



MANTLE TERRANES OF THE SIBERIAN CRATON: THEIR INTERACTION WITH PLUME MELTS BASED ON THERMOBAROMETRY AND GEOCHEMISTRY OF MANTLE XENOCRYSTS

I. V. Ashchepkov¹, A. S. Ivanov², S. I. Kostrovitsky^{3,4}, M. A. Vavilov¹,
S. A. Babushkina^{5,6}, N. V. Vladykin³, N. S. Tychkov¹, N. S. Medvedev⁷

¹ V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of RAS, Novosibirsk, Russia

² Geological Enterprise of Exploration, Public Joint Stock Company «ALROSA», Mirny, Russia

³ A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry, Siberian Branch of RAS, Irkutsk, Russia

⁴ Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of RAS, Irkutsk, Russia

⁵ Institute of Diamond and Precious Metals Geology, Siberian Branch of RAS, Yakutsk, Russia

⁶ M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russia

⁷ A.V. Nikolaev Institute of Inorganic Chemistry, Siberian Branch of RAS, Novosibirsk, Russia

Abstract: We have studied variations in the structure and composition of minerals from the pipes of the Yakutian kimberlite province (YKP) in different mantle terranes of the Siberian craton. The study was based on an extensive database, including the microprobe analysis datasets consolidated by IGM, IG, IEC and IGDNM SB RAS and ALROSA and geochemical analysis of minerals performed by LA-ICP-MS (Laser Ablation Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry). The reconstruction shows layering under the tubes, including 6–7 slab that were probably formed due to subduction; the slabs are separated by pyroxenitic, eclogitic and metasomatic layers and dunite lenses. Transects and mantle profiles across kimberlite fields are constructed. Within the limits of the revealed tectonic terranes, we assume a collage of microplates formed in the early – middle Archean. Extended submeridional structures of the tectonic terranes are not always confirmed at the mantle level. Beneath the Anabar and Aldan shields, the mantle sections show more coarse layers and 3–4 large horizons of dunites with garnet and pyroxene nests separated by ilmenite-phlogopite metasomatites and pyroxenites. Terranes representing the suture zones between the protocratons (e.g. Khapchan) are often saturated with eclogites and pyroxenites that may occur as leghthy ascending bodies of magmatic eclogites penetrating through the mantle lithosphere structure (ML). A nearly ubiquitous pyroxenite layer at the level of 3.5–4.5 GPa formed probably in the early Archean with a high heat flux during melting of eclogites and was subsequently traced by plume melts. Within the early Archean protocratons – granite-greenstone terranes (Tungus, Markha, Berehta, and Sharyzhlgai, ~3.8–3.0 Gyr [Gladkochub *et al.*, 2019], the mantle lithosphere is less depleted and largely metasomatized. The ML structure of the Daldyn and Magan granulite-orthogneiss terranes is layered with folding revealed in the north-to-south sections from the Udachnaya pipe to the Krasnopresnenskaya pipe, which is less pronounced in the latitudinal direction. From the Daldyn field to the Alakit field, there is an increase in the degree of metasomatism, and higher alkalinity of pyroxenes and larger amounts of phlogopite are noted. The most productive Aikhla and Yubileinaya pipes are confined to a dunite core, which is accompanied by a change in the specialization of high-charge elements Ta-Nb to Zr-Hf. Within the limits of the Magan terrane, the thin-layer structure of the middle

RESEARCH ARTICLE

Received: February 1, 2019

Revised: March 26, 2019

Accepted: April 3, 2019

For citation: Ashchepkov I.V., Ivanov A.S., Kostrovitsky S.I., Vavilov M.A., Babushkina S.A., Vladykin N.V., Tychkov N.S., Medvedev N.S., 2019. Mantle terranes of the Siberian craton: their interaction with plume melts based on thermobarometry and geochemistry of mantle xenocrysts. *Geodynamics & Tectonophysics* 10 (2), 197–245. doi:10.5800/GT-2019-10-2-0412.

and upper parts of the craton keel is replaced with a sharply depleted productive horizon at its base. The mantle of the granite-greenstone Markha terrane comprises eclogite (often pelitic) horizons, which suggests subduction of the continental lithosphere or sediments. In the central and northern parts of the Siberian craton, most structures in the mantle are sinking to the west at small angles. The geochemistry features of garnets and pyroxenes from various mantle terranes are considered in detail.

Key words: mantle lithosphere; terrane; Siberian craton; thermobarometry; peridotite; eclogite; garnet; kimberlite; transect; geochemistry of rare elements; stratification/layering; oxidative potential; plume; interaction

МАНТИЙНЫЕ ТЕРРЕЙНЫ СИБИРСКОГО КРАТОНА: ИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ С ПЛЮМОВЫМИ РАСПЛАВАМИ НА ОСНОВАНИИ ТЕРМОБАРОМЕТРИИ И ГЕОХИМИИ МАНТИЙНЫХ КСЕНОКРИСТОВ

И. В. Ащепков¹, А. С. Иванов², С. И. Костровицкий^{3,4}, М. А. Вавилов¹,
С. А. Бабушкина^{5,6}, Н. В. Владыкин³, Н. С. Тычков¹, Н. С. Медведев⁷

¹ Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия

² Научно-исследовательское геологоразведочное предприятие АК «АЛРОСА» (ПАО), Мирный, Россия

³ Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, Иркутск, Россия

⁴ Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

⁵ Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, Якутск, Россия

⁶ Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, Якутск, Россия

⁷ Институт неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН, Новосибирск, Россия

Аннотация: Вариации структуры и состава минералов из трубок Якутской кимберлитовой провинции (ЯКП) разных мантийных террейнов Сибирского кратона изучены с использованием обширной базы данных микрондальных анализов минералов коллектива авторов (ИГМ, ИГХ, ИЗК и ИГБМ СО РАН и «АЛРОСА»), а также геохимических анализов минералов, выполненных методом индуктивно связанной масс-спектрометрии с лазерной абляцией. Реконструирована слоистость под трубками, образованная 6–7 пластинами вероятного субдукционного генезиса, разделенными пироксенитовыми, эклогитовыми, метасоматическими горизонтами и линзами дунитов. Построены мантийные разрезы через кимберлитовые поля и протяженные трансекты. В пределах установленных тектонических террейнов предполагается коллаж из микроплит, возникших в раннем – среднем архее, а протяженные субмеридиональные структуры тектонических террейнов не всегда подтверждаются на мантийном уровне. Под Анабарским и Алданским щитами мантийные разрезы более грубослоисты и состоят из 3–4 крупных горизонтов дунитов с гнездами граната и пироксенов, разделенных ильменит-флогопитовыми метасоматитами и пироксенитами. Террейны, представляющие шовные зоны между протократонами, как Хапчанский, часто насыщены эклогитами и пироксенитами, которые могут быть протяженными восходящими телами магматических эклогитов, прорывающих структуру мантийной литосферы (МЛ). Почти повсеместный пироксенитовый слой на уровне 3.5–4.5 ГПа, вероятно, возник в раннем архее при высоком тепловом потоке при плавлении эклогитов и в дальнейшем трассировался плюмовыми расплавами. В пределах раннеархейских протократонов: гранит-зеленокаменных террейнов – Тунгусского, Мархинского, Беректинского, Шарыжалгайского – с возрастом ~3.8–3.0 млрд лет [Gladkochub et al., 2019] мантийная литосфера менее истощена и часто метасоматизирована. Далдынский и Маганский гранулит-ортогнейсовый террейны имеют слоистую структуру МЛ со складчатостью, проявленной в разрезах с севера на юг от тр. Удачной до тр. Краснопресненской и менее выраженной в широтном направлении. От Далдынского до Алакитского поля растет степень метасоматоза, щелочность пироксенов и количество флогопита. Наиболее продуктивные трубки Айхал и Юбилейная приурочены к дунитовому ядру, что сопровождается сменой специализации высокозарядных элементов Ta-Nb на Zr-Hf. В пределах Маганского террейна тонкослоистая структура средней и верхней части киля кратона сменяется резко истощенным продуктивным горизонтом в его основании. Мантия гранит-зеленокаменного Мархинского террейна содержит горизонты эклогитов (часто пелитового типа), предполагающих субдукцию континентальной литосферы или осадков. В центральной и северной части Сибирского кратона в мантии преобладают структуры погружения на запад с небольшим углом. Рассмотрены особенности геохимии гранатов и пироксенов различных мантийных террейнов.

Ключевые слова: мантийная литосфера; террейн; Сибирский кратон; термобарометрия; перидотиты; эклогиты; гранаты; кимберлиты; трансект; геохимия редких элементов; слоистость; окислительный потенциал; плюм; взаимодействие

1. ВВЕДЕНИЕ

В геодинамике широко применяется понятие террейнов как структурных единиц, в том числе в составе Сибирского кратона [Smelov et al., 1998; Rosen et al., 2002; Rosen, 2003; Gladkochub et al., 2006; Zaitsev, Smelov, 2010], сформированных в определенное время и в геодинамических обстановках с литологическими особенностями строения разрезов. Выделение мантийных террейнов в составе Сибирского кратона было предложено У. Гриффином [Griffin et al., 1999c] при построении 1000-километрового траверса от Мирнинского поля до Анабарского щита с использованием 4100 анализов пиропов из 65 тел кимберлитов. В данной статье обосновывается выделение отдельных мантийных террейнов в пределах Сибирского кратона, в основном совпадающих с террейнами, выделенными для коры [Gladkochub et al., 2006], на основании 57000 микрозондовых анализов с реконструкцией РТ-условий и слоистости под отдельными трубками и районами, а также геохимических особенностей мантийных минералов и пород. Подобная работа с использованием почти вдвое меньшего объема данных была опубликована ранее [Ashchepkov et al., 2014]. В работе добавлены данные для северных районов, а также детализирована информация для основных добывающих районов центральной части Якутской кимберлитовой провинции (ЯКП).

Сопоставление структур и состава коры и мантии проводилось и ранее в разных районах мира [Helmstaedt, 2009], но в данный момент для отдельных кратонов накоплено не так много материалов для выводов.

Исследование геофизическими методами показало, что Сибирский кратон имеет мозаичную структуру [Artemieva et al., 2019]. Под отдельными районами не только глубина Мохо и структура мантии [Koulakov, Bushenkova, 2010], но и состав и возраст гранулитов [Rosen et al., 2006; Koreshkova et al., 2009] существенно варьируются. Ранее слоистость мантии была определена довольно грубо под отдельными группами кимберлитовых трубок для некоторых районов кратона Слэйв [Aulbach et al., 2004; Kopylova, Caro, 2004], Финляндии [Lehtonen et al., 2004] и других районов мира. Траверсы мантийной литосферы Кааваальского кратона, кратона Дарвар, Северной Америки в целом [Griffin et al., 1999c, 2005, 2009], а также кратона Конго [Batumike et al., 2009] выявили слоистость мантии более наглядно. Траверсы были построены с использованием гранатовой барометрии [Ryan et al., 1996]. Метод вычисления Mg-сосуществующего оливина [Gaul et al., 2000] с помощью инверсионной схемы с использованием гранат ортопироксен-гранатовой термобарометрии не очень соотносится с Mg' при-

родного оливина, так как методы термобарометрии по Ni для оливина и Fe-Mg для граната далеко не всегда дают согласованные оценки. В нашей работе использованы оригинальные методы мономинеральной термобарометрии и вычисления железистости (Fe#) оливина, сосуществующего с гранатом, ильменитами и хромитом [Ashchepkov et al., 2010] через регрессионные зависимости с использованием минералов из ассоциаций мантийных ксенолитов.

В основу работы положено >35000 микрозондовых анализов первого автора и дополнительно база данных (>22000 анализов) Центральной аналитической лаборатории Ботуобинской ГРЭ АЛРОСА (аналитик А.С. Иванов), а также анализы С.А. Бабушкиной (Западно-Укукитское, Огонер-Юряхское, Орто-Ыаргинское, Толуоское и Биригиндинское и, частично, Эбеляхское и Куранахское поля), А.П. Смелова (тр. Манчары и карнийский коллектор) и К.Н. Егорова (Муро-Ковинский район, лампроиты Восточного Саяна), и данные шлихового опробования бассейнов рек Моркока, Хорбосуонка, Уджа и Туманшет – в основном по данным М.А. Вавилова и коллег. Используются также анализы включений в алмазы [Logvinova et al., 2005].

2. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Состав минералов проанализирован в ЦКП «Многоэлементные и изотопные исследования» СО РАН на рентгеновских микроанализаторах CamebaxMicro и Jeol Superprobe (условия стандартные), 15 кВ, ток 20 мА, время измерения 15 с на каждый круг. В качестве эталонов использованы природные образцы и синтетические стекла [Lavrentiev et al., 1987]. Применен метод коррекции данных PAP [Pouchou, Pichoir, 1984] с использованием программы «Карат» [Lavrentiev, Usova, 1994]. Относительное стандартное отклонение <1.5 %; точность ~3–5 %. Состав редких элементов проанализирован методом ЛА-ИСП-МС в ЦКП «Многоэлементные и изотопные исследования» СО РАН на масс-спектрометре Finnigan Element с лазерной приставкой Nd YAG: UV 266 (аналитик С.В. Палесский) и в ИНХ им. А.В. Николаева на масс-спектрометре iCAP Qc (Thermo Scientific) с лазерной приставкой NWR 213 (New Wave Research), Nd YAG: UV 133 (WDS) с использованием эталонов NIST 610, 612, 614 SRM (аналитик Н.С. Медведев).

Значения РТ- f_{O_2} по мономинеральным методам определены с применением оригинальной программы TERA55 [Ashchepkov, 2011], которая позволяет рассчитывать несколько пар РТ-параметров, записывая их вместе с составами минералов, а полученные матрицы экспортируются в Excel и далее

в Grapher, Surfer и другие приложения. Мантийные разрезы и трансекты рассчитаны с использованием программного обеспечения Surfer8 и диаграммы «контурная карта» (как если бы они были скважинами в мантии). Изолинии определены на основе следующих параметров: 1) расстояния между трубками; 2) вычисленных давлений, температур и значений f_{O_2} для граната [Gudmundsson, Wood, 1995] и ильменита [Taylor et al., 1998]; 3) и характеристик составов минералов, обычно Fe# для сосуществующих с минералами оливинов (Fe#Ol). В этой работе мы, главным образом, использовали Fe#Ol и f_{O_2} . Решетки для расчетов были получены kringing методом с линейной аппроксимацией между точками [Ashchepkov et al., 2014]. Для реконструкции разрезов использованы комбинированные PТХ f_{O_2} диаграммы, на которых отражены не только PТ и f_{O_2} параметры, но и вариации Fe# и состава минералов в зависимости от давления. Термин «мантийная колонна» используется для мантийных разрезов под трубками, так как разные фазы кимберлитов обнаруживают существенные различия строения реконструированных разрезов и состава минералов ксенокристов и ксенолитов, потому что мантийные породы взаимодействуют с протокимберлитовыми расплавами и эволюционируют [Ashchepkov et al., 2015, 2017b].

3. ТЕКТОНИЧЕСКОЕ РАЙОНИРОВАНИЕ СИБИРСКОГО КРАТОНА И СООТНОШЕНИЕ КИМБЕРЛИТОВОГО ВУЛКАНИЗМА И ТЕКТОНИЧЕСКИХ СТРУКТУР

В качестве основы для выделения террейнов взята схема районирования Д.П. Гладкочуба с соавторами [Gladkochub et al., 2006]. Кимберлитовые поля трассируют в направлении ЮЮЗ-ССВ центральную часть кратона, пересекая основные структуры Сибирского кратона [Kostrovitsky et al., 2007] через Нижнеленское, Толуопское, Западно-Укукитское, Верхнемунское, Накынское, Далдын-Алакитское и Мало-Ботуобинское поля (рис. 1), которые имеют возраст 350–360 Ма [Agashev et al., 2004, 2013; Kostrovitsky et al., 2007; Zaitsev, Smelov, 2010; Smelov, Zaitsev, 2013; Sun et al., 2014], за исключением Толуопского (417–400 млн) лет [Sun et al., 2018]. Дальнейшим продолжением являются Мура-Ковинские и Туманшетские шлиховые ареалы (поля), вероятно, образованные кимберлитами или лампроитами девонского возраста [Sekerin и др., 1988, 1993; Egorov et al., 2006, 2010].

Нами построены глобальные разрезы мантии – трансекты (MT) через субкратонную литосферную мантию (СКЛМ) в этом направлении от Мирнинского поля до Приленья, а также поперек Сибирского кратона на севере от Харамайского поля до

нижнего течения р. Оленек и устья Лены. В дополнение на юге построен разрез от лампроитового поля р. Ингаши (Восточный Саян) на юге через Туманшетский и Мураковинские шлиховые ареалы до р. Тычан и Тырадак и далее через Мирнинское поле до тр. Манчары [Smelov et al., 2009] на востоке. По сравнению с предыдущими версиями [Ashchepkov et al., 2014] включены новые данные для россыпных ареалов по р. Моркока [Garanin et al., 1998], бассейна р. Уджа и нижнего течения р. Лены, а также Восточно- и Западно-Укукитского, Орто-Ыаргинского, Молодинского, Биригиндинского и Хорбосуонского полей.

Основные продуктивные алмазоносные районы сосредоточены в пределах гранулит-ортогнейсовых террейнов: Маганского, Восточно- и Западно-Далдынского. Вместе с тем шовные зоны, такие как Хапчанская [Rosen, 2003], содержат больше эклогитов и эклогитовых алмазов в россыпях [Shatsky et al., 2015]. По-видимому, проницаемость шовной зоны обусловила обилие кимберлитовых полей вблизи восточной части Анабарского щита. В пределах гранит-зеленокаменных террейнов кимберлитовые поля встречаются относительно редко. Однако некоторые из них очень продуктивны, как, например, Накынское [Pokhilenko et al., 2000; Tolstov et al., 2009], что связано с присутствием специфических эклогитов, которые имеют протолит пелитового типа.

