным составом меди, при этом $\delta^{65}\text{Cu}$ изменяется от -0.3 до 6.5‰ , тогда как минералы выщелачивания, в которых доминируют Fe-оксиды (ярозит, гематит и гетит), характеризуются относительно легким составом меди [$\delta^{65}\text{Cu}$ от -9.9 до 0.14‰ , Mathur et al., 2009], что свидетельствует о вторичной природе изотопных вариаций. Окислительно-восстановительные процессы считаются ответственными за изотопно-легкую медь халькопирита в стратиформных осадочных месторождениях меди, где Cu-сульфиды образуются при взаимодействии Cu-содержащих растворов с H_2S при бактериальном восстановлении внутрипоровой воды, содержащей сульфаты [Asael et al., 2007].

Принято считать, что значительное изменение изотопных составов меди является результатом вторичных процессов. В данном контексте, сдвиг значений $\delta^{65}\text{Cu}$ для сульфидных руд Хараелахского месторождения (от -2.3 до -0.9‰) может быть связан с ассимиляцией внешнего источника меди [Малич и др., 2018; Malitch et al., 2014]. Таким внешним источником меди могла быть самородная медь Арылахского месторождения Норильской провинции, для которой характерен изотопно-легкий состав меди ($\delta^{65}\text{Cu} = -1.9 \pm 0.15\text{‰}$ [Малич и др., 2018; Malitch et al., 2014]). Другим внешним источником меди для сульфидных ЭПГ-Cu-Ni месторождений Норильской провинции могли являться стратиформные месторождения меди, подобные тем, что установлены в протерозойских осадочных образованиях в Игарском поднятии [Ржевский и др., 1980; 1988]. Кроме того, сдвиг значений $\delta^{65}\text{Cu}$ для сульфидных руд Хараелахского месторождения (от -2.3 до -0.9‰) может быть связан с магматическим фракционированием изотопов меди [Malitch et al., 2014]; однако возможность подобного фракционирования необходимо подтвердить экспериментально.

Таким образом, особенности изотопного состава меди в сульфидных рудах, сформировавших Талнахское месторождение ($\delta^{65}\text{Cu} = -0.55 \pm 0.41\text{‰}$) и месторождение Норильск-1 ($\delta^{65}\text{Cu} = 0.23 \pm 0.28\text{‰}$), отражают их первичную характеристику. Для Хараелахского месторождения, характеризующегося наиболее «изотопно-лёгким» составом меди ($\delta^{65}\text{Cu} = -1.56 \pm 0.27\text{‰}$), весьма вероятно участие внешнего источника меди при формировании сульфидных ЭПГ-Cu-Ni руд.

4.1.2 Генетические ограничения на происхождение сульфидных руд по данным S-изотопии. Ключевой вопрос о том, почему сульфидные ЭПГ-Cu-Ni руды месторождений Норильской провинции содержат изотопно-тяжелую серу, обсуждался с 1960-х годов [Годлевский, Гриненко, 1963; Виноградов, Гриненко,

1966; Кузьмин, Туганова, 1977; Гриненко, 1966; 1984; 1990; Grinenko, 1985; Godlevsky, Likhachev, 1986; Дистлер и др., 1998; Пушкарев, 1997; Туганова, 2000; Li et al., 2003; Ripley et al., 2003; 2010; Ripley, Li, 2003; 2013; Malitch, Latypov, 2011; Криволицкая, 2014а; 2014б; Malitch et al., 2014; Krivolutsкая, 2016; Iacono-Marziano et al., 2017; Малич и др., 2018; Рябов и др., 2018; Лихачев, 2019; Isotope Geology, 2019 и др.].

Повышенные значения $\delta^{34}\text{S}$ сульфидов ($8-13\text{‰}$) в месторождениях Норильского района использовались в качестве аргумента в пользу коровой контаминации [Годлевский, Гриненко, 1963; Виноградов, Гриненко, 1966; Гриненко, 1966; 1990; Li et al., 2003; Ripley, Li, 2003; 2013; Ripley et al., 2003; 2010; Iacono-Marziano et al., 2017; Isotope Geology, 2019]. Однако ассимиляция не является общепринятой точкой зрения для формирования норильских месторождений [Кузьмин, Туганова, 1977; Гриненко, 1984; Grinenko, 1985; Wooden et al., 1992; Дистлер и др., 1998; Пушкарев, 1997; Лихачев, 2006; Malitch, Latypov, 2011; Криволицкая, 2014а; 2014б; Malitch et al., 2014; Krivolutsкая, 2016; и др.].

Массивные и вкрапленные руды Хараелахского и Талнахского интрузивов имеют значения $\delta^{34}\text{S}$ $12.7 \pm 0.5\text{‰}$ и $10.9 \pm 0.6\text{‰}$, соответственно [Malitch et al., 2014], что часто используется в качестве аргумента коровой контаминации как основного фактора для их образования. В этом сценарии высокие значения $\delta^{34}\text{S}$ сульфидов ($8-13\text{‰}$) в промышленно-рудноносных интрузивах обусловлены контаминацией родительской магмы коровой серой, обогащенной $\delta^{34}\text{S}$ [Виноградов, Гриненко, 1966; Гриненко, 1966]. Предполагается, что источником серы земной коры являются ангидритсодержащие осадки, которые имеют высокие значения $\delta^{34}\text{S}$ [$18-22\text{‰}$, Ripley et al., 2010 и 17.8‰ , Malitch, Latypov, 2011] и пространственно близки с промышленно-рудноносным Хараелахским интрузивом. Контаминация могла произойти либо во время внедрения поднимающейся магмы [Arndt et al., 2003], либо *in situ* (на месте современной камеры) при помощи флюидов [Li et al., 2003]. Однако контаминация на месте маловероятна, так как два других промышленно-рудноносных интрузива (Талнахский и Норильск-1) расположены значительно выше по разрезу над эвапоритовыми толщами [Malitch, Latypov, 2011; Krivolutsкая et al., 2012; Ripley, Li, 2013]. Альтернативным объяснением является наличие мантийного источника с необычно тяжелой серой под интрузивами норильского типа [Wooden et al., 1992; Лихачев, 2006]. Л.Н. Гриненко [1984] предположила, что родоначальные магмы были сульфуризированы в промежуточных очагах сероводородсодержащими газами, которые характеризовались изотопно-тяжелой серой ($\delta^{34}\text{S} = +10\text{‰}$).

Метасоматоз, связанный с субдукцией, использовался для объяснения тяжелых изотопов серы ($\delta^{34}\text{S}$ до $+14\text{‰}$) в сходных по составу сульфидных включениях (пирротин, халькопирит и пентландит) в алмазах [Chaussidon et al., 1987; 1989; Eldridge et al., 1991]. Возможно поэтому некоторые исследователи [Додин и др., 2001; Starostin, Sorokhtin, 2011] предполагали, что происхождение рудоносных магм, родоначальных для интрузивов норильского типа, может быть связано с субдукционными процессами. В.В. Дистлер с соавторами [1988] отмечали, что осадки могут служить источником серы для сульфидных платиноидно-медно-никелевых месторождений Норильской провинции, но не таких металлов, как Ni и платиноиды (Pd, Pt, Rh, Ru, Ir, Os).