4. СЛОИСТОСТЬ ПЕРИДОТИТОВОЙ МАНТИИ ОТДЕЛЬНЫХ РАЙОНОВ ПОД СИБИРСКИМ КРАТОНОМ

ПТХ f_{O_2} диаграммы для трубок из основных районов кимберлитового магматизма Сибири описаны ранее в ряде работ и приведены в электронных приложениях к ним [Ashchepkov et al., 2010, 2013a, 2013b, 2014, 2015, 2016, 2017a, 2017b, 2017c].

4.1. ДАЛДЫНСКИЙ РАЙОН

Мантийный разрез под тр. Удачной, для которого использовано ~2000 ассоциаций глубинных пород [Sobolev, 1974; Sobolev et al., 1973, 1984, 1999; Snyder et al., 1997; Ponomarenko et al., 1976; Boyd et al., 1997; Jagoutz et al., 1994; Malygina, 2000; Kuligin, 1996; Pokhilenko et al., 1976, 2000, 2015; Ionov et al., 2010, 2015; Ashchepkov et al., 2013a, 2013b, 2014, 2017a, 2017b; Agashev et al., 2013; Misra et al., 2004] (рис. 2), обнаруживает слоистую структуру мантии, что заметно по чередованию субкальциевых (суб-Са) и обогащенных разностей пиропов, по колебанию железистости и по PТ-определениям, состоит из 6 (12) отдельных пластин до уровня 7.0 ГПа [Ashchepkov et al., 2014]. Ильменитовые определения от

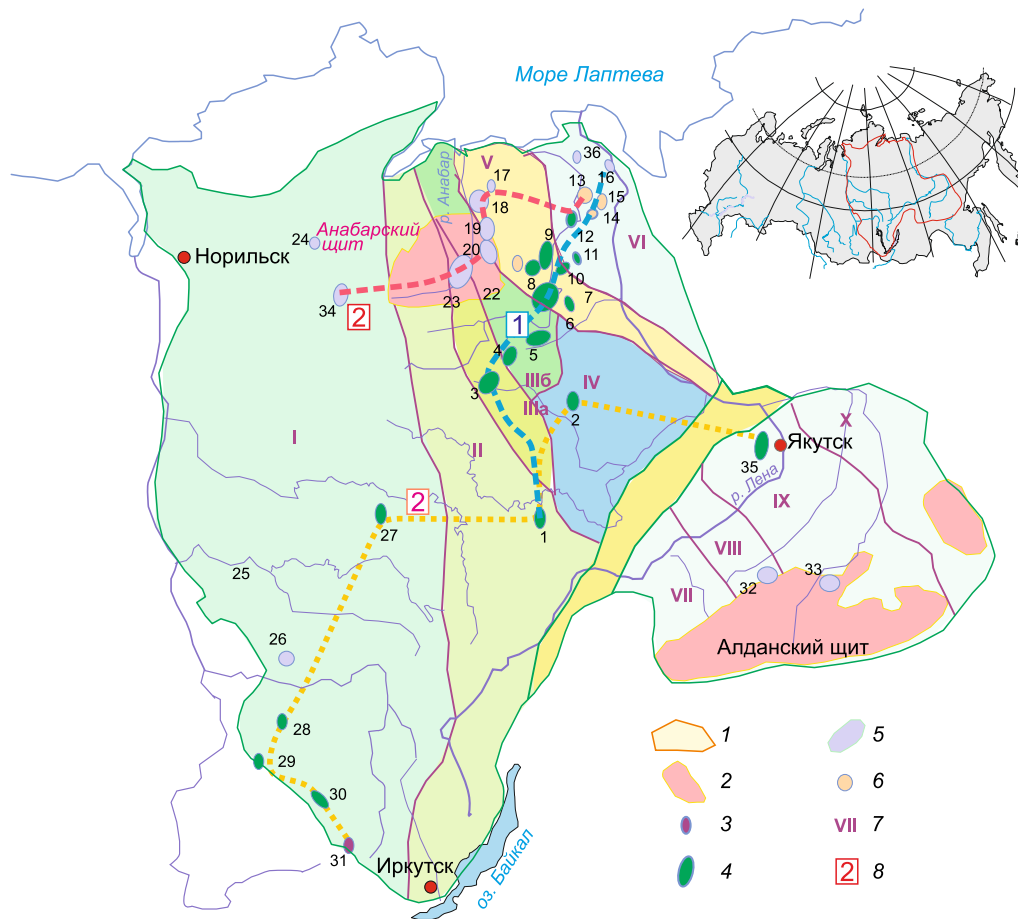


Рис. 1. Расположение кимберлитовых полей на Сибирской платформе [Kostrovitsky et al., 2007].

1 – Сибирская платформа; 2 – щиты; 3 – кимберлиты докембрия; 4 – палеозойские кимберлиты; 5 – триасовые кимберлиты; 6 – кимберлиты верхнеюрские; 7 – тектонические террейны согласно [Gladkochub et al., 2006]; 8 – линии направления разрезов мантийной литосферы: 1 – Харамай – Анабар-Куойка – устье Лены (карнийские туфы); 2 – Мало-Ботуобинское – Толуопское поле; 3 – Ингаши (Шарыжалгай) – Манчары (Западный Алдан). Поля: 1 – Мало-Ботуобинское, 2 – Накынское, 3 – Алаakit-Мархинское, 4 – Далдынское, 5 – Верхнемунское, 6 – Чомурдахское, 7 – Севернейское, 8 – Западный Укуит, 9 – Восточный Укуит, 10 – Огонер-Юряхское, 11 – Верхне-Моторчунское, 12 – Мерчимденское, 13 – Куойское, 14 – Верхнее Молодо, 15 – Толуопское, 16 – Орто-Ыаргинское, 17 – Эбеляхское, 18 – Старореченское, 19 – Ары-Мастахское, 20 – Дюкенское, 21 – Лучаканское, 22 – Куранахское, 23 – Среднекупнамское, 24 – М. Котуйское, 25 – Чадобецкое, 26 – Тайчикун-Нембинское, 27 – Тычанское, 28 – Муро-Коваинское, 29 – Туманшетское, 30 – Белозиминское, 31 – Ингашинское, 32 – Чомполинское, 33 – Тобук-Хатыстырское, 34 – Харамайское, 35 – Манчары, 36 – Нижнее Ленское.

Fig. 1. Kimberlite fields on the Siberian platform [Kostrovitsky et al., 2007].

1 – Siberian platform; 2 – shields; 3 – Precambrian kimberlites; 4 – Paleozoic kimberlites; 5 – Triassic kimberlites; 6 – Upper Jurassic kimberlites; 7 – tectonic terranes (after [Gladkochub et al., 2006]); 8 – directions of the mantle lithosphere cross-sections: 1 – Kharamai – Anabar-Kuoyka – Lena river mouth (Carnian tuffs), 2 – Malo- Botuoba – Toluop field, 3 – Ingashi (Sharyzhalgai) – Manchary (West Aldan). Fields: 1 – Malo-Botuoba, 2 – Nakyn, 3 – Alakit–Markha, 4 – Daldyn, 5 – Verkhne-Motorchunskoe, 6 – Chomurdakh, 7 – Severneiskoe, 8 – West Ukuit, 9 – East Ukuit, 10 – Ogoner–Yuryakh, 11 – Upper Motchun, 12 – Merchimden, 13 – Kuoy, 14 – Upper Molodo, 15 – Toluop, 16 – Ortho–Yarga, 17 – Ebelyakh, 18 – Starorechenskoe, 19 – Ary–Mastakh, 20 – Dyuken, 21 – Luchakan, 22 – Kuranakh, 23 – Middle Kupnam, 24 – M. Kotui, 25 – Chadobet, 26 – Taichikun–Nemba, 27 – Tychan, 28 – Muro–Kovain, 29 – Tumanshet, 30 – Beloziminskoe, 31 – Ingashin, 32 – Chompolin, 33 – Tobuk–Khatystyr, 34 – Kharamai, 35 – Manchary, 36 – Lower Lena.

носятся к интервалам, обедненным гранатом, – к дунит-гарцбургитовым линзам. Высокотемпературные пироксены трассируют границы палеосубдукционных пластин (рис. 2, а).

Резко слоистый разрез для мантийной колонны, судя по определениям для ксенолитов тр. Зарница [Ashchepkov et al., 2010, 2014, 2017b], дополнен определениями для высокохромистых гранатов (до

19 % Cr₂O₃) и для эклогитовых гранатов и ксенолитов. Конвективная ветвь в основании продолжается определениями для ильменитов и Ti-Cr диопсидов (рис. 2, б).

Мантийная колонна под трубкой Аэромагнитной имеет ступенчатую геотерму, которая получена в основном по клинопироксенам и гранатам, оценки по хромитам близки, а ильменитовые

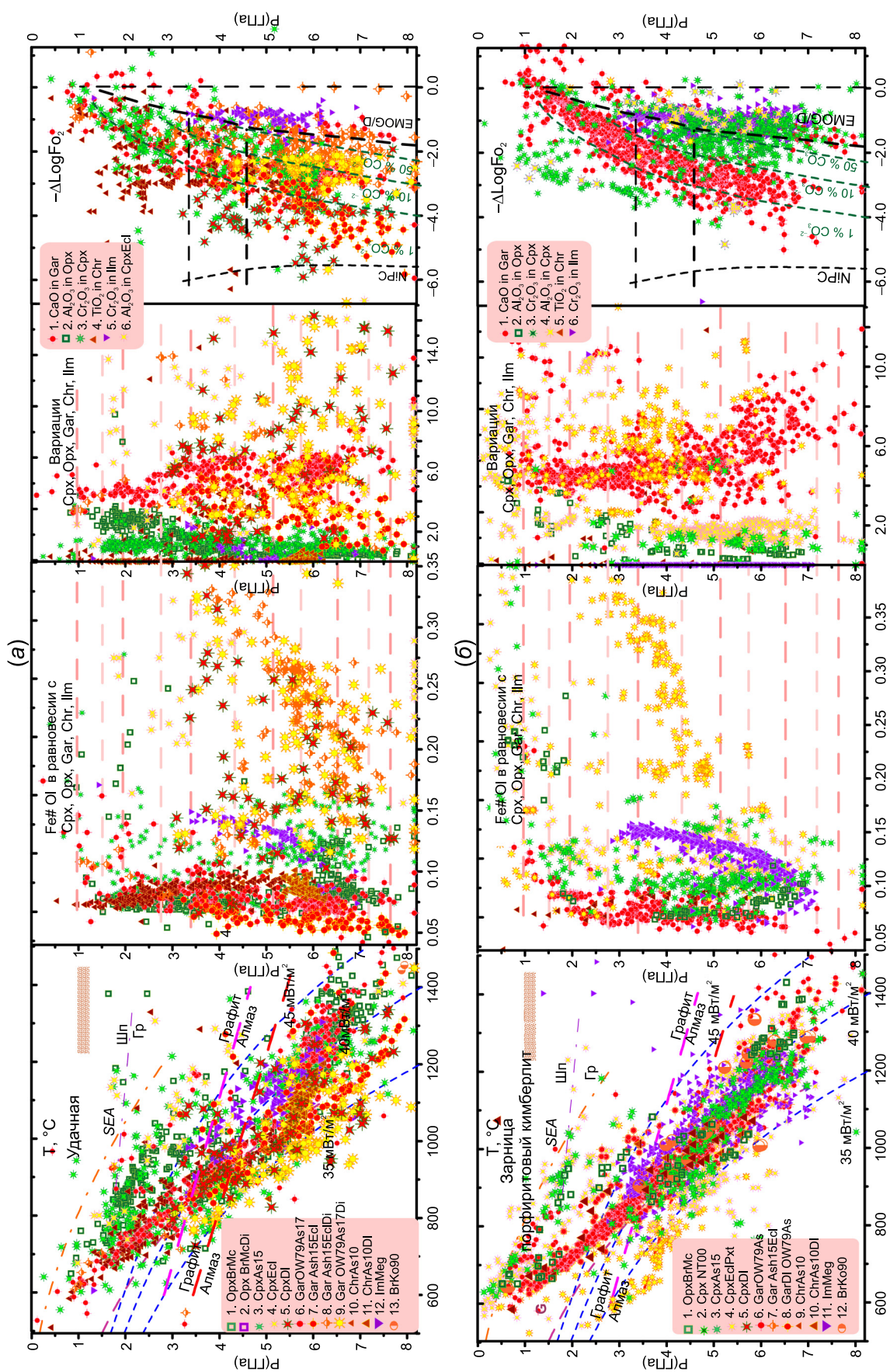


Рис. 2. (а) – P_XF₀₂ диаграмма для всех данных по тр. Удачной. 1 – Орх (Т°С [Brey, Kohler, 1990] – Р (ГПа) [McGregor, 1974]; 2 – то же для включений в алмазы; 3 – Срх:Т°С и Р (ГПа) [Ashchepkov et al., 2015]; 4 – Т°С и Р (ГПа) [Ashchepkov et al., 2017]; 5 – то же для включений в алмазы; 6 – Gar: [O'Neill, Wood, 1979] – Р (ГПа) [Ashchepkov et al., 2010] для перидотитов; 7 – то же для включений в алмазы; 8 – Т°С [Krogh, 1988] и Р (ГПа) [Ashchepkov et al., 2017a] для эклогитов; 9 – то же для включений в алмазы; 10 – хромит Т°С [O'Neill, Wall, 1987] – Р (ГПа) [Ashchepkov et al., 2010]; 11 – то же для включений в алмазы; 12 – ильменит [Taylor et al., 1998] – Р (ГПа); 13 – Т°С–Р (ГПа) [Brey, Kohler, 1990]. (б) – P_XF₀₂ диаграмма для всех данных по тр. Зарница (Далдынское поле).

Fig. 2. (a) – P_XF₀₂ diagram for all the data on the Udachny pipe. 1 – Орх (Т°С [Brey, Kohler, 1990] – Р (ГПа) [McGregor, 1974]; 2 – for inclusions in diamonds; 3 – Срх:Т°С and Р (ГПа) [Ashchepkov et al., 2015]; 4 – Т°С and Р (ГПа) [Ashchepkov et al., 2017a]; 5 – for inclusions in diamonds; 6 – Gar [O'Neill, Wood, 1979] – Р (ГПа) [Ashchepkov et al., 2010] for peridotites; 7 – for inclusions in diamonds; 8 – Т°С [Krogh, 1988] and Р (ГПа) [Ashchepkov et al., 2017] for eclogites; 9 – for inclusions in diamonds; 10 – chromite Т°С [O'Neill, Wall, 1987] – Р (ГПа) [Ashchepkov et al., 2010]; 11 – for inclusions in diamonds; 12 – ilmenite [Taylor et al., 1998] – Р (ГПа); 13 – Т°С – Р (ГПа) [Brey, Kohler, 1990]. (б) – P_XF₀₂ diagram for all the data on the Zarnitsa pipe (Daldyn field).

несколько более высокотемпературны. Гранатовые определения обнаруживают слоистый разрез собственно перидотитовой мантии, который реконструирован по колебаниям Fe# (приложение 1, а).

Мантийный разрез под тр. Загадочной [Sobolev V.S., Sobolev N.V., 1967; Nimis et al., 2009] обнаруживает ступенчатую структуру (из семи горизонтов), которая также различима по вариациям на диаграмме P–Fe# для гранатов. Клинопироксены трассируют как высокотемпературную, так и низкотемпературные ветви геотерм (приложение 1, б).

4.2. АЛАКИТСКОЕ ПОЛЕ

Обнаруживается непрерывный рост Fe# гранатов и других минералов от основания литосферы до Мохо. Дробное деление по P–Fe# на 6–7 интервалов давления аналогично другим трубкам Алакитского поля (рис. 2, а, б). Для мантийного разреза под тр. Айхал (рис. 3, а) установлен существенный разогрев от 38 до 45 мВт/м² в нижней части в интервале 0.8–1.0 ГПа в пределах горизонта гранатовых дунитов [Pokhilenko et al., 1991], ксенолиты которых часто встречаются в порфириновых кимберлитах этой трубки.

Под тр. Краснопресненской (рис. 3, б) мантийная колонна содержит несколько горизонтов суб-Са пиропов. Характеристики мантийной колонны сходны с таковыми крупных трубок Алакитского поля – Айхал [Ashchepkov et al., 2017b] и Юбилейной [Oleynikov, 2000; Ashchepkov et al., 2004]. Ст-шпинелевые РТ-определения везде ложатся вдоль пироксеновой геотермы. Высокотемпературные определения обычно отражают разогрев вблизи пироксенитового горизонта в средней части СКЛМ.

4.3. МИРНИНСКОЕ ПОЛЕ, МАЛО-БОТУОБИНСКИЙ РАЙОН

Мантийный разрез под тр. Мир (рис. 4, а) [Sobolev et al., 1970; Roden et al., 2006; Laz'ko, Roden, 2003; Ashchepkov et al., 2010, 2014; Spetsius, Serenko, 1990] обнаруживает неравномерный разогрев верхнего уровня (1.0–3.0 ГПа), судя по определениям для ильменита, хромита и пироксенитовых гранатов. В интервале 3.0–4.0 ГПа более существенный разогрев установлен по клинопироксенам из включений в алмазе. Следующий интервал – от 4.0 до 5.0 ГПа – отвечает РТ-определениям по включениям в алмазе граната и ортопироксена, которые лежат на холодном отрезке геотермы ~800 °С, а пироксеновые включения в алмазе дают разогрев до 1250 °С. Ниже наклонная конвективная ветвь от 6.0 до 8.0 ГПа трассируется хромитовыми РТ-определениями с разбросом температур в 300 °С от кондуктивного градиента 35 мВт/м², который дают эклогитовые пироксены и суб-Са гранаты до

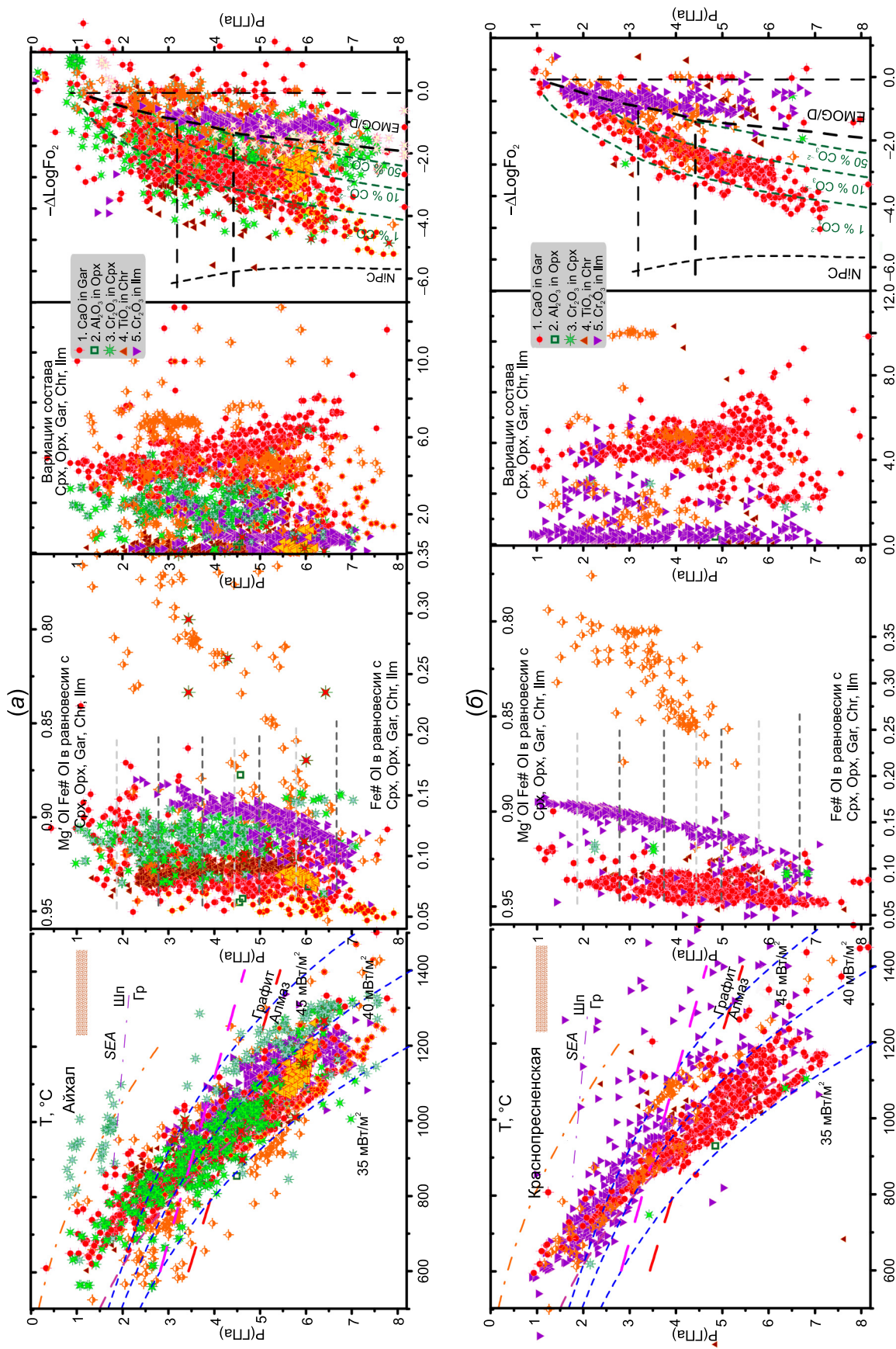


Рис. 3. P F_{O_2} диаграмма для минералов из тр. Айхал (а) и тр. Краснопресненской (Алакитское поле) (б).

Fig. 3. P F_{O_2} diagram for minerals from the Aikhal pipe (a) and the Krasnopresnenskaya pipe (Alakit field) (b).

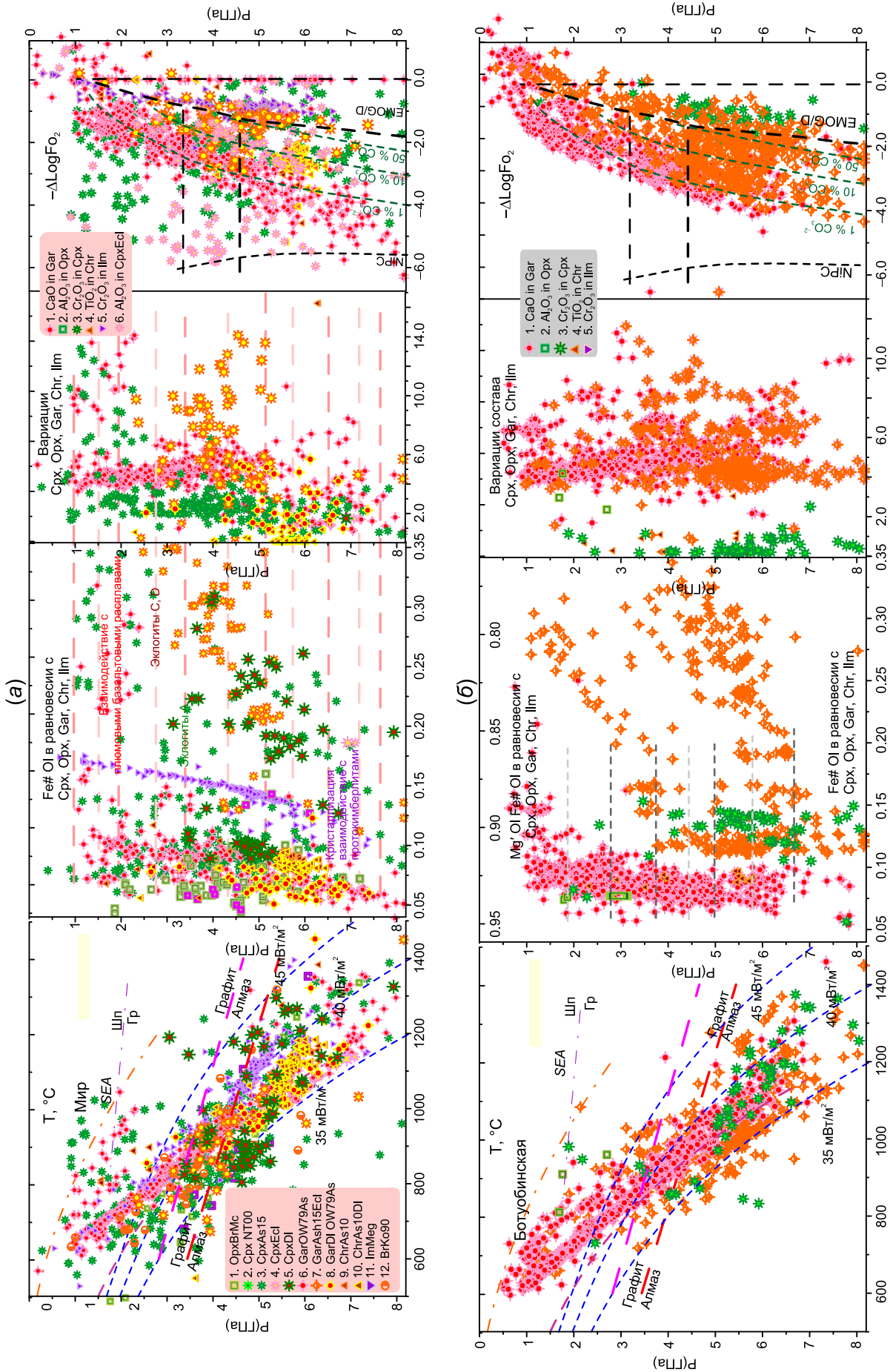


Рис. 4. PXF₀₂ диаграмма для минералов из тр. Мир (Мирнинское поле) (а) и тр. Ботубовинской (Накунское поле) (б).

Fig. 4. PXF₀₂ diagram for minerals from the Mir pipe (Mirny field) (а) and the Botuobinsk pipe (Nakun field) (б).

конвективной ветви 45 мвт/м², полученной по хромитам, пироксенам, ильменитам. Под трубкой Мир истощенные гранаты присутствуют от основания СКЛМ 7.5 ГПа до пироксенитового горизонта – 4.5 ГПа. Разрез мантийной колонны под тр. Интернациональной (приложение 2, а) характеризуется обилием эклогитов и клинопироксенов с высоким содержанием Na₂O, Cr₂O₃, FeO и Al₂O₃ [Ashchepkov et al., 2013a], что типично для гибридных (с материалом эклогитов) перидотитовых пород. Начиная с астеносферного уровня 6.5 ГПа и до 5.0 ГПа мантия существенно разогрета.

4.4. НАКЫНСКОЕ ПОЛЕ

Мантийные разрезы под тр. Ботуобинской и телом Майским (рис. 4, б) схожи с ранее опубликованными данными для тр. Нюрбинской [Pokhilenko et al., 2000; Riches et al., 2010; Spetsius et al., 2008; Ashchepkov et al., 2004c, 2014, 2017a].

По гранатам геотерма для трубки Ботуобинской расщепляется на две ветви, что предполагает разогрев, сопровождающийся развитием ильменитовых метасоматитов. Перидотитовая колонна под Накынскими трубками более разогрета, чем в Далдыно-Алакитском районе, судя по гранатовой термобарометрии до геотермы 40 мвт/м². Пироксеновая геотерма, построенная для мантийной колонны под тр. Ботуобинской, высокотемпературна от основания СКЛМ до 4.8 ГПа и лишь выше приближается к обычному градиенту 40–35 мвт/м². Основная часть хромитовых точек в средней части разреза определяет излом на геотерме около 5.0 ГПа с разогревом ниже. Колонна сложена 12 горизонтами существенно лерцолитового и гарцбургитового типа. Клинопироксены, характерные для деформированных перидотитов, обнаружены во всех трубках поля. Эклогитовые определения дают постепенный ступенчатый рост железистости. Судя по дискретности тренда хромитов тр. Ботуобинской (рис. 4, б), можно предположить переслаивание перидотитовых и эклогитовых горизонтов. В колонне мантии под тр. Майской [Tolstov et al., 2009] определения для суб-Са-гранатов демонстрируют даже более резкую слоистость (приложение 2, б).

4.5. ВЕРХНЕМУНСКОЕ ПОЛЕ

Поле содержит несколько алмазоносных трубок [Zaitsev, Smelov, 2010]. Трубки Заполярная и Новинка [Nimis et al., 2016] (рис. 5, а, б), Комсомольская-Магнитная (приложение 3, а) имеют близкую структуру мантийных колонн, которая состоит из четырех крупных интервалов. Под Заполярной пироксенитовые породы спорадически встречаются

от основания разреза (6.5 ГПа) до отметки 3.0 ГПа. Отмечается также высокотемпературная гранатовая ветвь для обогащенных Ti ассоциаций, по-видимому, вблизи мантийных тел, подверженных влиянию протокимберлитов, которые сформировали РТ-траектории подъема расплавов. Под трубкой Новинка присутствуют богатые пироксенами породы во всем интервале давления с минимальными определениями вблизи 35 мвт/м² и неравномерным разогревом до 40 и 45 мвт/м² в основании разреза. Присутствие конвективной ветви ниже 7.5 ГПа говорит о том, что эти трубки имеют глубинное заложение и должны быть продуктивными.

4.6. ПОЛЕ МОРКОКА

Среди гранатов из аллювия и в тр. Моркока [Garanin et al., 1998] присутствует много субкальциевых гранатов, которые слагают четыре интервала, от 4 до 8 ГПа, совместно с гранатами с повышенным СаО, которых много также и в верхней части разреза мантии, куда попадают и хромитовые РТ-определения. Интервал повышенной железистости 3.8–4.5 ГПа, по-видимому, маркирует пироксенитовый горизонт. Геотерма в нижней части разреза до 4.5 ГПа относительно низкотемпературная, а выше высокотемпературная (40–45 мвт/м²) и образована совместно РТ-определениями по пиропам и ильменитам. Эклогитовые гранаты слагают интервал 6–7 ГПа и встречаются в средней части интервала (рис. 6, а).

4.7. ПОЛЕ МАНЧАРЫ

В мантийной колонне под трубкой Манчары [Smelov et al., 2009] гранатовые перидотиты в основном относятся к верхним и нижним частям интервала. В средней части СКЛМ в основном встречаются хромитсодержащие породы (гарцбургиты), подверженные Ti-метасоматозу, которые слагают три интервала – от 3.0 до 5.5 ГПа. К этому интервалу относятся и дунитовые пиропы (рис. 6, б).

5. СТРОЕНИЕ МАНТИЙНЫХ КОЛОНН ПОД ТРИАСОВЫМИ КИМБЕРЛИТАМИ ПРИАНАБАРЬЯ

5.1. ХАРАМАЙСКОЕ ПОЛЕ

Разрезы мантии под трубками Прианабарья от Ары-Мастахского до Куранахского поля резко различаются [Ashchepkov et al., 2016]. В западной части разреза за пределами щита под Харамайским полем [Griffin et al., 2005] (приложение 4, а) гранат-пироксенсодержащие ассоциации представляют глубинные литосферные корни, начиная с 6.5 ГПа.

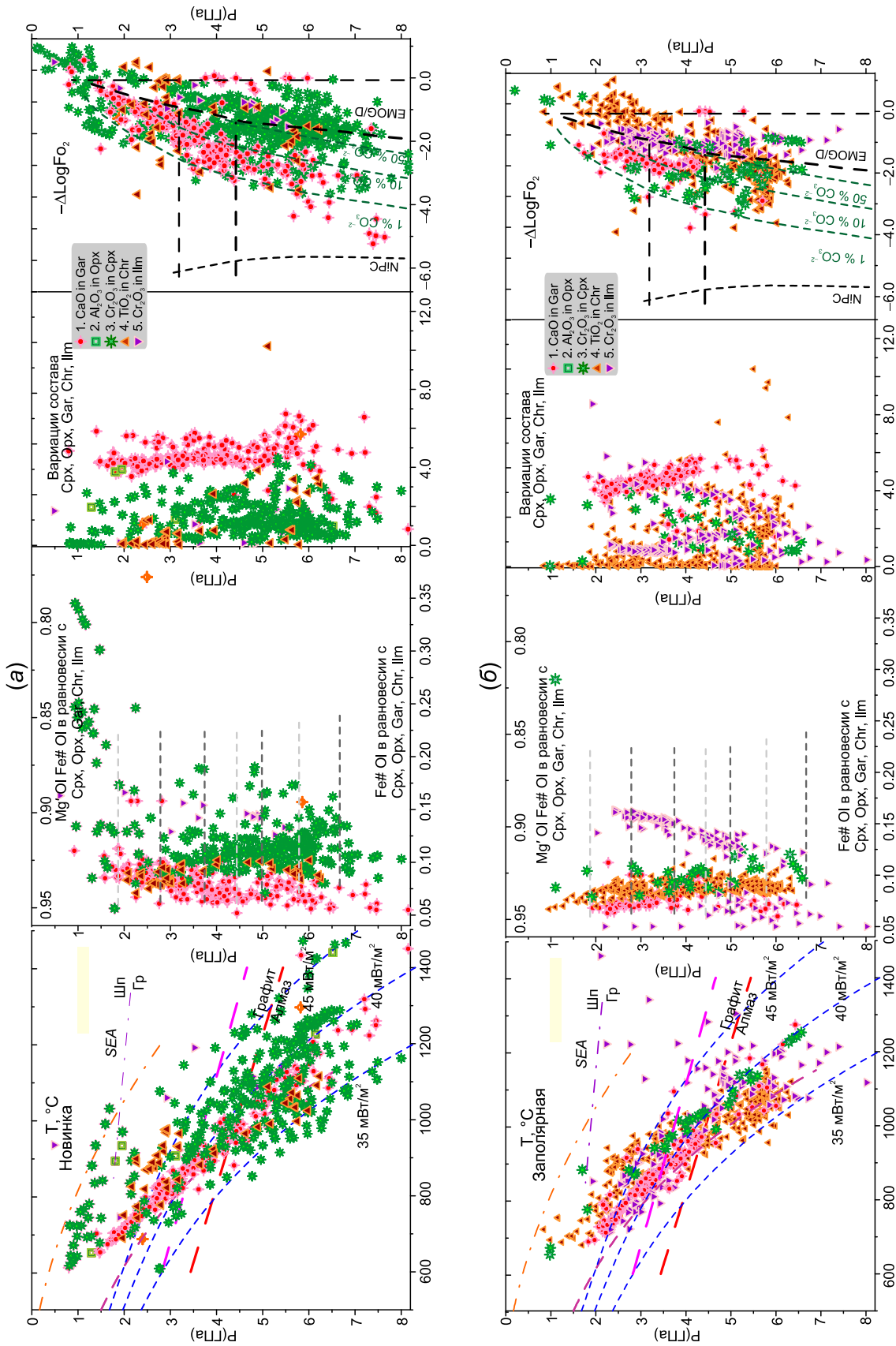


Рис. 5. PXF₀₂ диаграмма для минералов из трубок Новинка (Верхнемунское поле) (а) и Заполярная (Верхнемунское поле) (б).