Вкрапленные руды Зуб-Маркшейдерского интрузива, расположенного в сульфатоносных отложениях девона, характеризуются минимальной долей так

называемого «корового» компонента (среднее значение $\delta^{34}\text{S}=0.4\text{‰}$ со стандартным отклонением 1.6‰ [Malitch et al., 2014]) и свидетельствуют о мантийном источнике серы, и следовательно, о ее мантийном происхождении. Аналогично, вкрапленные руды Накохозского интрузива, которые испытали ассимиляцию большого количества вмещающих пород [Годлевский, 1959], также имеют низкие значения $\delta^{34}\text{S}$ со средним значением $2.7\pm 2.3\text{‰}$ [Кузьмин, Туганова, 1977]. Результаты по изотопии серы для Накохозского и Зуб-Маркшейдерского интрузивов несовместимы с моделью, для которой требуется ассимиляция серы земной коры в качестве необходимой предпосылки для формирования магматического месторождения. Эти результаты свидетельствуют о том, что «мантийный» изотопный состав серы первичной сульфидной минеральной ассоциации не был изменен ни во время взаимодействия в глубокой промежуточной камере, ни при продвижении к поверхности, ни при внутрикамерной ассимиляции на месте современной локализации интрузива, как это часто предполагается [Arndt et al., 2003; Li et al., 2003; Iacono-Marziano et al., 2017; и др.]. Характерно, что сульфидсодержащие породы слабрудноносного Нижнеталнахского интрузива характеризуются далеко не самой «изотопно-тяжелой» серой (среднее значение $\delta^{34}\text{S}=6.4\pm 1.9\text{‰}$), хотя согласно данным Re-Os, Rb-Sr, Sm-Nd и Lu-Hf изотопии [Walker et al., 1994; Arndt et al., 2003; Петров и др., 2009; Малич и др., 2018; Malitch et al., 2018; Isotope Geology..., 2019 и др.] испытали наибольшую степень коровой контаминации. В качестве альтернативной гипотезы низкие значения $\delta^{34}\text{S}$ сульфидной минеральной ассоциации Зуб-Маркшейдерского интрузива могут быть связаны с взаимодействием мантийных сульфидов и гипотетического корового источника [Keays, Lightfoot, 2010], имеющего $\delta^{34}\text{S}$ около 0‰ .

Сегрегация больших количеств сульфидов могла произойти в глубоководной промежуточной камере в процессе коровой контаминации [Hawkesworth et al., 1995; Arndt et al., 2003; Lightfoot, Keays, 2005; Ripley, Li, 2013]. В модели Ч. Ли и др. [Li et al., 2009a] предполагается, что сульфиды были повторно растворены новыми магмами, перенесены в места современной локализации интрузивов, где заново образовались при взаимодействии магм с ангидрит-содержащими породами. Однако этот сценарий трудно согласовать с однородностью величин $\delta^{34}\text{S}$ во вкрапленных и массивных сульфидных рудах Талнахского и Хараелахского интрузивов [Malitch et al., 2014], которые, как представляется, требуют наличия долгоживущей промежуточной камеры для достижения изотопной гомогенности серы. Ю.Д. Пушкарёв [1997] обосновывал процесс корово-мантийного взаимодействия, который происходил в мантии и позволял достичь высокого уровня изотопной однородности серы.

Вопрос о том, должна ли коровая сера быть вовлечена в образование сульфидных платиноидно-медно-никелевых месторождений был критически оценен в ряде работ [Keays, Lightfoot, 2010; Ripley, Li, 2013]. Тот факт, что многие крупные сульфидные ЭПГ-Cu-Ni месторождения образуются с участием внешнего источника серы, предполагает, что эффективное концентрирование несмешиваемого сульфидного вещества, имеющего исключительно мантийный источник серы, встречается редко. Однако, если магматическая система достаточно велика, промышленные месторождения имеют возможность образоваться и без дополнительного внешнего источника серы [Ripley, Li, 2013]. Таким образом, S-изотопные данные по Зуб-Маркшейдерскому, Вологодчанскому и Хараелахскому интрузивам, расположенным на одном и том же стратиграфическом уровне, позволяют сделать два важных вывода: (i) взаимодействие сульфидсодержащей

магмы с вмещающими породами может происходить в долгоживущей промежуточной камере задолго до внедрения интрузива и (ii) вмещающие породы, непосредственно контактирующие с интрузивом, могут иметь малое влияние на сульфидную минерализацию.

4.2. *Модель образования ультрамафит-мафитовых интрузивов и богатых сульфидных ЭПГ-Cu-Ni руд.* Полученная принципиально новая информация достаточна для формулирования новых подходов к моделированию условий формирования промышленных сульфидных ЭПГ-Cu-Ni месторождений Норильской провинции. В основу модели рудообразующих процессов положен механизм мантийно-корового взаимодействия. Мантийно-коровое взаимодействие обосновывается полученными и литературными данными по радиогенным (Lu-Hf, Re-Os, Sm-Nd, Rb-Sr) и стабильным (O, S и Cu) изотопным системам пород и минералов, указывающих на участие компонентов с коровыми изотопными метками в общем процессе породо- и рудообразования, связанного с мантийными магмами. Достоинством модели является возможность ее использования для объяснения продвижения мантийных расплавов в области земной коры и непрерывного изменения состава расплава в отдельных его зонах в связи с явлениями контаминации и конвективного перераспределения вещества.

По мнению В.В. Дистлера и др. [Distler et al., 2009 и др.] образование различных по составу, строению и рудоносности интрузивов может быть связано с процессами динамической и химической эволюции единого магматического резервуара предположительно на границе мантия-кора. В таком сценарии могут быть выделены области магматического резервуара, соответствующие: (i) производным наименее измененных последующими процессами первичных «примитивных» магм с наименьшим вкладом в их состав контаминирующих компонентов (рудноносные интрузивы с ограниченным объемом магматических сульфидов); (ii) производные прифронтальной области резервуара, в которой, в силу развития конвективных процессов, происходит наибольшее накопление высокохалькофильных элементов и подвижных компонентов, к числу которых принадлежит флюидная фракция расплавов (промышленно-рудноносные интрузивы с переменным количеством компонентов, в том числе с очень богатым сульфидным оруденением); (iii) производные деплетированной тыловой зоны магматического резервуара (слабрудноносные интрузивы).

Важным ключом к пониманию происхождения месторождений Норильской провинции является анализ глубинного строения земной коры (рис. 10), позволяющий связывать формирование платиноидно-медно-никелевых месторождений с палеорифтогенными системами литосферы, имеющими типичные для таких структур геолого-геофизические параметры. Они проявляются в (i) высокоградиентных прогибах фундамента, (ii) насыщенности коры горстово-грабеновыми структурами, высокой плотности расколов в коре, (iii) крупных объемах магматического мантийного вещества, (iv) наличии слоев (волноводов) с инверсией сейсмических скоростей. Судя по сейсмическим данным [Егоркин и др., 1984; Malitch et al., 1987], в основании земной коры Норильского региона располагается переходная зона с повышенной (относительно коровых образований) скоростью продольных волн ($V_p=7.3$ км/с). Эта зона (называемая «рифтовой подушкой») мощностью 5-10 км и протяженностью около 500 км на глубинах 32-43 км является следствием инъекции ультрамафитового материала с сульфидами в подкоровую часть литосферы (рис. 10).

На основании полученных данных была предложена трехстадийная модель формирования богатых ЭПГ-Cu-Ni руд, которая обосновывается [Malitch et al., 2020a] внедрением в основание земной коры значительных по объему ультрамафитов с мантийными сульфидами (стадия 1), последующим концентрированием сульфидной жидкости и контаминацией коровым веществом в долгоживущих промежуточных магматических камерах (стадия 2), (iii) захватом и перемещением сульфидного вещества вместе с ультрамафитами в современные камеры более поздними преимущественно мафитовыми расплавами (стадия 3).

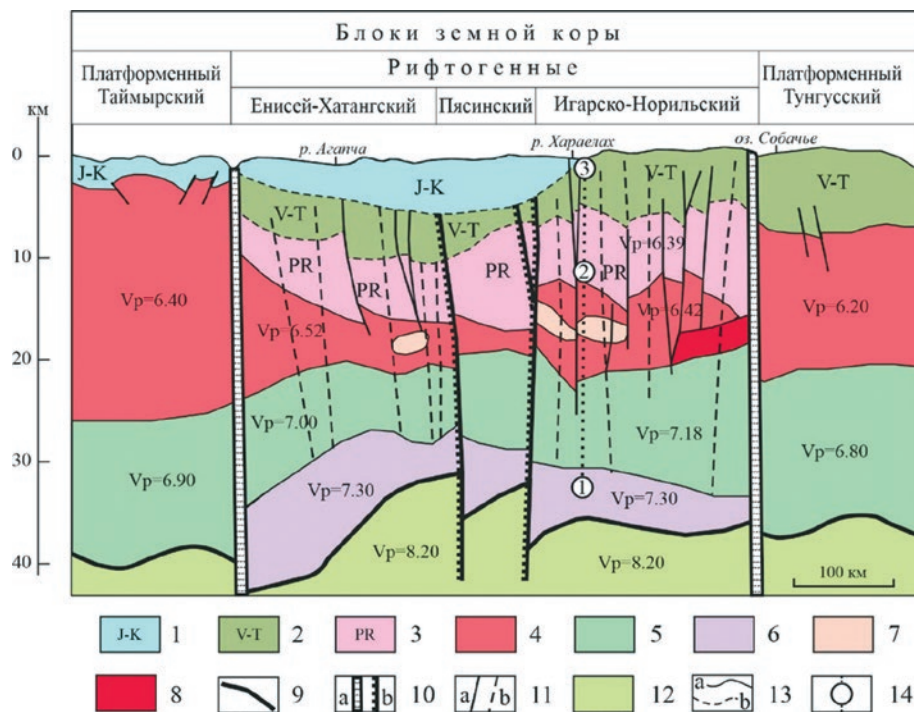


Рис. 10. Сейсмогеологический разрез северной части профиля Диксон-Хилкок по [Егоркин и др., 1984; Малич и др., 1988] с изменениями [Malitch et al., 2020a]. 1-5 – оболочки земной коры: 1-3 – осадочно-вулканогенные (1 – терригенный комплекс J-K, 2 – осадочно-вулканогенный комплекс V-T с рудными интрузивами, 3 – осадочно-вулканогенный комплекс PR), 4 – «гранитная», 5 – «базальтовая», 6 – промежуточный сейсмический слой ($V_p = 7.3$ км/с) между корой и мантией; 7 – разуплотненные «линзы» в консолидированной коре; 8 – линзы с повышенной плотностью; 9 – поверхность Мохоровича; 10-11 – разломы: 10 – мантийные (а – ограничивающие всю рифтогенную систему в целом, б – ограничивающие отдельные блоки рифтогенной системы), 11 – коровые (а – прослеженные, б – предполагаемые); 12 – мантия; 13 – сейсмические границы земной коры (а – уверенные, б – предполагаемые); 14 – траектория формирования ЭПГ-Cu-Ni сульфидных руд: 1 – «рифтовая подушка», 2 – промежуточные глубинные магматические очаги, 3 – приповерхностные магматические камеры. Другие объяснения даны в тексте.

5. Сопряженный характер изотопных параметров серы ($\delta^{34}\text{S}=8-13\text{‰}$), осмия ($^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}=0.1283-0.1366$) и меди ($\delta^{65}\text{Cu}$ от -2.1 до 0.6‰) в Cu-Ni сульфидах является новым изотопно-геохимическим индикатором прогноза богатых сульфидных ЭПГ-Cu-Ni руд.

На протяжении всей истории открытия и изучения Норильского рудного района велся непрерывный поиск надежных критериев прогноза месторождений цветных и благородных металлов, связанных с ультрамафит-мафитовыми интрузивами. Главными из них являются глубинные, структурные, магматические и литолого-стратиграфические критерии. Важны также петрохимические, минералогические, метаморфические, литогеохимические, гидрогеохимические и другие признаки [Карта перспективной оценки..., 1976; 1979; Ляхницкая, Туганова, 1977; Ляхницкая и др., 1978; 1986; Поисковые критерии..., 1978; Тарасов, 1980; Геологическое строение СССР..., 1987; Лихачев, 1986; Металлогеническая карта..., 1984; 1987; Принципы и методы..., 1987; Степанов, 1989; Петров и др., 2009; Туганова, 2000; Малич и др., 2018; Malitch et al., 2018; Isotope Geology..., 2019; Лихачёв, 2020; Malitch, 2021]. На примере различно рудоносных ультрамафит-мафитовых интрузивов и сульфидных ЭПГ-Cu-Ni руд Полярной Сибири нами предложены новые изотопно-геохимические критерии, позволяющие оценить перспективы выявления новых рудных объектов [Малич и др., 2018; Malitch et al., 2018; Malitch, 2021].

Наиболее значимыми при оценке рудоносности являются изотопные параметры состава осмия, серы и меди в Cu-Ni сульфидах. По данным Re-Os изотопной систематики изотопно-геохимическими параметрами оценки прогноза сульфидного ЭПГ-Cu-Ni оруденения являются: (1) начальный изотопный состав осмия со значениями $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ в пределах 0.1283–0.1366, типичными для сульфидного вещества *промышленно-рудноносных* интрузивов; (2) значения Re/Os в ЭПГ-Cu-Ni рудах, по которым *слаборудоносные* интрузивы характеризуются высокими значениями Re/Os (13.7–71.6), *рудноносные* интрузивы – низкими (Re/Os=0.6–3.5) и *промышленно-рудноносные* – промежуточными (Re/Os=1–8.8); (3) значения γOs (рассчитанные на возраст 250 млн лет) для ЭПГ-Cu-Ni руд, согласно которым *слаборудоносные* интрузивы характеризуются высокими значениями γOs (36–118), *промышленно-рудноносные* интрузивы – низкими значениями γOs (–6–8) и *рудноносные* интрузивы – промежуточными значениями γOs (4–32).