Fig. 5. PXF₀₂ diagram for minerals from the Novinka pipe (a) and the Zapolyarnaya pipe (Verkhnemunskoe field) (b).

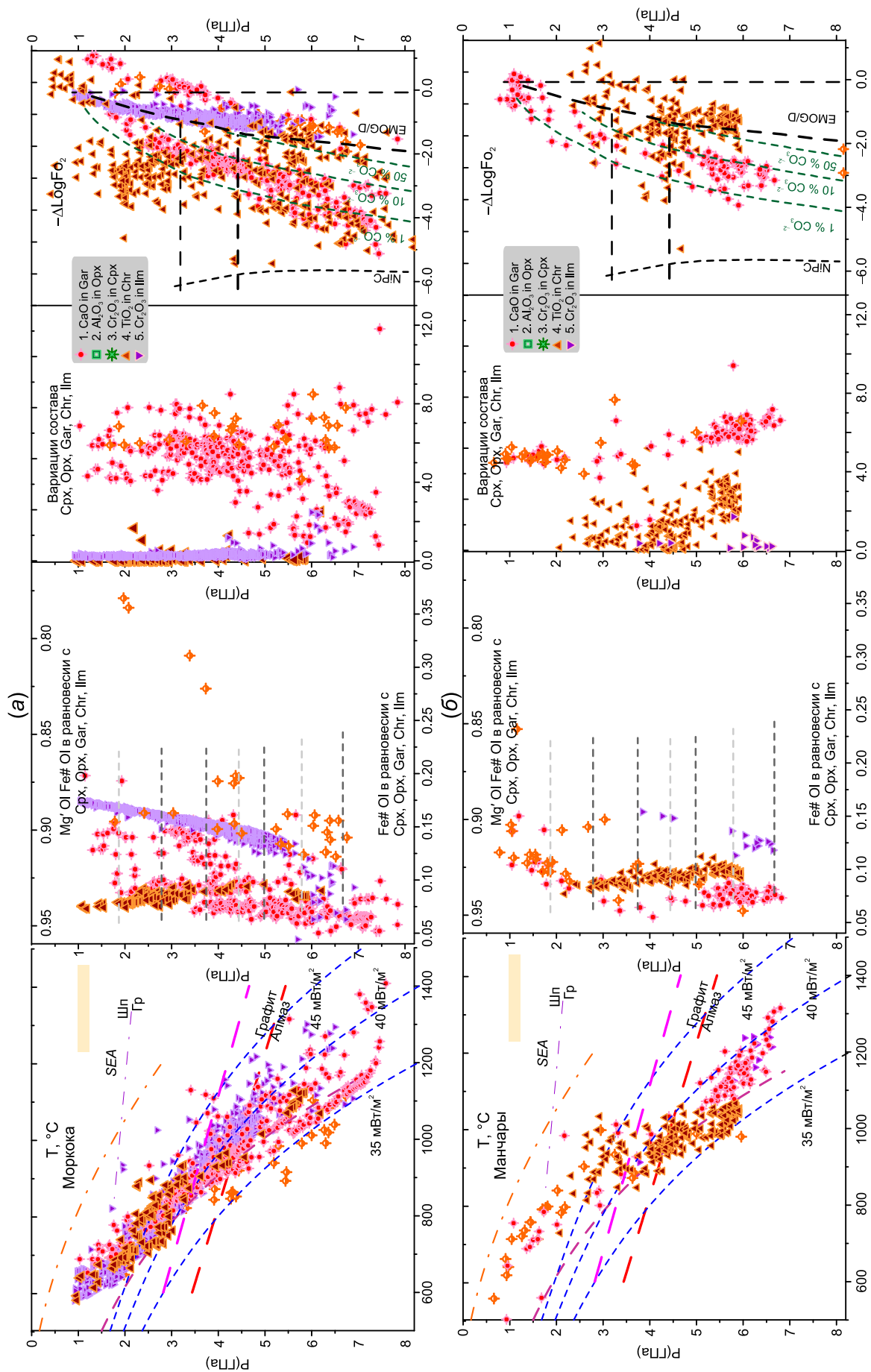


Рис. 6. PXF_{O_2} диаграмма для минералов из трубки Моркока (а) и трубки Манчары (б).

Fig. 6. PXF_{O_2} diagram for minerals from the Morkoka pipe (a) and the Manchary pipe (b).

Нижняя часть разреза до 4 ГПа существенно разогрета и подвержена Ti-метасоматозу.

5.2. АРЫ-МАСТАХСКОЕ ПОЛЕ

Близкие условия были определены для западной части Анабарского щита под трубками Хардах и Бумеранг (см. рис. 4, б). Мантия Прианабарья, судя по ксенолитам из некоторых трубок [Ashchepkov et al., 2001], в основном представлена гигантозернистыми дунитами с пироксен-гранатовыми шширами, возникшими при регенерации расплавами, которые чередуются с глиммеритовыми метасоматитами. Гранаты лерцолитового типа в трубке Университетской и Бумеранг выносятся в основном из верхних частей разреза [Ashchepkov et al., 2016] (приложение 4, б), но наиболее магнезиальные отмечены в интервале 5–6 ГПа, однако они не суб-Са ряда. В средней части разреза мантия существенно регенерирована с образованием богатых пироксеном пород, в интервале 5–3 ГПа много и пироксентов.

5.3. ДЮКЕНСКОЕ ПОЛЕ

Мантийная колонна под Дюкенским полем (приложение 5, а) отчетливо делится на три основных интервала, которые установлены на основании тренда P-Fe#, P-fO₂ с ростом Fe# для гранатов и хромитов в каждом интервале с разделами на уровнях 6 и 3.5 ГПа. Свежие ксенолиты дают оценки до 6.5 по пироксенам и до 7 ГПа по пиропам.

5.4. КУРАНАХСКОЕ ПОЛЕ

Под данным полем основание литосферы установлено на уровне >6.0 ГПа для трубок Малокуонамской, Трудовой, Лось, Университетской и др. (см. приложение 3, б), тогда как клинопироксены (иногда с ильменитом) дают более высокие давления (до 7 ГПа) и распространены повсеместно в пределах щита. Они более железисты, чем перидотитовые гранаты. Ильменитовые определения для кимберлитовых трубок этого поля дают протяженный интервал, обычно ограничивающийся 7.5–2.0 ГПа.

5.5. БИРИГИНДИНСКОЕ ПОЛЕ

В кимберлитах трубок Ксюша, Чеховская, Блинд и других также преобладают оранжевые гранаты, пиропы в основном малоглубинные, а обильные хромиты относятся к нижней части интервала, где единичные высокохромистые суб-Са пиропы дают давление до 7 ГПа, что свидетельствует о крайнем истощении средней и нижней части разреза СКЛМ (приложение 7, а). Обычная ветвь адвективного

типа, близкая к 35 мвт/м² в основании СКЛМ и к 50 мвт/м² в верхней части, определена для мантии под Архангельскими трубками [Afanasyev et al., 2013] и устанавливается для многих трубок Сибири и мира. Более высокотемпературная близка к кондуктивной 45 мвт/м². Пиропы дают зигзагообразный тренд P-Fe# (рис. 7, б).

5.6. ЗАПАДНО-УКУКИТСКОЕ ПОЛЕ

Для ксенокристов из трубок Ленинград и Светлана [Kornilova et al., 2016] (рис. 7, а) по пиропам определен слоистый разрез с более железистой верхней частью (до 3.5 ГПа) и высокомагнезиальными перидотитами в основании (5 ГПа). Низкая алмазоносность трубки обусловлена тем, что нижняя часть мантийной колонны подвергалась многостадийному метасоматозу, судя по разветвленному тренду Cr-Mg-ильменитов. Перидотитовые включения и Cr-диопсиды и хромиты в тр. Светлана (рис. 7, б) дают ступенчатый тренд, разделенный на три больших интервала. Среди пиропов, слагающих среднюю часть разреза, значительное место занимает субкальциевый тип. Нижняя часть подвержена Ti-метасоматозу, хотя ильменитов практически нет, его заменяет хромит с высоким содержанием ульвошпинели.

6. СРЕДНЕЕ И НИЖНЕЕ ТЕЧЕНИЕ Р. АНАБАР

6.1. ЭБЕЛЯХСКОЕ ПОЛЕ

Шлиховые ареалы по рекам Маят и Холломолх (рис. 8, а) близ п. Эбелях и по включениям в алмазах [Shatsky et al., 2015; Babushkina, 2013] обнаруживают протяженный разрез перидотитовой мантии. Пиропы дают субвертикальный тренд по P-Fe#, состоящий из четырех интервалов, которые подчеркнуты появлением суб-Са гранатов и колебаниями железистости. Эклогиты дают наклонный тренд возрастания Fe# при снижении давления. Мантия неравномерно разогрета, что особенно характерно для эклогитов, которые на РТ-диаграмме группируются в облако от 35 до 50 мвт/м². Ильменитовый ступенчатый тренд 7.0–2.5 ГПа предполагает четыре–пять горизонтов в нижней части разреза (рис. 8, а).

6.2. ВЕРХНЕУДЖИНСКОЕ ПОЛЕ

В верхнем – среднем течении р. Уджа (к западу от Томторского поля) пироповые и эклогитовые гранаты дают довольно высокотемпературную геотерму с широким температурным разбросом. Ильменитовый тренд, более протяженный, чем под Эбеляхским полем, на РТ-диаграмме распадается на

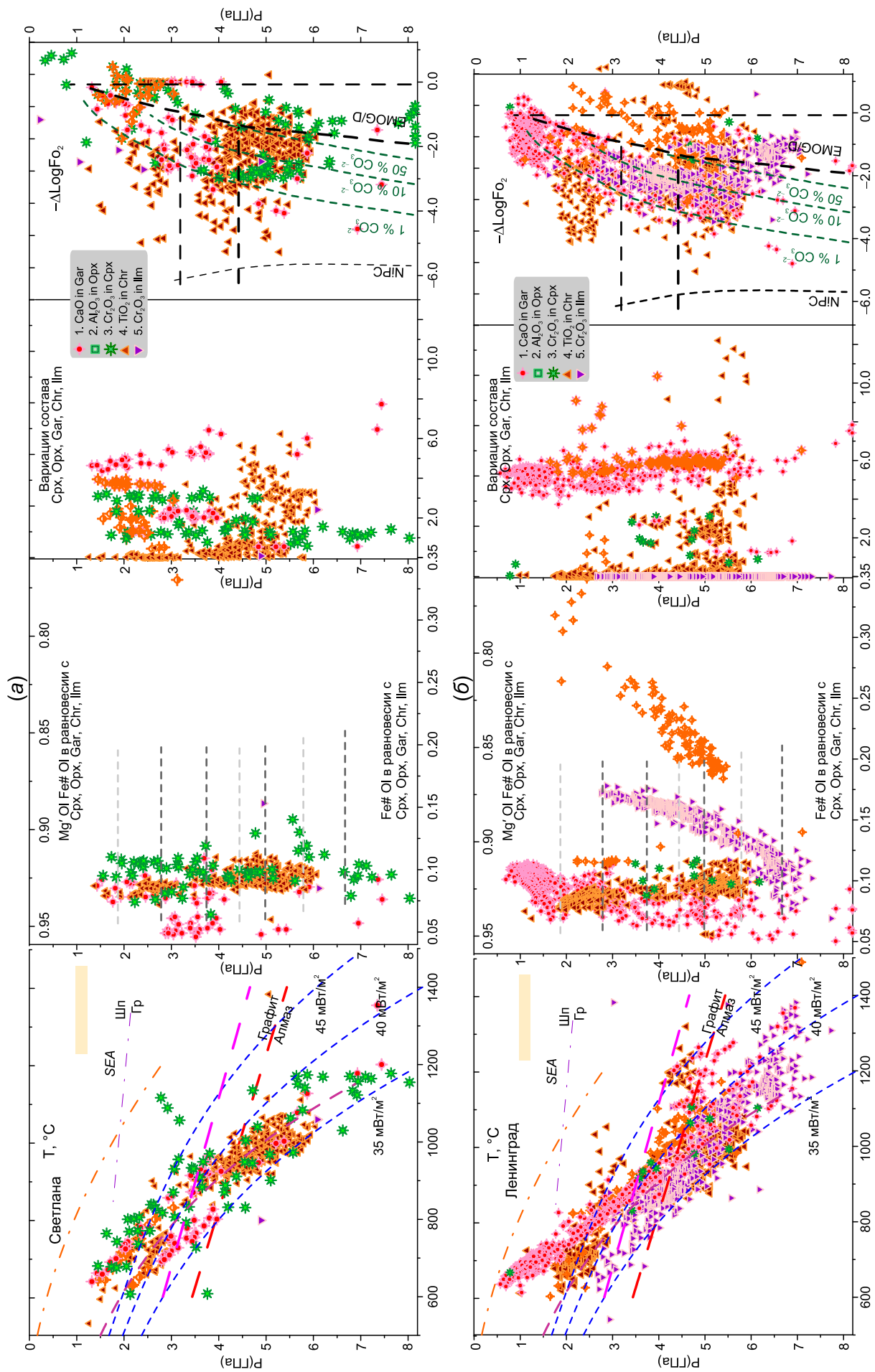


Рис. 7. PXF₀₂ диаграмма для минералов из тр. Светлана (а) и Ленинград (б) (Западно-Уайтское поле).

Fig. 7. PXF₀₂ diagram for minerals from the Svetlana pipe (a) and the Leningrad pipe (b) (West Ukait field).

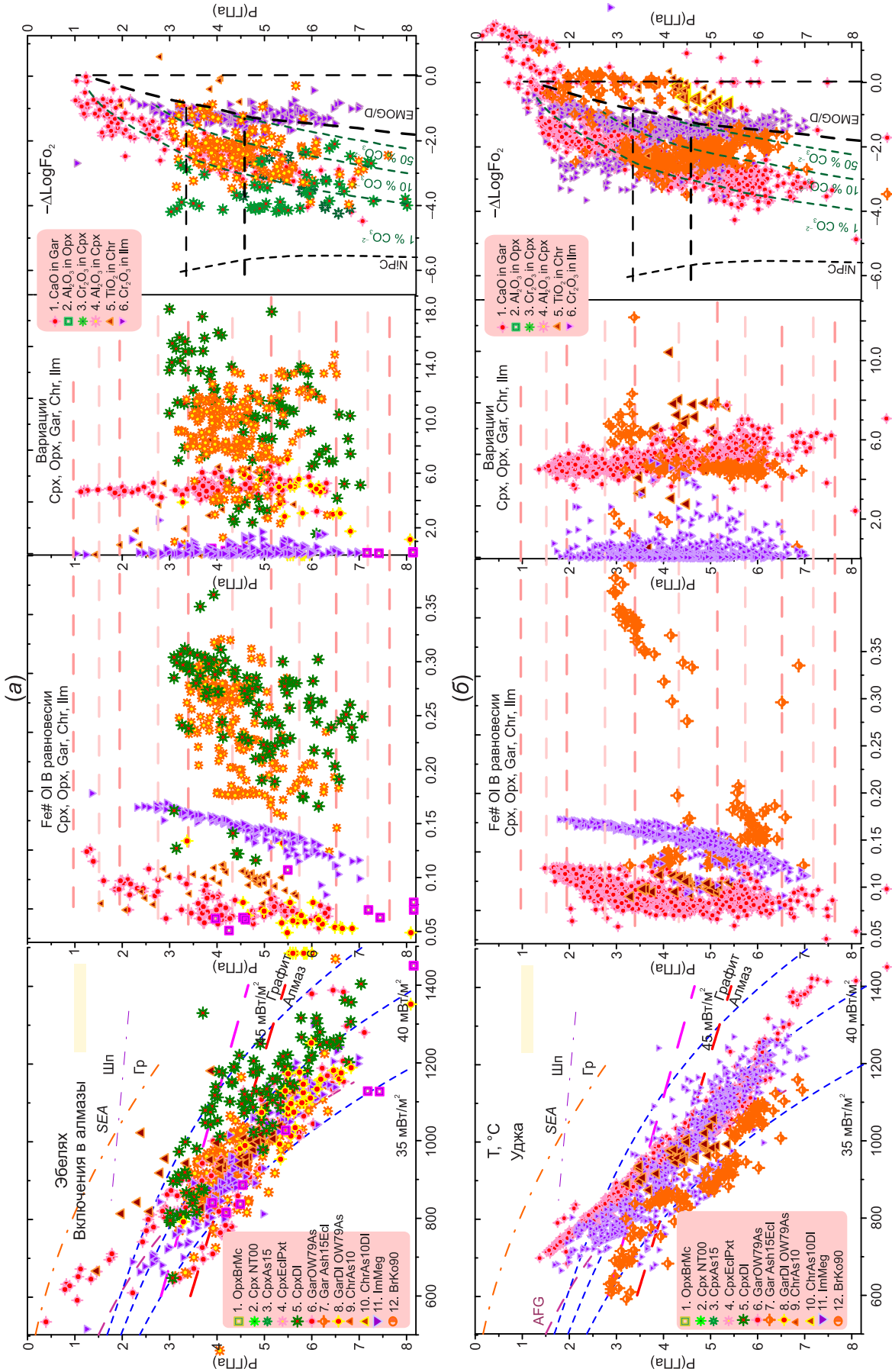


Рис. 8. PXF₀₂ диаграмма для включений в алмазы поля Эбелях [Shatsky et al., 2015] (а) и шлиховых минералов р. Уджа (Верхнеуджинское поле) (б).

Fig. 8. PXF₀₂ diagram for inclusions in diamonds of the Ebelyakh field [Shatsky et al., 2015] (a) and placer minerals of the Udzha river (Upper Udzha field) (b).