Изотопный состав осмия сульфидов в сочетании с изотопным составом серы позволяет выявлять интрузивы с вкрапленными рудами, идентичными по изотопным параметрам таковым в промышленных месторождениях (рис. 9 в [Malitch, 2021]). Соответственно такому подходу изученные нами интрузивы делятся на три группы. (1) К первой группе относятся Черногорский и, с некоторой долей условности, Вологодчанский интрузивы, в которых вкрапленные сульфидные руды по изотопному составу осмия и серы идентичны или близки таковым в Талнахском месторождении. Отметим, что Вологодчанский интрузив по изотопному составу осмия и серы (наши данные) соответствует таковым в интрузиве Норильск-1 [Arndt et al., 2003]. Отсюда следует, что в магматические камеры данных интрузивов сульфидная жидкость поступала из того же источника рудного расплава, за счет которого были сформированы промышленные месторождения Талнахского и Норильского интрузивов. Черногорский и, с некоторой долей условности, Вологодчанский интрузивы также могут содержать аналогичные промышленные запасы рудного вещества, и, следовательно, являются наиболее перспективными

для поисково-разведочных работ. (2) Рудоносный Зуб-Маркшейдерский интрузив частично сходен по изотопному составу осмия с промышленными месторождениями, но сильно отличается от них по изотопному составу серы. Характерно, что по изотопному составу серы (и частично осмия) сульфиды сохраняют черты ювенильного источника руд, минимально подвергшегося коровой контаминации. (3) Слаборудоносные Нижнеталнахский и Зеленогровский интрузивы содержат вкрапленные сульфиды, которые по изотопному составу осмия и серы значительно отличаются от рудного вещества промышленных месторождений и для которых промышленных скоплений не выявлено. В соответствии с предлагаемым подходом это означает, что перспективы выявления промышленных запасов ЭПГ-Cu-Ni руд в таких интрузивах отсутствуют.

Другая зависимость, перспективная для использования в качестве изотопного индикатора, была установлена на основе изучения изотопного состава серы в сульфидных рудах интрузивов, характеризующихся различной рудоносностью. При сравнении изотопного состава серы ($\delta^{34}\text{S}$, ‰) во вкрапленных и массивных сульфидных рудах промышленных месторождений отмечается их сходство по данному параметру (рис. 9 в [Malitch, Latypov, 2011]), что отличает их от мало-сульфидных платиноидных руд, характеризующихся более низкими значениями $\delta^{34}\text{S}$ [Malitch et al., 2014; Sluzhenikin et al., 2020].

Изотопный состав серы во вкрапленных сульфидных рудах и рудопроявлениях интрузивов Полярной Сибири, обладающих различным металлогенетическим потенциалом, характеризуется рядом особенностей. Интрузивы в порядке увеличения значения $\delta^{34}\text{S}$ расположены следующим образом (рис. 11): Зуб-Маркшейдерский ($-0.7 \dots +3.9\%$, среднее $0.4 \pm 1.6\%$), Бинодинский ($0.7 \dots 2.0\%$, среднее $1.5 \pm 0.4\%$), Нижнеталнахский ($1.8 \dots 8.0\%$, среднее $6.4 \pm 1.9\%$), Вологодчанский ($5.1 \dots 8.5\%$, среднее $6.9 \pm 1.2\%$), Норильск-1 ($7.5 \dots 9.4\%$, среднее $8.6 \pm 0.6\%$), Круглогорский ($8 \dots 11.4\%$, среднее $9.7 \pm 1.7\%$), Талнахский ($9.9 \dots 12.0\%$, среднее $11.0 \pm 0.4\%$), Черногорский ($10.4 \dots 11.2\%$, среднее $10.9 \pm 0.4\%$), Дюмталейский ($9.9 \dots 12.9\%$, среднее $11.4 \pm 0.6\%$), Хараелахский ($11.5 \dots 13.6\%$, среднее $12.7 \pm 0.5\%$). Изотопный состав серы в сульфидах рудоносного Зуб-Маркшейдерского интрузива, несмотря на его расположение в сульфатоносных отложениях девона, которые им ассимилированы, характеризуется минимальной долей так называемого «корового» компонента ($\delta^{34}\text{S}_{\text{среднее}} = 0.4 \pm 1.6\%$). Поэтому полученные ранее сходные результаты для сульфидов Накохозского интрузива позволили [Кузьмин, Туганова, 1977] подвергнуть сомнению использование повышенного содержания $\delta^{34}\text{S}$ в качестве главного критерия потенциальной продуктивности ультрамафит-мафитового интрузива.

В качестве *индикаторного* оценочного признака выявления богатых руд предлагается использовать зависимость среднего значения изотопного состава серы от дисперсии изотопного состава серы. При таком подходе характер рудоносности определяется полем значений $\delta^{34}\text{S}_{\text{среднее}} > 8$ при значениях дисперсии $\delta^{34}\text{S} < 1$, которое является положительным индикатором для выявления промышленного оруденения в слабоизученных интрузивах (рис. 8 в [Malitch, 2021]). В это поле значений попадают вкрапленные руды Черногорского и Дюмталейского интрузивов. Примечательно, что с увеличением масштаба месторождения количество наиболее распространенных значений $\delta^{34}\text{S}$ возрастает и, соответственно, уменьшается интервал вариаций этой величины.

Еще одна зависимость, используемая в качестве *изотопного индикатора продуктивности*, связана с установленной дискретностью изотопного состава меди

и серы в сульфидных рудах *промышленно-рудоносных* интрузивов (рис. 9). Наиболее «тяжелой серой» ($\delta^{34}\text{S} = 11.5 \dots 13.6\%$) и «легкой медью» ($\delta^{65}\text{Cu} = -2.3 \dots -0.9\%$) характеризуются руды Хараелахского интрузива. Напротив, наименее «тяжелая сера» ($\delta^{34}\text{S} = 7.5 \dots 9.4\%$) и наиболее «тяжелая медь» ($\delta^{65}\text{Cu} = -0.1 \dots +0.6\%$) установлена во вкрапленных Cu-Ni рудах интрузива Норильск-1, с максимальным утяжелением изотопного состава *меди* и облегчением изотопного состава *серы* в горизонте малосульфидных руд. Для большинства вкрапленных и массивных руд Талнахского интрузива при сопоставлении изотопного состава меди и серы с таковыми Хараелахского интрузива и интрузива Норильск-1 наблюдаются промежуточные значения ($\delta^{65}\text{Cu} = 0.0 \dots -1.1\%$ и $\delta^{34}\text{S} = 7.8 \dots 12.1\%$). *Промыленно-рудоносные* интрузивы в координатах $\delta^{34}\text{S}$ – $\delta^{65}\text{Cu}$ образуют специфический тренд составов (тренд ПР на рис. 9), от «изотопно-легкой» *меди* и «изотопно-тяжелой» *серы* Хараелахского интрузива до «изотопно-тяжелой» *меди* и менее «изотопно-тяжелой» *серы* интрузива Норильск-1. К этому тренду составов близки (рис. 9) вкрапленные ЭПГ-Cu-Ni руды Черногорского (перекрываются с полем

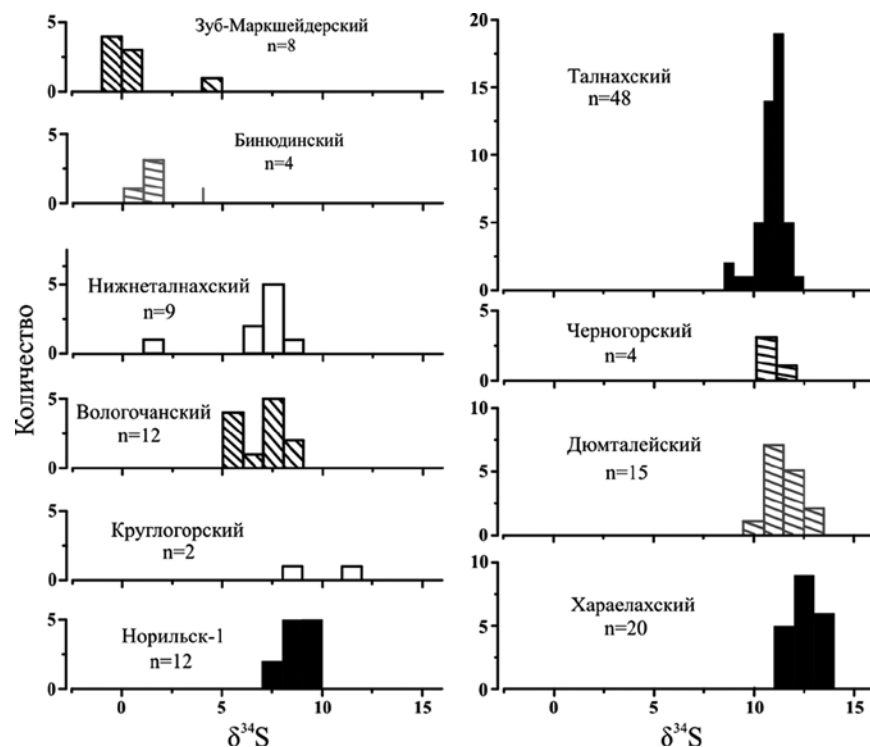


Рис. 11. Вариации изотопного состава серы во вкрапленных сульфидных рудах ультрамафит-мафитовых интрузивов Полярной Сибири [Малич и др., 2018]. Черным цветом показаны промышленно-рудоносные интрузивы, черной штриховкой – рудоносные интрузивы, серой штриховкой – потенциально рудоносные интрузивы, белым – слаборудоносные интрузивы.

изотопных составов сульфидов Талнахского интрузива), а также Дюмталейского (частично перекрываются с полем талнахских сульфидов) интрузивов.

Таким образом, на основе сочетания изотопных составов *осмия, серы и меди* впервые (1) выявлены интрузивные тела с вкрапленными сульфидными рудами, обладающими параметрами рудного вещества, за счет которых были сформированы промышленные платиноидно-медно-никелевые месторождения; (2) установлены интрузивные тела с вкрапленными рудами, изотопные составы *осмия, серы и меди* в которых не соответствуют таковым в промышленных месторождениях, и для которых промышленные скопления руд маловероятны. Наиболее перспективным на обнаружение богатых ЭПГ-Cu-Ni руд в Норильской провинции является Черногорский ультрамафит-мафитовый интрузив. Для Таймырской провинции таким объектом следует считать Дюмталейский интрузив.

Выявленные закономерности изотопных характеристик рудного вещества, а именно (i) отрицательная зависимость между дисперсией величины $\delta^{34}\text{S}$ и объемом сульфидного платиноидно-медно-никелевого оруденения (рис. 8 в [Malitch, 2021]) и (ii) отрицательный тренд изотопных составов меди и серы в *промышленно-рудноносных* интрузивах (рис. 9), могут быть эффективно использованы при оценке оруденения в слабо изученных ультрамафит-мафитовых интрузивах Полярной Сибири.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Металлогенетический потенциал Полярной Сибири на платиноиды определяется комплексными платиноидно-медно-никелевыми месторождениями и рудопроявлениями Норильской и Таймырской провинций и золото-иридиево-осмиевыми месторождениями Маймеч-Котуйской провинции, являющейся новой платинометальной провинцией России.

2. Комплексные золото-иридиево-осмиевые россыпи, связанные с Гулинским массивом ультраосновных и щелочных пород с карбонатитами в пределах Маймеч-Котуйской провинции, расцениваются как уникальный по типу комплексной благороднометальной минерализации и весьма крупный по прогнозным ресурсам тугоплавких платиноидов потенциально промышленный объект, которому нет аналога в России. Подавляющее большинство минералов платиновой группы (МПГ) из дунитов, хромититов и благороднометальных россыпей Гулинского и Бор-Урхаского массивов образовано Os-Ir сплавами, преобладающими над Pt-Fe сплавами, Ru-Os сульфидами и другими МПГ. Особенности минеральных ассоциаций платиноидов в россыпях Маймеч-Котуйской провинции обусловлены их первичными источниками – дунитами, хромититами и оливинитами.

3. Петролого-геохимический анализ ультрамафит-мафитовых интрузивов Норильской провинции позволил ранжировать их по степени перспективности на платиноидно-медно-никелевые руды в составе трех геолого-экономических типов: 1) *промышленно-рудноносного*, вмещающего уникальные и крупные месторождения (Октябрьское, Талнахское и Норильск-1); 2) *рудноносного*, с которым ассоциируют мелкие (резервные) месторождения с сбалансированными запасами сульфидных ЭПГ-Cu-Ni руд (Черногорское, Зуб-Маркшейдерское, Вологодчанское и др.); 3) *слаборудноносного* с Cu-Ni сульфидной минерализацией без платиноидов (Нижнеталнахский и другие интрузивы). Отличные по петролого-геохимическим параметрам ультрамафит-мафитовые интрузивы Таймырской провинции (Биню-

динский и Дюмталейский) отнесены с определенной долей условности в группу *потенциально-рудноносных интрузивов*.

4. По данным изучения U-Pb системы в бадделеите и цирконе и Th-U-Pb системы в ториаците установлена временная близость для карбонатитов Гулинского массива Маймеч-Котуйской провинции и ультрамафит-мафитовых интрузивов Таймырской провинции к пермо-триасовому рубежу и их синхронность с толеит-базальтовым магматизмом Сибирской платформы.

5. На основании анализа изотопно-геохимической информации охарактеризованы источники рудного и силикатного вещества, участвовавшие в формировании ультрамафит-мафитовых интрузивов норильского типа. В основу модели рудообразующих процессов положен механизм мантийно-корового взаимодействия. Мантийно-коровое взаимодействие обосновывается систематическими данными по различным изотопным системам пород и минералов, указывающих на определенную долю участия компонентов с коровыми изотопными метками в общем процессе породо- и рудообразования, связанного с мантийными магмами.

6. Данные по изотопии кислорода в цирконе свидетельствуют о (i) мантийном происхождении первичных магм, родоначальных для Талнахского интрузива, и (ii) участии корового компонента при формировании рудоносных пород такситового горизонта. Преобладающая выборка значений начального изотопного состава гафния в цирконе *промышленно-рудноносных* интрузивов обладает параметрами (ϵHf_i от 5 до 16), характерными для ювенильного мантийного источника. Ограниченный диапазон сходных изотопных вариаций неодима для главных разновидностей пород промышленно-рудноносных интрузивов ($\epsilon\text{Nd}_i=1.0\pm0.5$) связан с определенным уровнем контаминации данных пород материалом земной коры, предположительно в промежуточных магматических камерах, тогда как ограниченная выборка отрицательных значений ϵNd_i (около -1.3 для интрузива Норильск-1 и от -3.3 до -1.4 для Талнахского интрузива), характерная для контактовых частей интрузивов, отражает взаимодействие с вмещающими породами при внедрении в современные камеры.