высокотемпературную часть, которая совпадает с пироповым РТ-трендом, и низкотемпературную, совпадающую с эклогитовым трендом. Слоистость заметна в нижней части разреза по колебаниям Fe# и CaO (рис. 8, б).

7. СТРОЕНИЕ МАНТИЙНОЙ ЛИТОСФЕРЫ ПОД СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТЬЮ СИБИРСКОГО КРАТОНА ЯКУТИИ

7.1. ВЕРХНЕМОТОРЧУНСКОЕ ПОЛЕ

Самая крупная трубка Аэрогеологическая (см. приложение 5, б) имеет глубококоматасоматизированную мантийную колонну, особенно в нижней части интервала, где проявлены сложные ступенчатые тренды для ильменитов, что означает многоэтапное внедрение протокимберлитовых расплавов. Перидотитовая часть состоит из шести основных интервалов, близких к вертикальному, и наклон трендов Р-Fe# не предполагает промывку эволюционирующими расплавами. Эклогиты в основном железистого типа более характерны для средней части разреза.

7.2. КУОЙКСКОЕ ПОЛЕ

Это поле формирует плотная популяция трубок юрского возраста (примерно 175–150 млн лет), однако часть из них, по-видимому, относится к более ранним девонским и триасовым этапам [Zaitsev, Smelov, 2010].

В тр. Обнаженной свежие ксенолиты пироксенитов и элогитов [Ovchinnikov, 1990; Taylor et al., 2003; Ionov et al., 2015, 2018] соответствуют давлению <4 ГПа, однако в пределах поля известны шлиховые алмазы, а в некоторых трубках значительна доля высокохромистых пиропов (рис. 9, а). Минералы из трубок Дьянга, Водораздельной, Заозерной и других соответствуют значениям до 7 ГПа и содержат суб-Са гранаты (рис. 9, б).

7.3. МОЛОДИНСКОЕ ПОЛЕ

Интервал давлений по трубке Мэри составляет от 7.5 до 2.0 ГПа; в нижней части он отличается дискретными значениями на субвертикальном тренде Р-Fe#, а начиная с 4 ГПа становится наклонным. Адвективная геотерма по ильменитам относительно высокотемпературная. Включения в алмазах эклогитового типа ложатся на низкотемпературную ветвь геотермы, одно из которых попадает на тренд мегакристаллов (приложение 6, а). Шлиховые ареалы к востоку близки по РТ-параметрам (приложение 6, б).

7.4. ХОРБОСУОНСКОЕ ПОЛЕ

Для ксенокристаллов из трубки Гоби и по шлиховому материалу из аллювия в нижнем течении р. Оленек близ устья Хорбосуонки построена РТХ-диаграмма. Гранаты дают высокотемпературную геотерму и наклонный профиль на диаграмме Р-Fe# с обогащением Fe в верхней части, что типично для раннетриасовых и юрских трубок. Нижняя часть >4 ГПа делится на пять интервалов по колебаниям CaO в пиропе (приложение 7, б, 8, а).

7.5. МОРЕ ЛАПТЕВЫХ И УСТЬЕ Р. ЛЕНЫ, КАРНИЙСКИЙ КОЛЛЕКТОР

Для спутников из высокоалмазоносного Карнийского коллектора близ устья р. Лены [Sobolev et al., 2013] построена диаграмма по данным А.П. Смелова и С.А. Бабушкиной и оригинальным анализам с добавлением опубликованных материалов. Широкое распространение эклогитовых гранатов алмазного парагенезиса и отсутствие ильменитов в россыпях указывают на источник, близкий к лампроитам или кимберлитам II типа – оранжеитам (приложение 8, б).

7.6. ЮЖНАЯ ЧАСТЬ СИБИРСКОГО КРАТОНА, ПРИСАЯНЬЕ

В Ингашинском проявлении алмазов на Восточном Саяне, в жиле Искра, содержатся пиропы и пироп-альмандиновые гранаты и хром-диопсиды. По лерцолитовым пиропам [Vladimirov et al., 1976; Egorov et al., 2006] определены вариации давления 2–7 ГПа и среднетемпературное положение геотермы с конвективной ветвью в основании СКЛМ, куда попадают и определения по эклогитовым гранатам (Fe#=0.25) (5–7 ГПа) (рис. 10, а).

Шлиховые ареалы бассейна р. Туманшет – левого притока р. Бирюса в Предсаянье (рис. 10, б) – содержат пиропы, в том числе алмазной фации. Выделяется три больших интервала с разогревом в интервале 5.0–7.5 ГПа. Колебания Ca предполагают присутствие нескольких горизонтов пироксенитов в разрезе мантии.

По пиропам Муро-Ковинских русловых отложений установлен близкий тип геотермы и разреза, однако широкие колебания железистости, вероятно, означают масштабное взаимодействие с расплавами в перидотитовой колонне.

7.7. АЛДАНСКИЙ ЩИТ, ЧОМПОЛИНСКОЕ ПОЛЕ

РТХ-диаграммы для ксенокристов из юрских кимберлитоподобных пород Алданского щита дают довольно малоглубинный разрез мантии, похожий на установленный для тр. Обнаженной

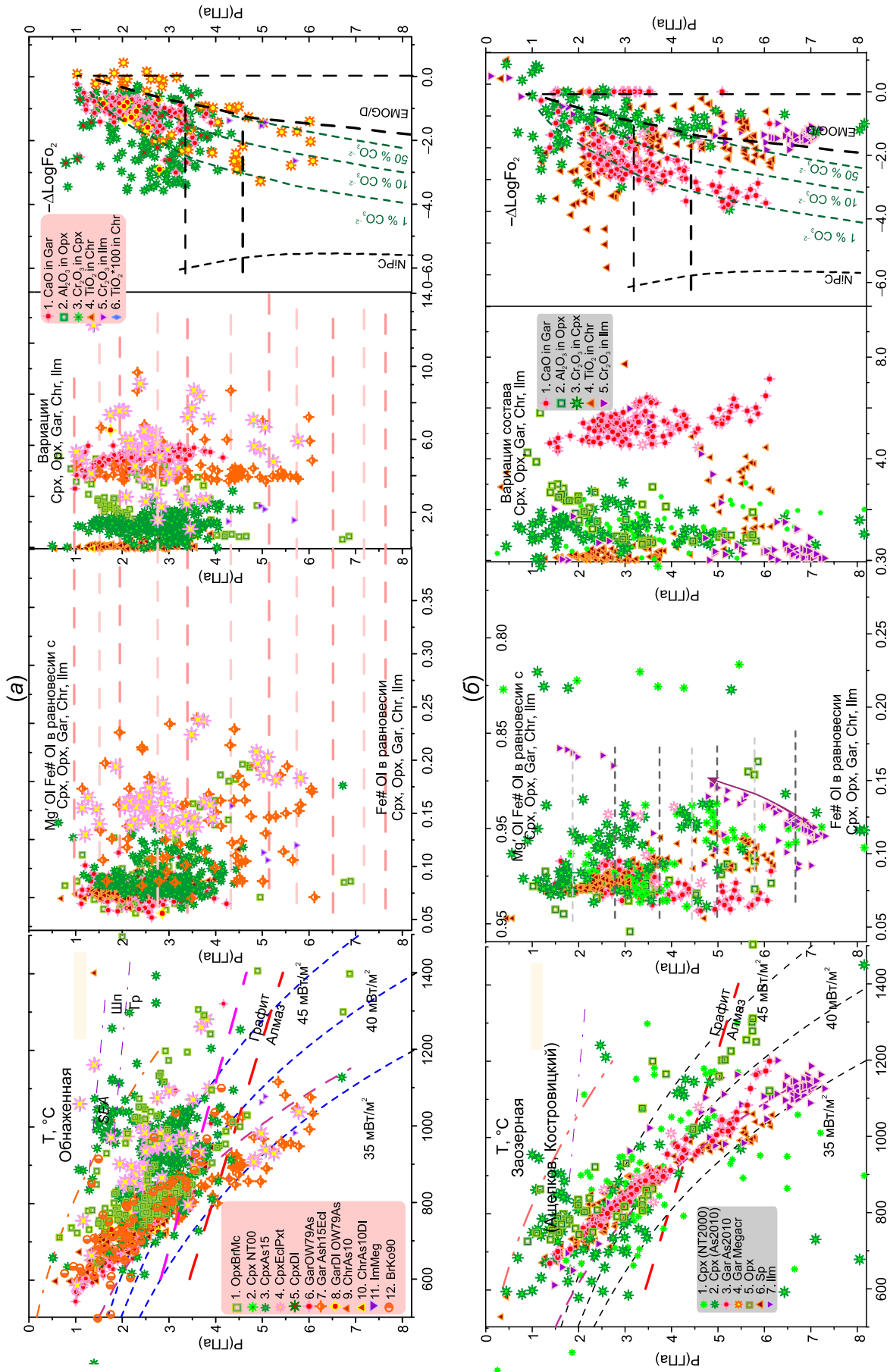


Рис. 9. PXF₀₂ диаграмма для минералов из тр. Обнаженной (а) и тр. Заозерной (Куойкское поля) (б).

Fig. 9. PXF₀₂ diagram for minerals from the Obnazhennaya pipe (a) and the Zaozernaya pipe (Kuoyk field) (b).

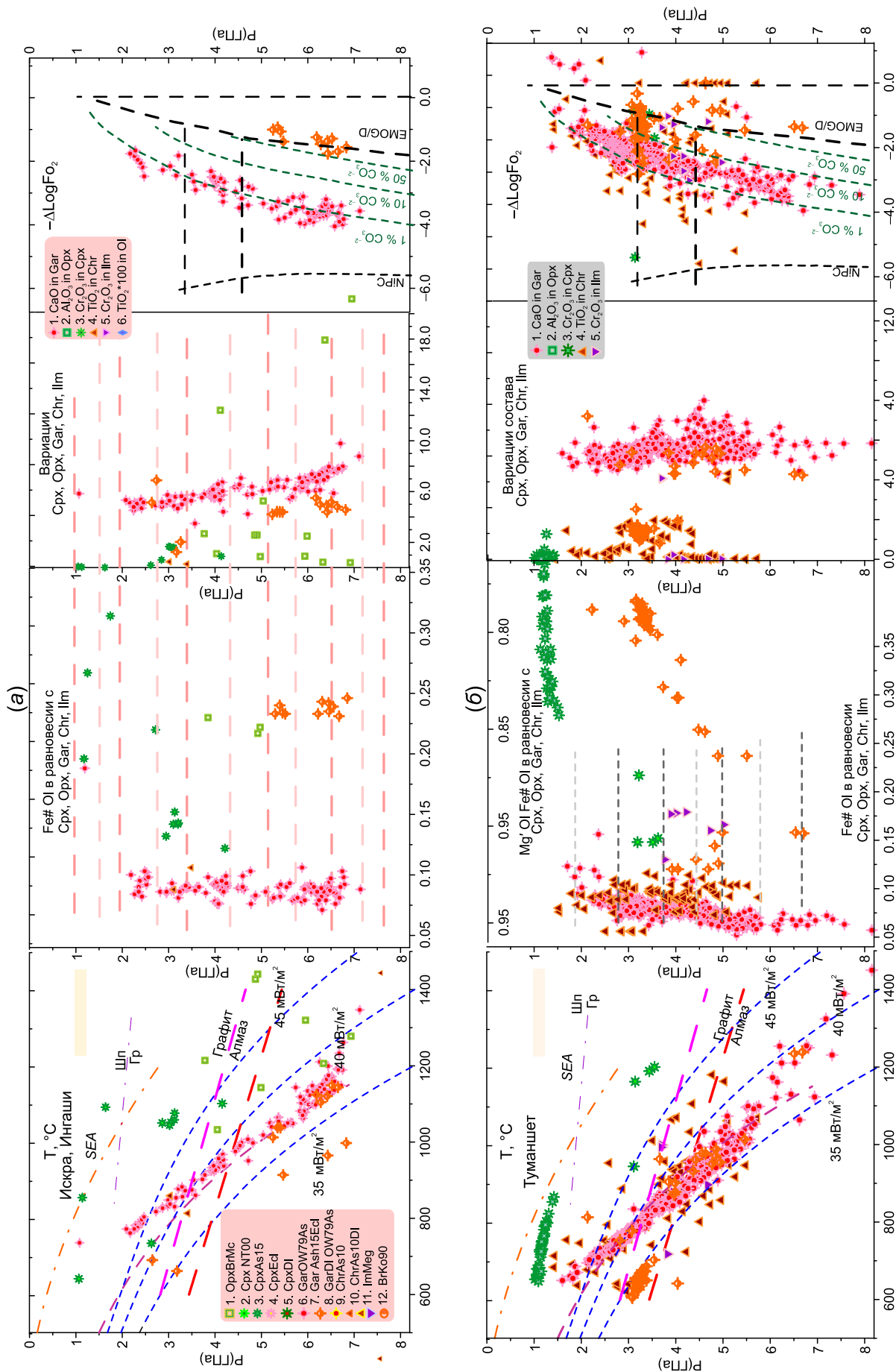


Рис. 10. PXF₀₂ диаграмма для минералов из лампроитовой дайки Искра (a) и шлиховых минералов р. Туманшет (б).

Fig. 10. PXF₀₂ diagram for minerals from the Iskra lamproite dyke (a) and placer minerals of the Tumanшет river (б).

[Ashchepkov et al., 2013a]. По пиропам установлен разрез до 6.0 ГПа с небольшим ростом Fe#, что совпадает с определениями по пиропу. Эклогитовые включения (данные Е.И. Николенко) относятся к нижней части разреза (приложение 9, б).

8. ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МИНЕРАЛОВ РАЗЛИЧНЫХ МАНТИЙНЫХ ТЕРРЕЙНОВ

Перидотитовые минералы Сибирской платформы обладают очень широким спектром составов по сравнению с африканскими, северо-американскими и другими кратонами [Boyd, Nixon, 1978; Dawson, 1980; Grégoire et al., 2002, 2003; Lazarov et al., 2012; Griffin et al., 1999a, 1999b, 1999c; Stachel et al., 2004].

Вариации составов TRE-гранатов дополняют характеристики мантийных колонн. Гранаты часто имеют пики Pb, U, которые более выражены у гранатов с S-образными распределениями редкоземельных элементов (REE), характерные для пород истощенного типа, иногда с обогащением легкими (LREE) и некогерентными элементами в целом, и часто с минимумами высокозарядных элементов (HFSE), что отражает характеристики пород, сформированных в надсубдукционной обстановке [Manning, 2004]. В то же время протокимберлитовый метасоматоз приводит к обогащению высокозарядными элементами, часто U, Th, что считается признаком взаимодействия с карбонатитовыми расплавами (рис. 11).

Перидотитовые гранаты из кимберлитов Далдынского поля часто имеют распределения S-типа (трубки Удачная и Зарница), что особенно характерно для больших трубок, которые в основании колонны содержат глубокоистощенный мантийный субстрат. Гранаты тр. Удачной разнообразны по конфигурации REE, иногда довольно сложной, для многих характерны пики U, иногда повышенный уровень некогерентных элементов.

Гранаты алакитских трубок различаются по уровню тяжелых REE (HREE) – пиропы из трубок Сытаканской и Комсомольской часто имеют S-спектры и обладают более высокими концентрациями литофильных элементов – у них глубже минимумы высокозарядных элементов. Для гранатов тр. Айхал типичны небольшие пики Ce и часто повышенные концентрации несовместимых редких элементов (TRE), глубокие минимумы Zr, которые лучше проявлены в наиболее истощенных разностях из тр. Комсомольской.

У гранатов Мирнинского поля из тр. Мир можно отметить обогащение LREE, тогда как среди пиропов тр. Интернациональной лишь редкие зерна имеют спектры с резко приподнятыми LREE и минимумы HREE. Гранаты из этих трубок не истоще-

ны, нет отчетливых минимумов высокозарядных. Уровень несовместимых элементов в правой части спайдер-диаграммы почти на уровне лантаноидов. Это свидетельствует о существенном обогащении мантийного субстрата участием флюидов и, вероятно, материала зрелой коры. REE спектры гранатов из тр. Интернациональной более разнообразны, для них характерны пики по Th, Pb.

Для Харамайского поля характерны резко различающиеся по наклону и конфигурации спектры пироксенитового, гарцбургитового и лерцолитового типа, пики U и повышенные содержания Rb, Cs.

Верхнемунские трубки содержат резко различающиеся по TRE пиропы. Гранаты с S-образными спектрами имеют высокий уровень некогерентных элементов. Округлые спектры, типичные для гранатов лерцолитового ряда, имеют пики по U, свидетельствующие о том, что они промывались субдукционными флюидами.

Накынские пиропы имеют Ce-минимумы и округлые или вогнутые от Gd до Tm спектры REE с высоким уровнем HREE. Отмечаются пики U, Pb, высокий уровень Rb; вероятно, он связан с влиянием флюидов с участием континентального субдукционного материала. Отмечается повышенный уровень Th, U для обогащенных REE разностей.

Проанализированные пиропы Прианабарья обладают либо низкими концентрациями с контрастными спектрами, либо, наоборот, обогащенными характеристиками со сглаженными спектрами. Для большинства гранатов из шлихов по р. Уджа типичны уплощенные REE-спектры, иногда с перегибами, и повышенный уровень Ta, Nb, U, Th, связанный с протокимберлитовым метасоматозом.

Для гранатов из трубки Ленинград (Западно-Укукитское поле) установлены спектры двух типов – округлые лерцолитовые и S-типа дунитовые. Для первых характерно умеренное обогащение всеми высокозарядными компонентами. Для дунитовых пиропов уровень Zr-Hf существенно ниже.