7. На основании выявленных закономерностей изотопного состава меди, серы и осмия сульфидных ЭПГ-Cu-Ni руд норильского типа ключевая роль в их образовании отводится глубинным магматическим камерам. Гомогенный изотопный состав серы в массивных и вкрапленных рудах и Хараелахского ($\delta^{34}\text{S}=12.7\pm0.5\%$), и Талнахского ($\delta^{34}\text{S}=10.9\pm0.6\%$) месторождений свидетельствует в пользу контаминации мантийных магм «коровым» компонентом, которая происходила не на месте внедрения интрузивных тел, а в более глубинных условиях, где и была достигнута гомогенизация изотопного состава серы и генерация сульфидного расплава. Вариации изотопного состава меди ($\delta^{65}\text{Cu}$) обусловлены различием изотопных параметров рудного вещества первичных магм, сформировавших сульфидные ЭПГ-Cu-Ni руды промышленных месторождений (от -1.1 до 0.0% для Талнахского месторождения и от -0.1 до 0.6% для месторождения Норильск-1). Для изотопно-лёгких составов меди ($\delta^{65}\text{Cu}$ от -2.3% до -0.9%) сульфидных руд Хараелахского месторождения допускается возможность участия внешнего источника меди (например, самородной меди Арылахского месторождения $-\delta^{65}\text{Cu}=-1.9\pm0.15\%$).

8. Использование оригинальных подходов при изучении комплексных платинометальных месторождений Полярной Сибири позволило предложить новые индикаторы прогноза для поиска подобных месторождений. Наиболее значимыми

информационными параметрами при оценке рудоносности являются изотопные составы осмия, меди и серы в Cu-Ni сульфидах. На основе сочетания изотопных составов осмия, серы и меди выявлены интрузивные тела с вкрапленными сульфидными рудами, обладающими параметрами рудного вещества, за счет которых были сформированы промышленные платиноидно-медно-никелевые месторождения. Наиболее перспективными на обнаружение богатых ЭПГ-Cu-Ni руд являются Черногорский и Дюмталейский ультрамафит-мафитовые интрузивы.

9. Выполненные минералого-геохимические, геохронологические и изотопно-геохимические исследования позволили на принципиально новом уровне изучения вещества (i) охарактеризовать условия образования комплексных платинотетраметаллических месторождений Маймеча-Котуйской, Норильской и Таймырской провинций и (ii) провести оценку перспектив выявления богатых сульфидных платиноидно-медно-никелевых руд в рудоносных и потенциально рудоносных интрузивах Полярной Сибири.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Монографии

Малич К.Н., Баданина И.Ю., Туганова Е.В. Рудоносные ультрамафит-мафитовые интрузивы Полярной Сибири: возраст, условия образования, критерии прогноза. Екатеринбург, ИГГ УрО РАН, 2018. 287 с.

Малич К.Н. Платиноиды клинопироксенит-дунитовых массивов Восточной Сибири (геохимия, минералогия, генезис). С-Пб.: Санкт-Петербургская картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 1999. 296 с.

Лазаренков В.Г., **Малич К.Н.**, Сахьянов Л.О. Платинотетраметаллическая минерализация зональных ультраосновных и коматиитовых массивов. С-Пб.: Недра, 1992. 217 с.

Главы в монографиях, путеводители, карты

Malitch K.N., Belousova E.A., Griffin W.L., Badanina I.Yu., Latypov R.M., Sluzhenikin S.F. Chapter 7 – New insights on the origin of ultramafic-mafic intrusions and associated Ni-Cu-PGE sulfide deposits of the Noril'sk and Taimyr provinces, Russia: evidence from radiogenic and stable isotope data / Processes and Ore Deposits of Ultramafic-Mafic Magmas Through Space and Time (Mondal S., Griffin W.L. eds.). 1st Edition, Elsevier Inc. 2018. P. 197–238.

Sluzhenikin S.F., Krivolutsкая N.A., Rad'ko V.A., **Malitch K.N.**, Distler V.V., Fedorenko V.A. Ultramafic-mafic intrusions, volcanic rocks and PGE-Cu-Ni sulfide deposits of the Noril'sk Province, Polar Siberia. Field trip guidebook. 12th International Platinum Symposium (Simonov O.N. ed.). Yekaterinburg: IGG UB RAS, 2014. 80 p.

Митрофанов Ф.П., Баянова Т.Б., Корчагин А.У., **Малич К.Н.**, Жиров Д.В. Глава 5. Восточно-Скандинавская и Норильская плюмовые базитовые обширные изверженные провинции Pt-Pd руд: геологическое и металлогеническое сопоставление / Фундаментальные основы формирования ресурсной базы стратегического сырья (Au, Ag, Pt, Cu, редкие элементы и металлы). М.: Геос, 2012. С. 194–222.

Cawthorn R.G., Barnes S.J., Ballhaus C., **Malitch K.N.** Platinum-group element, chromium and vanadium deposits in mafic and ultramafic rocks / Economic Geology 100th Anniversary Volume. 2005. P. 215–249.

Геологическая карта Сибирской платформы и прилегающих территорий масштаба 1:1500 000 (Гл. редактор Малич Н.С., зам. гл. редактора Туганова Е.В., Миرونюк Е.П.). Санкт-Петербург: Санкт-Петербургская картографическая фабрика ВСЕГЕИ. 2000. (Авторы: Малич Н.С., Туганова Е.В., Миرونюк Е.П., Авдеева В.И., Алексеев С.П., Анохин В.М., Беззубцев В.В., Глухов Ю.С., Гриненко В.С., Гринсон А.С., Гришин М.П., Дараган-Суцов Ю.И., Егоров В.Н., Камалетдинов В.А., Ковригина Е.К., Кропачев А.П., Лазуркин Д.В., Лотышев В.И., Магнушевский Э.Л., **Малич К.Н.**, Межвилк А.А., Михайлов М.В., Мусатов Е.Е., Никулов Л.П., Пояркова И.Н., Перевалов О.В., Ржевский В.Ф., Садовников Г.Н., Селько А.И., Семериков А.А., Симонов О.Н., Сластенов Ю.Л., Спектор В.В., Старников А.И., Стрельников С.И., Тимашков А.Н., Чернышев Н.М., Яшин Д.С.).

Малич К.Н., Лопатин Г.Г., Симонов О.Н. Новый российский высокоперспективный источник осмия / Крупные и уникальные месторождения редких и благородных металлов (Отв. ред. Марин Ю.Б.). С-Пб.: изд. СПГТИ, 1998а. С. 257–270.

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК (всего Web of Science – 100, Scopus – 73)

1. **Malitch K.N.** Forecasting criteria for sulphide PGE-copper-nickel deposits of the Noril'sk province / *Lithosphere (Russia)*. 2021. V. 21. № 5. P. 660–682.

2. **Малич К.Н.**, Лохов Д.К., Проскурнин В.Ф., Пучков В.Н., Баданина И.Ю., Червяковская М.А. Изотопные системы U-Pb и Lu-Hf в цирконе и Sm-Nd в породах рудоносного Дюмталейского интрузива (Таймыр, Россия): новые свидетельства о роли деплетированной мантии в его образовании / *Доклады Российской академии наук. Науки о Земле*. 2020. Т. 492. № 1. С. 71–75.

3. Служеникин С.Ф., **Малич К.Н.**, Туровцев Д.М., Григорьева А.В., Баданина И.Ю. Зубовский тип дифференцированных базит-гипербазитовых интрузивов Норильского района: петрогеохимические характеристики и рудоносность / *Петрология*. 2020. Т. 28. № 5. С. 511–544.

4. Barnes S.J., **Malitch K.N.**, Yudovskaya M.A. Introduction to the Special Issue on the Norilsk-Talnakh Ni-Cu-PGE deposits / *Economic Geology*. 2020. V. 115. № 6. P. 1157–1172.

5. **Malitch K.N.**, Belousova E.A., Griffin W.L., Martin L., Badanina I.Yu., Sluzhenikin S.F. Oxygen-hafnium-neodymium isotope constraints on the origin of the Talnakh ultramafic-mafic intrusion (Norilsk Province, Russia) / *Economic Geology*. 2020a. V. 115. № 6. P. 1195–1212.

6. **Malitch K.N.**, Puchtel I.S., Belousova E.A., Badanina I.Yu. Contrasting platinum-group mineral assemblages of the Kondyor massif (Russia): Implications for the sources of HSE in zoned-type ultramafic massifs / *Lithos*. 2020b. V. 376-377. 105800.

7. Баданина И.Ю., Белоусова Е.А., **Малич К.Н.**, Служеникин С.Ф. Изотопный состав кислорода цирконов промышленно-рудоносного Талнахского интрузива Норильской провинции: первые данные / *Доклады АН*. 2019. Т. 489. № 2. С. 170–173.

8. **Малич К.Н.**, Когарко Л.Н., Баданина И.Ю., Белоусова Е.А. Hf-Nd изотопная систематика карбонатитов Гулинского массива (Маймеча-Котуйская провинция, Россия) / *Доклады АН*. 2018. Т. 480. № 3. С. 322–326.

9. Служеникин С.Ф., **Малич К.Н.**, Григорьева А.В. Базит-гипербазитовые дифференцированные интрузивы круглогорского типа: петрология и рудоносность (Норильский район) / *Петрология*. 2018. Т. 26. № 3. С. 282–316.

10. Баданина И.Ю., **Малич К.Н.** Природные поликомпонентные твердые растворы системы Ru-Os-Ir-Pt-Fe Восточного Витватерсранда (Южная Африка) / *Доклады АН*. 2017. Т. 476. № 5. С. 543–546.

11. **Малич К.Н.**, Хиллер В.В. Результаты химического датирования монацита Талнахского промышленно-рудоносного интрузива (Россия) / *Доклады АН*. 2017. Т. 474. № 2. С. 210–213.

12. **Malitch K.N.**, Belousova E.A., Griffin W.L., Badanina I.Yu., Knauf V.V., O'Reilly S.Y., Pearson N.J. Laurite and zircon from the Finero chromitites (Italy): new insights into evolution of the subcontinental mantle / *Ore Geology Reviews*. 2017. V. 90. P. 210-225.

13. **Малич К.Н.**, Баданина И.Ю., Романов А.П., Служеникин С.Ф. U-Pb возраст и Hf-Nd-Sr-Su изотопная систематика Бинюдинского и Дюмталейского рудоносных интрузивов (Таймыр, Россия) / *Литосфера*. 2016. Т. 16. № 1. С. 107-128.

14. Badanina I.Yu., **Malitch K.N.**, Lord R.A., Belousova E.A., Meisel T.C. Closed-system behaviour of the Re-Os isotope system recorded in primary and secondary PGM assemblages: evidence from a mantle chromitite at Harold's Grave (Shetland ophiolite Complex, Scotland) / *Ore Geology Reviews*. 2016. V. 75. P. 174-185.

15. Баданина И.Ю., Жаркова Е.В., Кадик А.А., **Малич К.Н.**, Мурзин В.В. Результаты экспериментального определения собственной летучести кислорода Ru-Os-Ir сплавов Верх-Нейвинского дунит-гарцбургитового массива, Средний Урал (Россия) / *Геохимия*. 2015. Т. 53. № 7. С. 661-666.

16. **Малич К.Н.**, Баданина И.Ю. Железо-платиновые сплавы хромититов Нижнетагильского и Кондёрского клинопироксенит-дунитовых массивов (Россия) / *Доклады АН*. 2015. Т. 462. № 6. С. 692-695.

17. **Малич К.Н.**, Хиллер В.В., Баданина И.Ю., Белоусова Е.А. Результаты датирования торанита и бадделита карбонатов Гулинского массива (Россия) / *Доклады АН*. 2015. Т. 464. № 4. С. 464-467.

18. Tessalina S.G., **Malitch K.N.**, Augé T., Puchkov V.N., Belousova E., McInnes B.I.A. Origin of the Nizhny Tagil clinopyroxenite-dunite massif (Uralian Platinum Belt, Russia): insights from PGE and Os isotope systematics / *Journal of Petrology*. 2015. V. 56. № 12. P. 2297-2318.

19. Баданина И.Ю., **Малич К.Н.**, Романов А.П. Изотопно-геохимические характеристики рудоносных ультрамафит-мафитовых интрузивов Западного Таймыра (Россия) / *Доклады АН*. 2014. Т. 458. № 3. С. 327-329.

20. **Malitch K.N.**, Latypov R.M., Badanina I.Y., Sluzhenikin S.F. Insights into ore genesis of Ni-Cu-PGE sulfide deposits of the Norilsk Province (Russia): evidence from copper and sulfur isotopes // *Lithos*. 2014. V. 204 P. 172-187.

21. **Малич К.Н.**, Сорохтина Н.В., Баданина И.Ю., Кононкова Н.Н. О коренных источниках благороднометаллических россыпей Гулинского массива (Полярная Сибирь): новые минералогические данные / *Доклады АН*. 2013. Т. 351. № 1. С. 87-90.

22. Митрофанов Ф.П., Байанова Т.Б., Корчагин А.У., Грошев Н.Ю., **Малич К.Н.**, Жиров Д.В., Митрофанов А.Ф. Восточно-Скандинавская и Норильская плюмовые базитовые обширные изверженные провинции Pt-Pd руд: геологическое и металлогеническое сопоставление / *Геология рудных месторождений*. 2013. Т. 55. № 5. С. 357-373.

23. Badanina I.Yu., **Malitch K.N.**, Lord R.A., Meisel T.C. Origin of primary PGM assemblage in chromitite from a mantle tectonite at Harold's Grave (Shetland Ophiolite Complex, Scotland) / *Mineralogy and Petrology*. 2013. V. 107. № 6. P. 963-970.

24. **Malitch K.N.**, Belousova E.A., Griffin W.L., Badanina I.Yu. Hafnium-neodymium constraints on source heterogeneity of the economic ultramafic-mafic Noril'sk-1 intrusion (Russia) / *Lithos*. 2013. V. 164-167. P. 36-46.

25. **Малич К.Н.**, Баданина И.Ю., Белоусова Е.А., Туганова Е.В. U-Pb результаты датирования циркона и бадделита ультрамафит-мафитового интрузива Норильск-1 (Россия) / *Геология и геофизика*. 2012. Т. 53. № 2. С. 163-172.

26. Merkle R.K.W., **Malitch K.N.**, Grasser P.P.H., Badanina I.Yu. Native osmium from the Guli Massif, Northern Siberia (Russia) / *Mineralogy and Petrology*. 2012. V. 104. № 1-2. P. 115-127.

27. Mitrofanov F.P., **Malitch K.N.**, Bayanova T.B., Korchagin A.U., Zhiron D.V. Comparison of East-Scandinavian and Norilsk large plume mafic igneous provinces of PGE ores / *Proceedings of the Murmansk State Technical University*. 2012. V. 15. № 2. P. 380-394.

28. **Малич К.Н.**, Баданина И.Ю., Костянов А.И. Начальный изотопный состав осмия Os-Ir-Ru сплавов ультраосновных массивов Полярной Сибири / *Доклады АН*. 2011а. Т. 440. № 3. С. 397-402.