Гранаты из Карнийского коллектора имеют высокие пики U, часто Rb и спектры с перегибом в LREE части, что обычно связано с влиянием флюидов, вероятно, взаимодействовавшим с континентальными осадками.

Для пиропов Туманшетского ареала характерны наклонные спектры с горбиком от Sm до Pr. На спайдер-диаграмме проявлены пики U ниже, чем у Th, а другие высокозарядные элементы почти недифференцированные, наряду с повышенными Rb, Cs.

Можно отметить, что наличие океанического протолита характерно для зон сочленения и гранулит-ортогнейсовых террейнов. Для древних протоплатформ характерен менее истощенный протолит в целом. Однако щиты, как, например, Анабар-

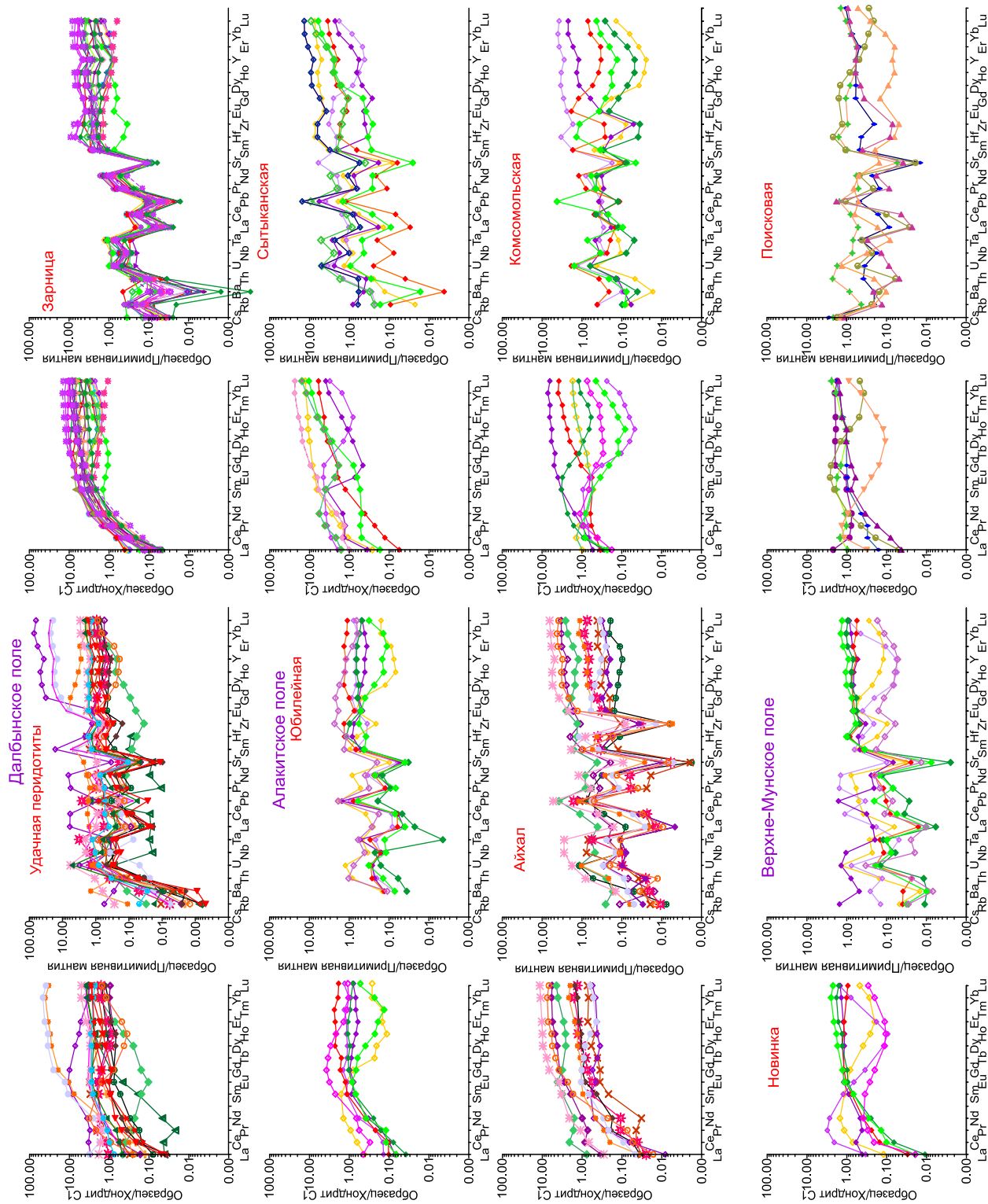


Рис. 11. Нормированные распределения редкоземельных элементов (REE) [Evensen et al., 1978] и мультикомпонентные спайдер-диаграммы [McDonough, Sun, 1995] для гранатов из различных полей Якутской кимберлитовой провинции.

Fig. 11. Normalized distribution of rare earth elements (REE) [Evensen et al., 1978] and multicomponent spider diagrams [McDonough, Sun, 1995] for garnets from various fields of the Yakutsk kimberlite province.

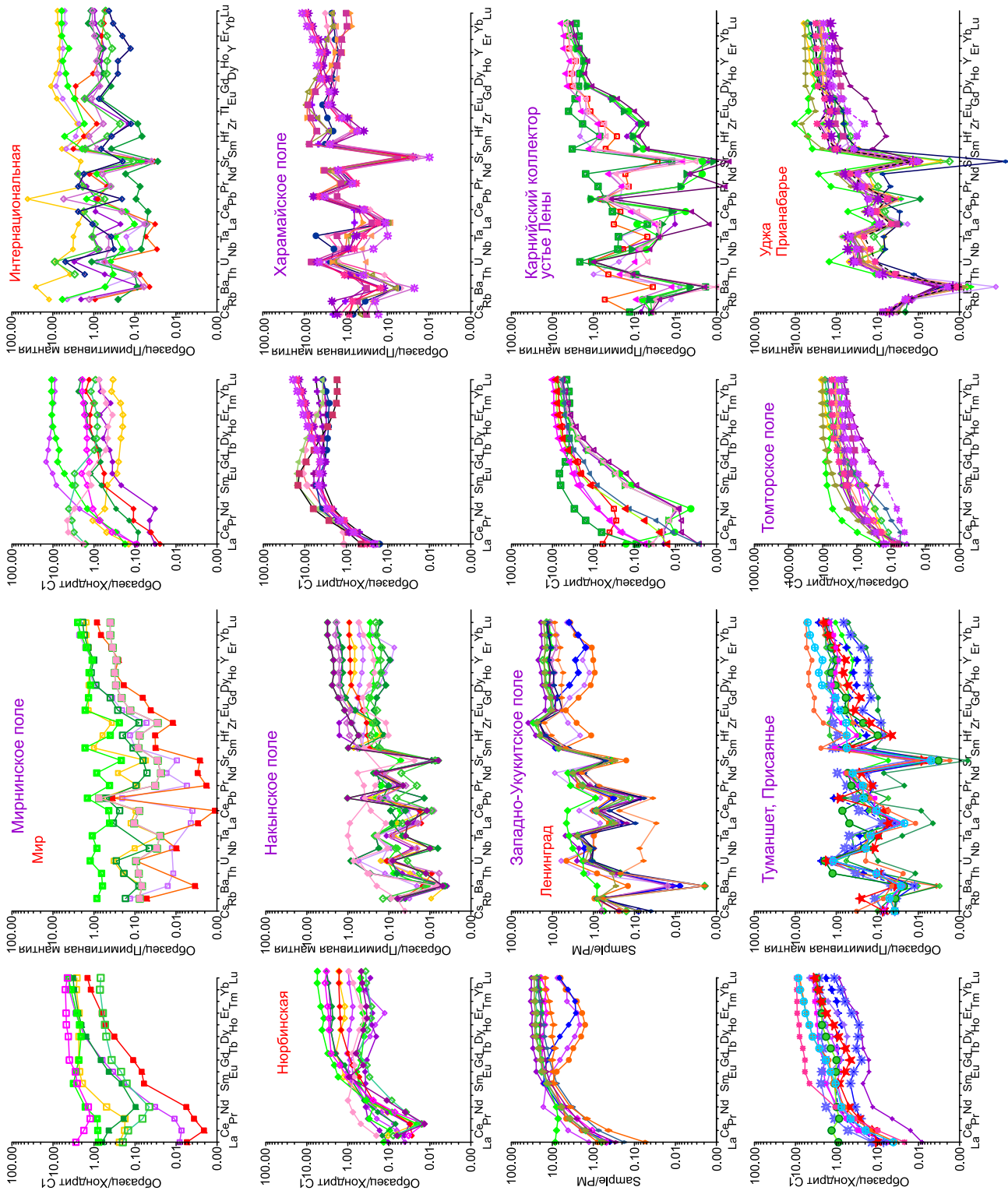


Рис. 11 (окончание).

Fig. 11 (end).

ский, могут также содержать ультраистощенный материал в мантийной литосфере. Для более обоснованных выводов необходимо детальное исследование геохимии с учетом положения отдельных типов пород и минералов в разрезе литосферной мантии.

9. МАНТИЙНЫЕ РАЗРЕЗЫ

Используя реконструированные мантийные колонны под отдельными трубками как природные скважины, мы построили мантийные разрезы. Уровни, подверженные регенерации, с новообразованными клинопироксенами в нижней части мантийных разрезов (МР) обогащены СаО и Fe# [Ashchepkov et al., 2014, 2017a, 2017b]. Наличие суб-Са гранатов маркирует уровни истощения.

Наиболее подробный разрез через Далдыно-Алакитский регион остался почти неизменным по сравнению с вариантом, опубликованным ранее [Ashchepkov et al., 2014] (приложение 10). Темные (синие) участки соответствуют Птм и Срх мегакристаллов, сформированных протокимберлитовыми расплавами. Судя по темной области на уровне 4 ГПа, уровень метасоматоза в восточной части в районе тр. Зарница растет по сравнению с западной возле тр. Удачной. Группировка мелких трубок в группе Зарница, вероятно, отражает высокую концентрацию расплавов в проницаемой зоне. По меньшей мере три единицы выделяются в верхней части МР на диаграмме P-fO₂, что сопоставимо с тремя пиками на гистограммах для ильменитов в Далдынском районе [Kostrovitsky et al., 2006]. В нижней части СКЛМ двойная зона истощения по гранатам указывает на наклон структуры к западу. Область повышенной железистости вблизи 4.0 ГПа относится к пироксенитовому слою. Уровень метасоматоза, судя по ильменитам на отрезке от тр. Зарница до тр. Дальней [Rodionov et al., 1984; Ashchepkov et al., 2017c], становится глубже, а потом снова поднимается возле тр. Загадочной по данным [Nimis et al., 2009]. В южной части Далдынского поля разрезы менее контрастны из-за редкости гранатов из дунитов с низкими значениями Fe#.

МР Алакитского поля можно разделить на две части по линии, соединяющей Юбилейную и Айхал (приложение 10). Эта область соответствует обилию истощенных алмазоносных дунитов. В южной части Алакитского поля МР имеет более контрастную слоистую структуру, особенно вблизи тр. Краснопресненской. В северной части Алакитского поля, вокруг тр. Сытыканской, структура разреза схожа с северной частью Далдынского поля и также имеет три основных единицы в нижней части разреза, что отмечено по ильменитовым кластерам,

которые, вероятно, свидетельствуют о расположении протокимберлитовых очагов. Пироксенитовый слой в северной части Алакитского поля, судя по ксенолитам из трубки Сытыканской [Spetsius, Serenko, 1990; Ashchepkov et al., 2014], состоит из эклогитов [Pernet-Fisher et al., 2014] и гибридных Cr-диопсидовых пироксенитов [Ashchepkov et al., 2015], широко распространенных также в кимберлитах тр. Комсомольской. Доля пироксенитов в средней части Алакитского поля гораздо меньше, и пироксенитовый слой [Pokhilenko et al., 1998] не так выражен. Корни магматических систем должны также быть глубже в этой части поля.

10. ГЛОБАЛЬНЫЕ МАНТИЙНЫЕ ТРАНСЕКТЫ

Трансект ЮЮЗ-ССВ от Малоботуобинского до Толуопского поля пересекает пять террейнов. ЮЮЗ-ССВ трансект построен на основе минеральных концентратов из девонских кимберлитов (~40000 анализов) с более плотной сеткой по сравнению с предыдущей работой [Griffin et al., 1999a] (рис. 12). На отрезке от Накынского до Малоботуобинского поля есть только одна промежуточная точка – трубка Маркока. Протяженный профиль мантии от Малоботуобинского до Верхнемунского Восточно- и Западно-Укукитских и далее Огонер-Юряхского и Толуопского полей (рис. 12) представлен доменами различных тектонических мантийных террейнов. Выделяются 6–7 из крупных единиц, характерных для мантии Сибирского кратона, заметных по флуктуациям fO₂. В средней части трансекта ниже границы 4.0–3.5 ГПа расположен пироксенитовый слой, что определено в большинстве районов по повышению Fe# и fO₂ и СаО в гранатах. Данные более представительны для более продуктивных полей – Далдынского, Алакитского и Малоботуобинского, изученность которых позволяет выявить индивидуальные особенности и сложную структуру мантийной литосферы под каждым полем.

Трансект ЮЗ-СВ на севере Сибирского кратона. Трансект от Харамайского поля простирается [Ashchepkov et al., 2016] через Орто-Ыаргинское, Куойкское поля [Ovchinnikov, 1990; Taylor et al., 2003] и устье р. Лены [Grakhanov et al., 2009], так же как профиль через Анабарский щит до побережья моря Лаптевых (рис. 13), который пересекает Ары-Мастахское, Старо-Реченское, Дюкенское, Куранахское и Огонер-Юряхское, а также Куойское и Толуопское поля, где алмазоносные россыпи карнийского возраста обнаружены вдоль побережья моря Лаптевых [Sobolev et al., 2013; Grakhanov et al., 2009].

Под Анабарским щитом СКЛМ делится как минимум на три больших интервала, причем нижняя

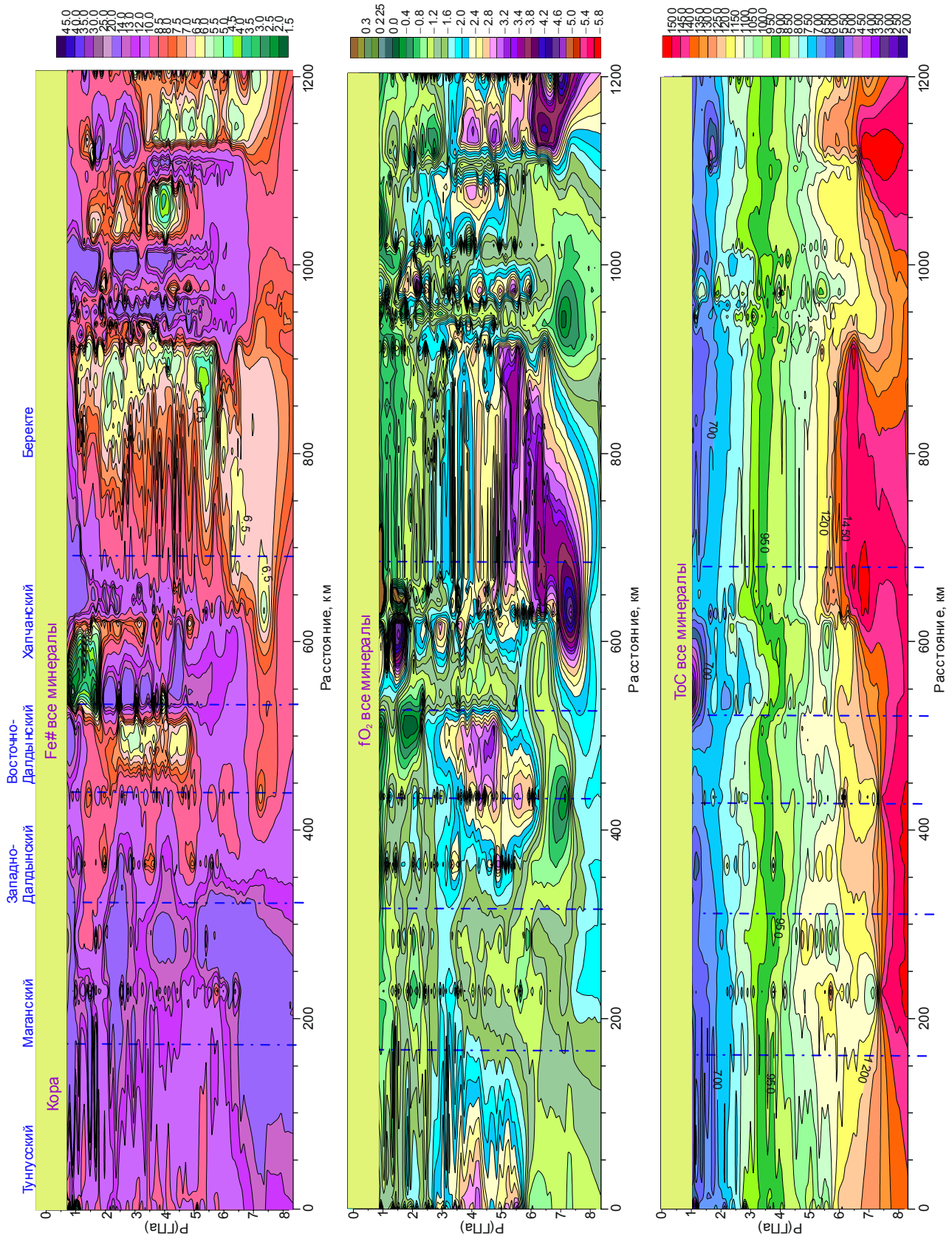


Рис. 12. Мантийный трансект Ю33-СВВ на севере кратона от Харамайского поля до устья р. Лены.