29. **Малич К.Н.**, Ефимов А.А., Баданина И.Ю. Контрастные минеральные ассоциации платиноидов хромититов Нижне-Тагильского и Гулинского массивов (Россия): состав, источники вещества, возраст / *Доклады АН*. 2011б. Т. 441. № 1. С. 83-87.

30. **Малич К.Н.**, Кадик А.А., Баданина И.Ю., Жаркова Е.В. Окислительно-восстановительные условия формирования минералов осмия Гулинского массива, Россия / *Геохимия*. 2011в. Т. 49. № 7. С. 767-771.

31. **Малич К.Н.**, Когарко Л.Н. Вещественный состав платиноидной минерализации Бор-Урехского массива (Маймеча-Котуйская провинция, Россия) / *Доклады АН*. 2011. Т. 440. № 6. С. 806-810.

32. **Malitch K.N.**, Latypov R.M. Re-Os and S-isotope constraints on timing and source heterogeneity of PGE-Cu-Ni sulfide ores: a case study at the Talnakh ore junction (Russia) / *Canadian Mineralogist*. 2011. V. 49. № 6. P. 1653-1677.

33. **Малич К.Н.**, Баданина И.Ю., Туганова Е.В. Магматическая эволюция ультрамафит-мафитовых интрузивов Норильской провинции (Россия): вещественные и геохронологические данные / *Литосфера*. 2010. Т. 10. № 5. С. 37-63.

34. Соболев А.В., Соболев С.В., Кузьмин Д.В., **Малич К.Н.**, Петрунин А.А. Механизм образования сибирских меймечитов и природа их связи с траппами и кимберлитами / *Геология и геофизика*. 2009. Т. 50. № 12. С. 1293-1334.

35. **Malitch K.N.**, Belousova E.A., Griffin W.L., Badanina I.Yu., Pearson N.J., Presnyakov S.L., Tuganova E.V. Magmatic evolution of the ultramafic-mafic Kharaelakh intrusion (Siberian Craton, Russia): insights from trace-element, U-Pb and Hf-isotope data on zircon / *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 2010. V. 159. № 6. P. 753-768 [DOI: 10.1007/s00410-009-0452-z].

36. **Malitch K.N.** Osmium isotope constraints on contrasting sources and prolonged melting in the Proterozoic upper mantle: evidence from ophiolitic Ru-Os sulfides and Ru-Os-Ir alloys / *Chemical Geology*. 2004. V. 208. № 1-4. P. 157-173.

37. **Malitch K.N.**, Merkle R.K.W. Ru-Os-Ir-Pt and Pt-Fe alloys from the Evander Goldfield (Witwatersrand Basin, South Africa): detrital origin inferred from compositional and osmium isotope data / *Canadian Mineralogist*. 2004. V. 42. P. 631-650.

38. **Malitch K.N.**, Thalhammer O.A.R., Knauf V.V., Melcher F. Diversity of platinum-group mineral assemblages in banded and podiform chromitite from the Kraubath ultramafic massif, Austria: evidence for an ophiolitic transition zone? / *Mineralium Deposita*. 2003. V. 38. P. 282-297.

39. **Malitch K.N.**, Auge T., Badanina I.Yu., Goncharov M.M., Junk S.A., Pernicka E. Os-rich nuggets from Au-PGE placers of the Maimecha-Kotui Province, Russia: a multi-disciplinary study / *Mineralogy and Petrology*. 2002. V. 76. P. 121-148.

40. **Malitch K.N.**, Thalhammer O.A.R. Pt-Fe nuggets derived from clinopyroxenite-dunite massifs, Russia: a structural, compositional and osmium-isotope study / *Canadian Mineralogist*. 2002. V. 40. P. 395-418.

41. **Малич К.Н.**, Костянов А.И., Меркле Р.К.В. Вещественный состав и осмиевая изотопия платиноидной минерализации Восточного Витватерсранда (Южная Африка) / *Геология рудных месторождений*. 2000. Т. 42. № 3. С. 281-295.

42. **Малич К.Н.**, Костянов А.И. Модельный Re-Os-возраст платиноидной минерализации Гулинского массива (север Сибирской платформы, Россия) / *Геология рудных месторождений*. 1999. Т. 41. № 2. С. 143-153.

43. **Малич К.Н.**, Баданина И.Ю. Природные поликомпонентные твердые растворы системы Ru-Os-Ir-Pt-Fe, их генетическое и прикладное значение / *Доклады АН*. 1998. Т. 363. № 1. С. 93–96.
44. **Малич К.Н.**, Малич Н.С., Симонов О.Н., Лопатин Г.Г., Науменко Н.Г. Иридиево-осмиевые россыпи Маймеч-Котуйской провинции – новый российский источник тугоплавких платиноидов / *Отечественная геология*. 1998б. № 3. С. 30–34.
45. **Малич К.Н.**, Оже Т. Состав включений в минералах осмия – индикатор условий образования Гулинского ультраосновного массива / *Доклады АН*. 1998. Т. 361. № 6. С. 812–814.
46. **Малич К.Н.**, Лопатин Г.Г. Новые данные о металлогении уникального Гулинского клинопироксенит-дунитового массива (Северная Сибирь, Россия) / *Геология рудных месторождений*. 1997. Т. 39. № 3. С. 247–257.
47. **Малич К.Н.** Об оценке платиноносности зональных клинопироксенит-дунитовых массивов / *Доклады АН*. 1996а. Т. 347. № 5. С. 653–657.
48. **Малич К.Н.** Платиноидная россыпь реки Ингарингда (север Восточной Сибири) / *Доклады АН*. 1996б. Т. 348. № 5. С. 652–656.
49. **Малич К.Н.**, Баданина И.Ю., Гончаров М.М., Лопатин Г.Г., Науменко Н.Г., Туганова Е.В. Маймеч-Котуйский регион – новая платинометальная провинция России / *Доклады АН*. 1996. Т. 348. № 2. С. 232–235.
50. **Малич К.Н.** Распределение платиноидов в ультрабазитах Гулинского массива как индикатор их генезиса / *Записки ВМО*. 1995. № 5. С. 16–30.
51. Лазаренков В.Г., **Малич К.Н.**, Лопатин Г.Г. Геохимия ультрамафитов платиноносного Гулинского массива Маймеч-Котуйской провинции / *Геохимия*. 1993. № 11. С. 1523–1531.
52. Балмасова Е.А., Лазаренков В.Г., **Малич К.Н.** Химический состав и генезис хромшпинелидов из ультрамафитов Гулинского массива (Маймеч-Котуйская провинция) / *Записки ВМО*. 1992а. № 5. С. 51–59.
53. Балмасова Е.А., Смольская Л.С., Лопатина Л.А., Лопатин Г.Г., Лазаренков В.Г., **Малич К.Н.** Самородный осмий и иридоосмин Гулинского массива / *Доклады АН*. 1992б. т. 323. № 4. С. 748–751.
54. **Малич К.Н.**, Рудашевский Н.С. О коренной минерализации платиноидов хромититов Гулинского массива / *Доклады АН*. 1992. Т. 325. № 5. С. 1026–1029.
55. **Малич К.Н.** О формационной принадлежности платиноносных ультрабазитов концентрически-зональных массивов Сибирской платформы / *Доклады АН СССР*. 1991. Т. 318. № 6. С. 1452–1457.
56. Туганова Е.В., **Малич К.Н.** К вопросу о платиноносности интрузий норильского типа / *Доклады АН СССР*. 1990. Т. 313. № 1. С. 178–183.