Fig. 12. The SWW-NEE mantle transect for the northern part of the craton from the Kharamai field to the Lena river mouth.

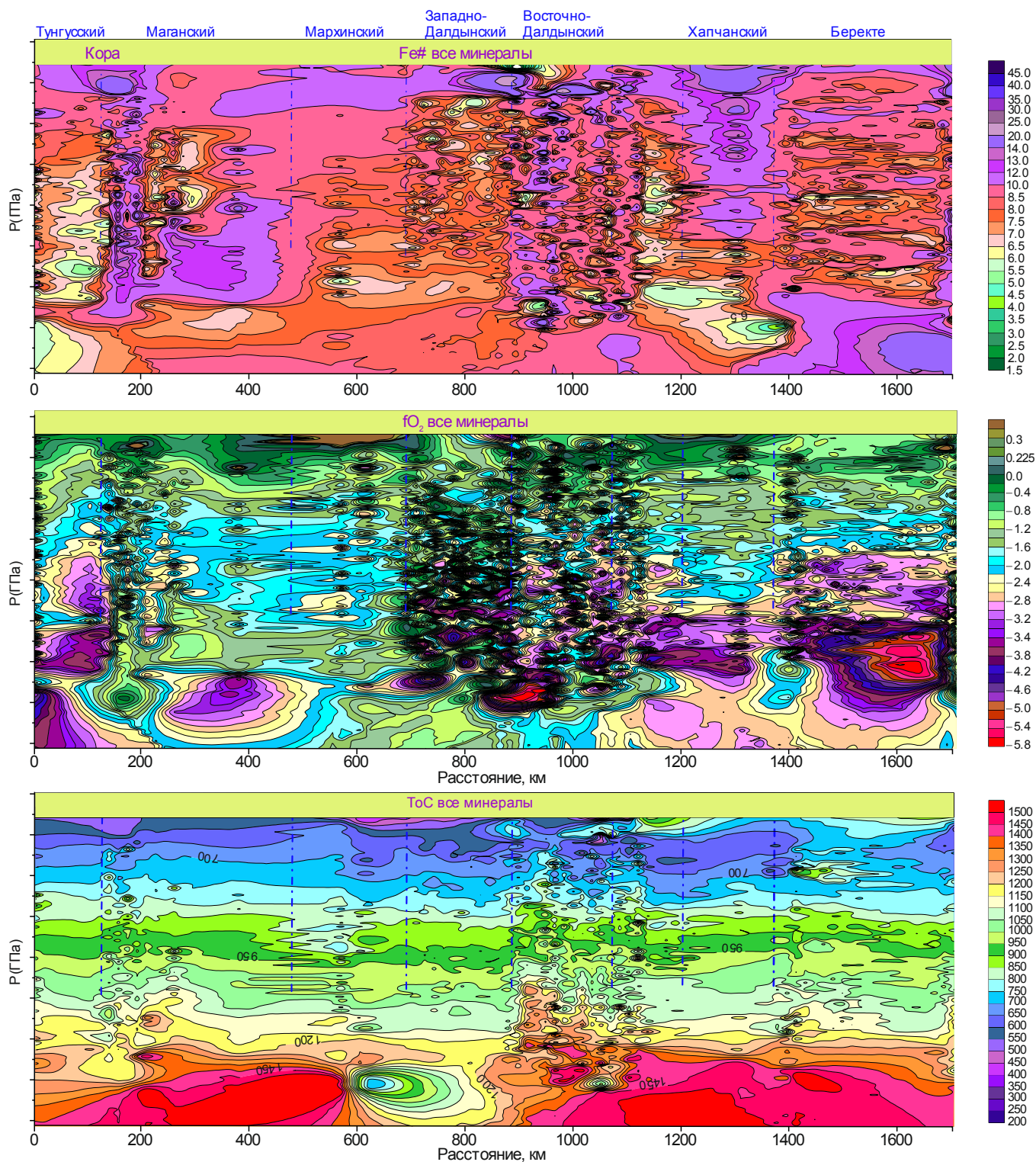


Рис. 13. Мантийный трансект ЮЮЗ-ССВ от Мало-Ботуобинского поля до Приленья.

Fig. 13. The SSW-NNE mantle transect from the Malo-Botuoba field to the Lena region.

пластина имеет наклон на юго-запад, в том же направлении, что и в Далдынском поле. Структура разрезов мантии Западно-Анабарского, Куранахского, Дюкенского и Орто-Ыаргинского полей делится на четыре крупных единицы (рис. 13) и отличается от слоистости под Ары-Мастахским и

Старореченским полями, которые состоят из трех крупных единиц. Гораздо более сложная слоистость мантии Куойкского поля подчеркивается на P-f₀₂ диаграммах за счет маркировки проницаемых зон с метасоматическим ильменитом. В северо-восточной части мантийного разреза террейна Биректе

те установлена уплощенная и простая структура с низкими значениями f_{O_2} в северной части террейна, что благоприятно для алмазоносности.

Трансект через южную часть Сибирского кратона (С33-ЮЮВ). В окраинных районах профиль построен на основе данных о гранатах из россыпей Тычан и Тырадак, на юге – о пиропсах Туманшетского и Муро-Ковинского полей из аллювиальных россыпей, содержащих алмазы на ЮЗ [Egorov et al., 2006] Накынского поля [Spetsius, 2004; Spetsius et al., 2008], и кимберлите из поля Манчары [Smelov et al., 2010].

В пределах юго-восточных полей Тунгусский террейн (рис. 13) обнаруживает в каждой области признаки плоской слоистой структуры и умеренно восстановленные условия. Все мантийные домены на этом профиле содержат преимущественно перидотитовые минералы с низким количеством ильменитов и, вероятно, представляют типичные разрезы континентальной мантии. В восточной части в Алданском блоке также реконструирована многоуровневая слоистая структура с отсутствием глубоко истощенных и восстановленных ассоциаций [Ashchepkov et al., 2013a].

11. ДИСКУССИЯ

11.1. СОПОСТАВЛЕНИЕ С ГЕОФИЗИЧЕСКИМИ ДАННЫМИ

Наши данные и расчеты показывают, что в большинстве случаев толщина литосферы в девонское время была 250–270 км [Ashchepkov et al., 2010, 2013a], что подтверждается геофизическими моделями [Suvorov et al., 1994; Pavlenkova, 2011; Kuskov et al., 2014], а также находками высокохромистых (до 16 % Cr_2O_3) гранатов. Доказательств большой мощности литосферы в северной части Сибирского кратона, как полагает И.Ю. Кулаков [Koulakov, Bushenkova, 2010], не очень много. Разрез, построенный по минералам Карнийского коллектора, дает мощность литосферы до 8 ГПа (270 км). Более низкие значения мощности СКЛМ локально установлены под Куойкским полем, хотя и здесь в основном СКЛМ до 250 км.

Геофизические модели относятся к настоящему времени и не отражают разогрев, связанный с девонским плюмом. Большинство геофизических моделей, как сейсмические [Pavlenkova, 2011], так и использующие термодинамический подход, основанный на методе минимизации свободной энергии Гиббса [Kuskov et al., 2011, 2014], показывают сходство структуры литосферной мантии. Скорости сейсмических волн постепенно увеличиваются с глубиной, в восточной части и возле бассейна р. Вилюй они фиксируют поднятие Мохо [Suvorov et

al., 2006, 2013]. Глубина локального снижения скорости зоны варьируется от 260 км на западе до 220 км в восточной части кратона.

Модель мантии, построенная с помощью сейсмической томографии [McKenzie, Priestley, 2008], показывает, что мощность литосферы под центральной частью Сибирского кратона составляет 250 км и чуть меньше под Прианабарьем.

Тепловая структура литосферной мантии на сейсмических профилях, выделенных в работах О.Л. Кускова и др. [Kuskov et al., 2014], в целом соответствует структурам, определенным в нашей работе, но холоднее на 50~75 °С, вероятно, за счет охлаждения со времени верхнедевонского плюма.

11.2. ВАРИАЦИИ СТРУКТУРЫ И СОСТАВА МАНТИЙНОЙ ЛИТОСФЕРЫ РАЗНЫХ ТЕРРЕЙНОВ

Выделенные тектонические террейны в пределах центральной и северной части Сибирского кратона имеют субмеридиональное простираие, как и кимберлитовые поля. Архейские гранит-зеленокаменные и тоналит трондьемитовые террейны: Тунгусский, Мархинский, Западно-Алданский и Шарыжалгайский, имеющие возраст ~3.8–2.5 млрд лет [Gladkochub et al., 2019], включают в себя сравнительно немного кимберлитовых полей. Восточно-Якутский протократон Биректе с возрастом ~2.7–2.1 млрд лет содержит большое количество кимберлитов, часто неалмазоносных, но россыпи предполагают богатые источники на северо-востоке кратона [Grakhanov et al., 2009]. В мантии под гранит-зеленокаменным террейном Биректе (Куойкское, Молодинские, Орто-Ыаргинское, Толуопское, Нижнеленское и другие поля) содержатся умеренно истощенные перидотиты наряду с эклогитами гибридного типа [Taylor et al., 2003] около границы 4.0 ГПа. Эклогиты должны были быть переплавлены на этом уровне еще в позднем архее в условиях высоких температур [van Hunen, van den Berg, 2008; Gerya, 2014] с образованием пироксенитов. Это может быть одной из причин разделения литосферной мантии на две части на уровне 3.5–4.0 ГПа и формирования пироксенитовой линзы, хотя последние события отвечают протерозойской активизации [Ionov et al., 2015]. Обильный метасоматоз не способствует алмазоносности. Для Толуопского поля характерен мощный литосферный киль и резкое деление на верхнюю и нижнюю части СКЛМ, как для мантии Приазовья. Для Мархинского гранит-зеленокаменного террейна установлен специфический состав СКЛМ. В мантии под Накынским полем перидотитовый разрез содержит обильные прослои различных эклогитов и гранатсодержащих слюдистых пород (метапелиты в протолите) [Spetsius, 2004], а также перидоти-

товых ксенолитов и минералов [Ashchepkov et al., 2014a; Tolstov et al., 2009]. Гранулитогнейсовый характер террейна Марха имеет специфику разрезов и состава мантийных минералов. Разрезы мантии Накынского поля из Мархинского террейна отличаются довольно примитивным неистощенным составом, так же существенно метасоматизированным, и присутствием разнообразных элогитов.

Мантия под Маганским гранулитогнейсовым террейном под тр. Мир сложена неистощенными [Roden et al., 2006] и метасоматически измененными перидотитами в верхней и средней части разреза [Ashchepkov et al., 2010, 2014a]. Истощение начинается с 5.0 ГПа под трубкой Мир, а под тр. Интернациональной значительное количество элогитов [Beard et al., 1996] и гибридных перидотитов установлено в нижней части разреза, начиная от основания литосферы [Ashchepkov et al., 2004], что является перспективным фактором для алмазоносных работ. Общее пониженное содержание Fe# и других базальтовых компонентов (CaO, Na₂O, TiO₂) характерно для нижних частей СКЛМ Маганского террейна (Мирнинский район и поле Моркока), однако в северной части в районе Харамайского и Ары-Мастахского полей это не подтверждается; вероятно, мантийный террейн представляет собой коллаж из более мелких плит.

Раннепротерозойский Далдынский гранулитогнейсовый террейн включает наиболее многочисленные и продуктивные кимберлиты. Согласно схеме, кимберлиты расположены в основном в пределах палеопротерозойской аккреционной зоны [Rosen et al., 2006], которая имеет возраст ~1.8 или 1.9 млрд лет [Smelov et al., 2012]. Установлены соответствующие пики изохронных Re/Os возрастов для мантийных ксенолитов силикатных минералов [Pearson et al., 1995; 2002; Spetsius et al., 2002; Ionov et al., 2015, 2018] и сульфидов в пиропсах [Malkovets et al., 2007] и цирконов из гнейсов [Rosen et al., 2006]. Цирконы [Korshkova et al., 2009] нижнекорковых ксенолитов фиксируют события магматического подслаивания базитовых интрузий при плюмовом магматизме (underplating). Далдынский аккреционный район [Rosen et al., 2006] представляет собой структуру, пронизываемую для плюмовых расплавов.

Под Западно-Далдынским террейном в мантии линзы дунитов локализованы вблизи с тр. Айхал и Юбилейной. Элогиты распространены в трубках Комсомольской [Pernet-Fisher et al., 2014] и Сытыканской [Spetsius, Serenko, 1990], где перидотиты так же более богаты пироксенами. В Восточно-Далдынском террейне слоистый разрез состоит из гарцбургитов, близких к абиссальным перидотитам субдукционного типа по составу [Ionov et al., 2010], с линзами алмазоносных дунитов и элоги-

тов [Jagoutz et al., 1994]. Элогиты в этом террейне относятся часто к Mg-типу Комсомольской [Pernet-Fisher et al., 2014], который связывают с тоналит-трондьемитовыми реститами (кумулятами). СКЛМ Верхнемунского поля содержит суб-кальциевые гранаты (с 3 ГПа) и обнаруживает тенденцию увеличения количества неистощенных перидотитов с пироксенами с глубиной. Общая черта всех силикатных минералов в этом поле – достаточно высокая степень окисления, связанная с метасоматозом.

Общий наклон слоев мантии на восток для Далдын-Алакитского района совпадает с установленным на геофизических профилях мантии [Koulakov, Bushenkova, 2010]. Кимберлитовые поля расположены близко к краям тектонических террейнов. Мы не можем определить углы наклона границы террейнов, но можем охарактеризовать в целом состав и некоторые особенности структуры таких мантийных террейнов.

В пределах коллизионного террейна Хапчан сосредоточены поля, в которых доля элогитового материала существенна. В богатейших россыпях Эбеляха в среднем течении р. Анабар элогитовые включения в алмазах резко преобладают, так же как и в районе р. Уджа [Shatsky et al., 2015]. Большое количество элогитовых гранатов характерно и для Куранахского поля и установлено в Восточно- и Западно-Укукитском, и Огонер-Юряхском полях. В западной части под Хапчанским террейном (аккреционный комплекс) мантия СКЛМ крайне истощена Al и Ca, но дуниты более железисты, чем марианские перидотиты [Parkinson, Pearce, 1998]. Мощная элогит-пироксенитовая линза, вероятно, определяет перспективы алмазоносности.

Анабарский щит, судя по ксенолитам, – это обедненный FeO, CaO, Al₂O₃ перидотитовый домен мантии по сравнению с большинством других северных полей. Разрезы СКЛМ под отдельными полями характеризуются схожей слоистой структурой [Ashchepkov et al., 2010, 2014], но имеются определенные отличия в слоистости мантии Алакитского, Далдынского, Верхнемунского районов и гораздо более существенные – под Мало-Ботуобинским полем [Ashchepkov et al., 2014].

Сравнение профилей показывает, что гранулитогнейсовые террейны имеют более тонкослоистую структуру литосферной мантии в целом. Детальный разрез Далдынского террейна обнаруживает чередование довольно разнородных слоев мантии и складчатую структуру мантийных разрезов. Геохимические данные свидетельствуют о том, что в пределах гранулитогнейсовых террейнов больше вариаций REE и TRE спектров и ультраистощенных составов, а также более проявлены над-субдукционные характеристики с появлением пи-

ков U, Pb, Sr [Deschamps et al., 2013]. Для существенно сиалических террейнов влияние субдцированных континентальных осадков также проявлено.

Предполагается, что Маганский, Далдынский, а также Хапчанский террейны можно разделить на несколько единиц по простиранию, а Анабарский щит выделить как отдельную структуру в мантии, которая сама делится на отдельные районы [Ashchepkov et al., 2016]. Для детального разделения нужны не только масштабные микрозондово-термобарометрические работы, но и геохимическое исследование с массовым определением возраста.

11.3. Слоистость литосферы

Формирование слоистой литосферы большинство исследователей считают результатом субдукции [Pearson, 1999; Lee et al., 2011; Santosh et al., 2009; Manikyamba, Kerrich, 2012] за счет пластин, состоящих из перидотитовых и базальтовых горизонтов [Nicolas, Dupuy, 1984], но в раннем архее тепловой режим [Perchuk et al., 2018] не соответствовал субдукции [Gerya, 2014], и только при появлении воды и остывании мантии сформировались глубокие корни кратонов [Ernst, 2017].

Ультраистощенные ядра кратонов, как Зимбабве [Smith et al., 2009], Анабарский щит, могли быть результатом высокого плавления мантии ранних диапиров, сопровождавших плюмы, или скучивания и аккумуляции ранних существенно оливиновых пластин древней мантии. Представляется неверным проследить мантийный террейн с юга на север через Анабарский щит. Сейсмические разрезы свидетельствуют повсеместно о пологом погружении слоистости [Pavlenkova, 2011], хотя иногда есть признаки и модели так называемой «поленницы слэбов» [Griffin et al., 1999a] с крутым наклоном [Snyder, 2008], что присуще в основном шовным зонам. Погружающиеся кимберлиты, которые идут по эклогитовой части крутого слэба, существенно переплавляемого на глубине, будут содержать разнообразные алмандиновые гранаты.

В процессе погружения эклогиты и перидотиты могли плавиться только во времена суперплюмов [Condie, 2004], когда породы погружающейся плиты плавилась, приобретая плавучесть [Snyder et al., 2017]. Для перидотитов из тр. Удачной линии плавления, вычисленные по экспериментальным данным К. Герцберга [Herzberg, 2004], в основном лежат вблизи 5–6 ГПа [Ionov et al., 2010, 2015; Bascou et al., 2011].

Непрерывные тренды составов пиропов из кимберлитов с расщеплением по CaO с увеличением глубины, как это было определено для Сибирского кратона и многих регионов Африки [O'Reilly et al., 2009; Griffin et al., 2003], свидетельствуют о процес-

сах плавления и истощения при формировании кратона. В большинстве случаев количество дунитов и пироксенитов одновременно увеличивается в основании литосферы.

В классических работах по мантийной петрологии все геотермы считаются кондуктивными [Boyd, 1973], что, возможно, не соответствует действительности. Геотермы, построенные по пироповым гранатам с использованием пары геотермобарометров [O'Neill et al., 1988, Ashchepkov et al., 2017a, 2017b, 2017c] и вычисленные по минеральной термобарометрии наиболее надежными методами [Nimis, Taylor, 2000; McGregor, 1974; Brey, Köhler, 1990; Nickel, Green, 1985; Ashchepkov et al., 2010, 2017a], практически совпадают, но они имеют субадиабатический наклон и пересекают кондуктивные геотермы [Pollock, Chapman, 1977], благодаря тому, что в период суперплюмов происходила промывка мантийных колонн расплавами, насыщенными летучими, которые понижают температуры плавления [Wyllie, Ryabchikov, 2000], и поэтому после суперплюмов тренды P-Fe# для гранатов сглаживаются и часто меняют наклон. Одновременно волны просачивания расплавов часто формируют вторичную слоистость, регулирующую фазовыми равновесиями и температурным режимом, а также проницаемостью, что даже ставило под сомнение первичный субдукционный генезис кия кратонов [Griffin, O'Reilly, 2007]. Фактически гранатовые геотермы скользят вдоль минимума на солидусе перидотита в присутствии CO₂-H₂O [Foley et al., 2009; Foley, Pintér, 2018]. Колебания Mg' или Fe# для оливинов в разрезе служат для определения слоистости в основном для трубок, корни под которыми не подверглись существенно метасоматозу, поскольку непрерывное просачивание в поздние эпохи суперплюмов приводит к сглаживанию трендов P-Fe# гранатов.

Гранатовые геотермы по эклогитовым гранатам с использованием термометра [Krogh, 1988] более низкотемпературны и приближаются к кондуктивным. Даже они часто имеют крутой наклон (рис. 14). Для мантийной колонны под тр. Удачной установлено несколько типов геотерм.

Примеры выведенной на поверхность литосферной мантии Шарыжалгайского террейна [Gornova et al., 2013] показывают, что даже на уровне шпинелевой фации мантия была существенно метасоматизирована.

11.4. Эволюция мантийных разрезов во времени

Нижняя граница в раннем архее регулировалась уровнем флотации оливина в расплаве ~8.0 ГПа [Agee, 1998]. Более поздние суперплюмы оставались на границе 6 ГПа – минимум предела прочности оливина в присутствии расплава [Karato, 2000]. В

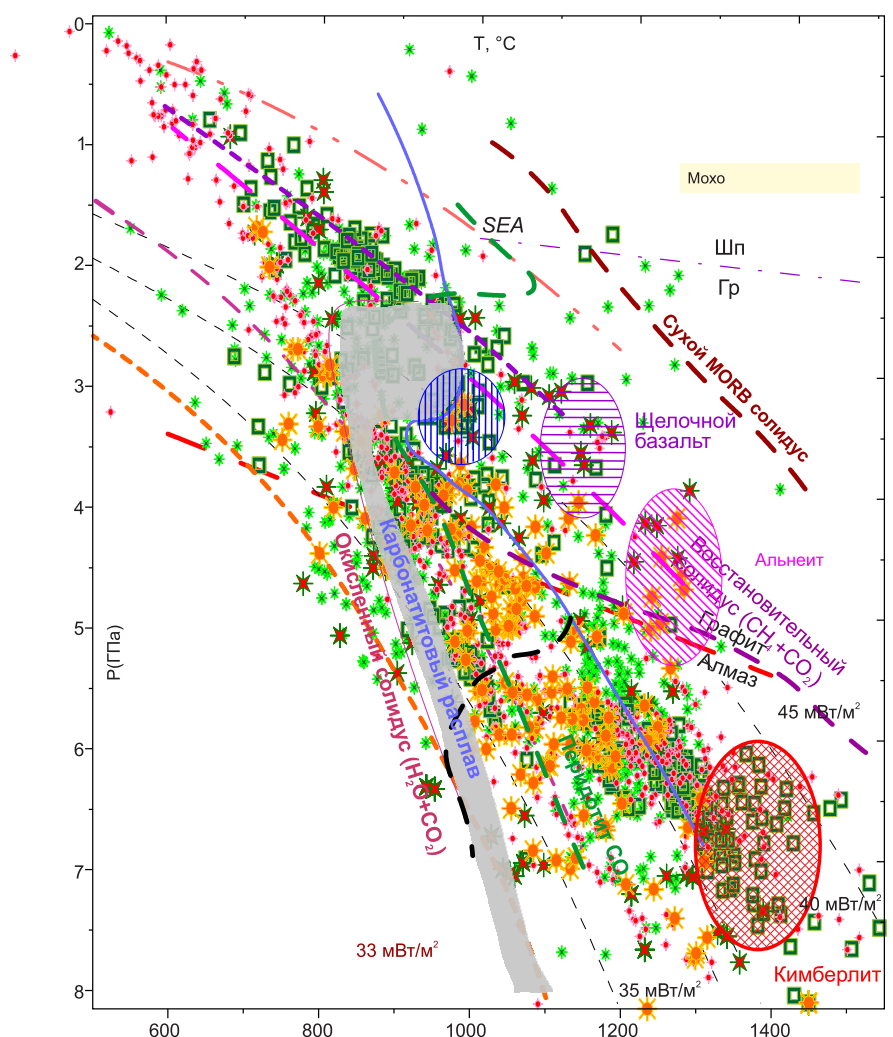


Рис. 14. P-T-диаграмма для мантийных включений из трубки Удачной. Условные обозначения см. рис. 2. Заштрихованы области локализации в мантии расплавов различного типа. Линии плавления перидотита в присутствии летучих согласно [Foley, Pintér, 2018].

Fig. 14. PT diagram for the mantle inclusions of the Udachnaya pipe. See Fig. 2 for the legend. Shaded areas mark the locations of melts varying in types in the mantle. Peridotite melting lines in the presence of volatiles (after [Foley, Pintér, 2018]).

условиях стресса этот уровень повышается [Mei et al., 2002]. При наличии оксиплавления и карбонатного расплава граница смещалась выше [Tappe et al., 2006].

Сравнение реконструкций разрезов мантии, построенных по ксенокристам кимберлитов позднего девона, раннего триаса и поздней юры, показывает эволюцию мантийных разрезов во времени.

Для девонского периода характерны слоистые мощные литосферные кили и разогрев в основании литосферы на уровне 6.5–7.5 ГПа. В триасовое время подошва литосферы находилась на уровне между 6.0 и 5.5 ГПа, как под Куранахским полем. Для мантийных пород характерны низкохромистые гранаты в перидотитах и пироксениты и перидотиты в основании и средней части разреза, существенный разогрев до уровня ~5.0 ГПа и обильный флогопитовый и Fe-Ti Ilm-метасоматоз. Cr-роговая

обманка и паргаситовые амфиболы характерны для верхней части мантии. В это время в Приангарье широко распространены метасоматические преобразования средних и верхних уровней мантийных разрезов. Многие пироксенитовые ассоциации находятся в верхней части секций мантии, начиная в основном с 4.0 ГПа.

Выводы о деламинации и уменьшении толщины литосферы к северу после пермотриасового суперплюма [Griffin et al., 2005] не подтверждаются [Ashchepkov et al., 2016]. Некоторое снижение толщины и границы астеносферы, вероятно, связано с областями концентрации расплава и их миграцией в верхние горизонты [O'Reilly, Griffin, 2010].

Вполне вероятно, что вне зоны прямого влияния Сибирского пермотриасового суперплюма литосфера осталась такой же мощной, как в центральной части кратона в девонское время.

Толщина литосферной мантии в верхнеюрское время уменьшалась до 180 км, а спорадически до 130 км локально в некоторых зонах, в основном под Куойкским полем [Taylor et al., 2003]. Это могут быть рифтовые структуры, которые были пронизываемы на уровне мантии.

12. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Структуры под Сибирским кратоном весьма разнообразны и сильно меняются между различными террейнами, которые также не очень выдержаны по составу. В архее Тунгусский, Мархинский, Биректинский террейны имели более выдержанную по простиранию структуру СКЛМ, однородную и часто метасоматизированную мантию с присутствием континентальных осадков. Зоны сочленения имеют более тонкослоистую структуру и сложены низкожелезистыми перидотитами по сравнению с СКЛМ под ортогнейсовым коллизионным Далдынским террейном, который состоит из контрастных слоев.

Толщина литосферы сократилась от 270–250 км в верхнедевонское время до 250–220 км в нижнем триасе и до 130–180 км в верхнеюрское время за счет взаимодействия с суперплюмом. Это может быть результатом локального подъема астеносферной линзы.

В пределах Сибирского кратона нет признаков отслоения и деламинации мантийной литосферы под воздействием РТ-плюма.

Существенно дунитовый состав мантии Прианбарья в нижней части разреза (имеющей положительную плавучесть по отношению к пироксенитам и эклогитам), вероятно, связан с высоким положением коры в районе щита.

Концентрированный поток расплавов/флюидов, возможно локально, существенно повлиял на состав мантии, но не изменил полностью ее первичную структуру.

13. БЛАГОДАРНОСТИ

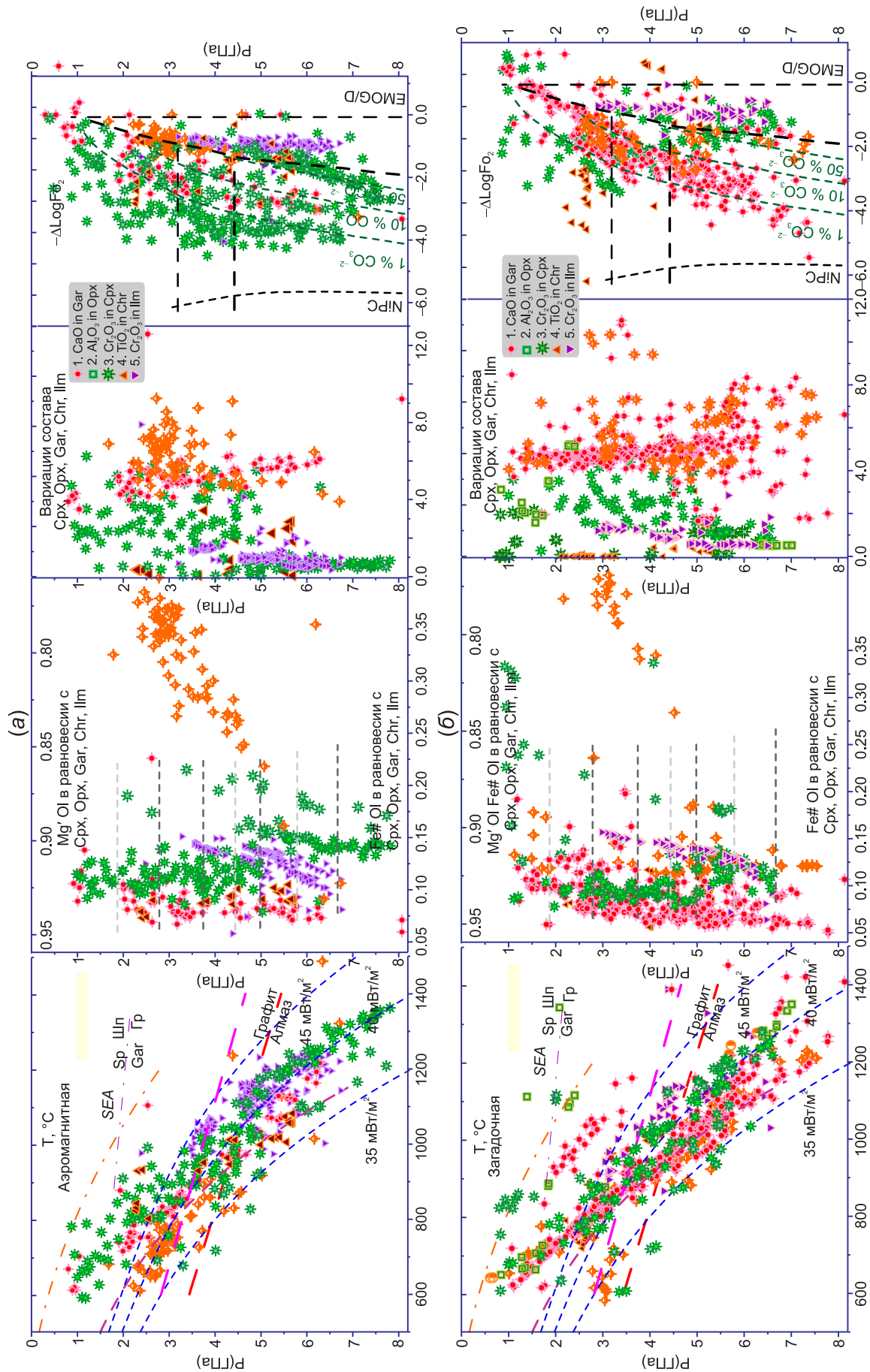
Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 19-05-00788) и по государственному заданию ИГМ СО РАН (г. Новосибирск), а также НИГП АК «Алроса» ПАО (г. Якутск), ИГХ СО РАН (г. Иркутск), ИГАБМ СО РАН (г. Якутск) и ИЗК СО РАН (г. Иркутск). Авторы выражают благодарность всем геологам, которые предоставили материалы для данной работы: В.П. Афанасьеву, Н.В. Владыкину, В.П. Корниловой, Е.И. Николенко, С.А. Прокофьеву, Ю.Б. Стегницкому, а также Г.П. Шмарову, И.В. Маковчуку, Р.Ф. Салихову, М.А. Карпенко и аналитическим службам ИГМ СО РАН и АК АЛРОСА.

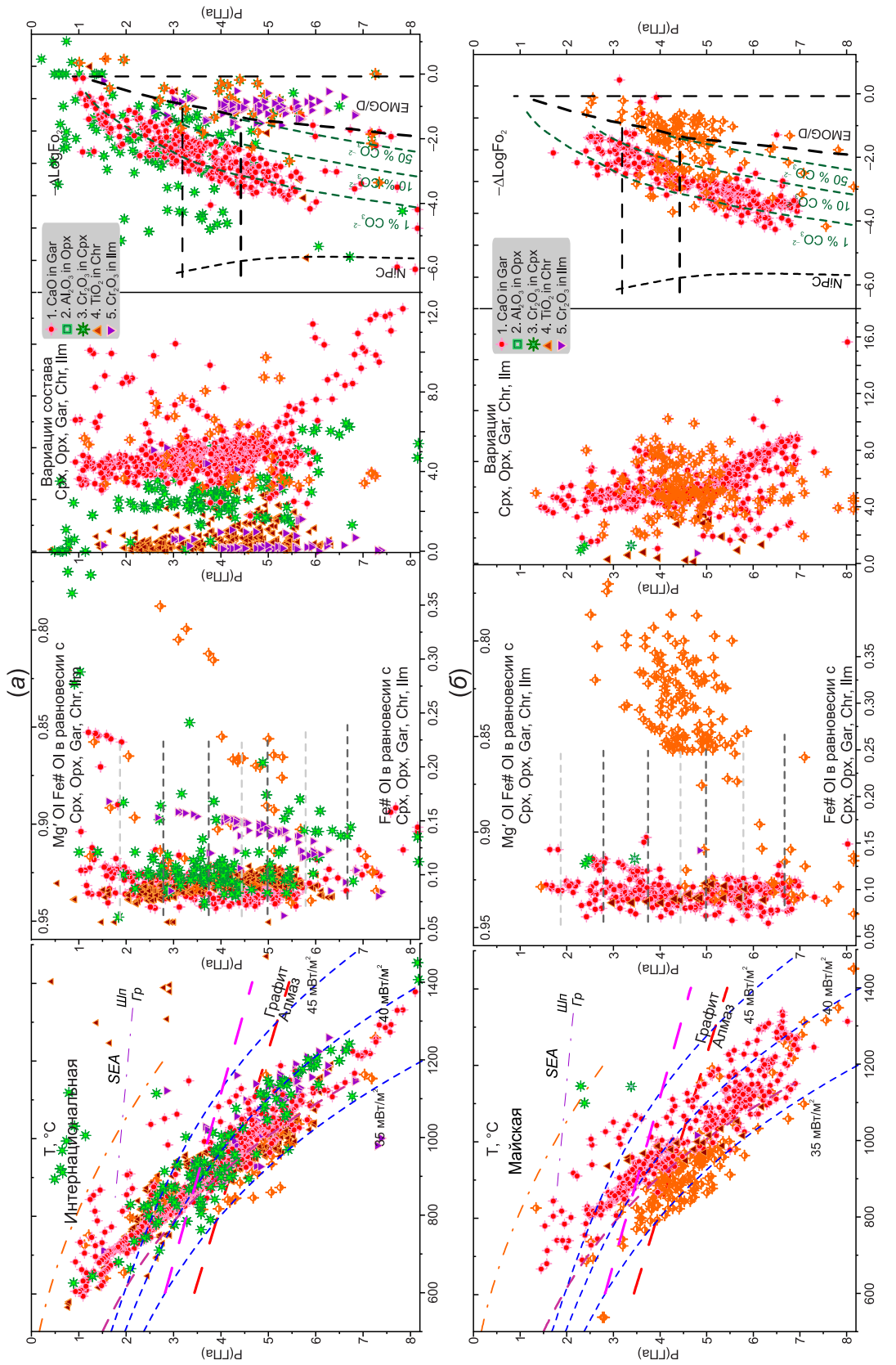
14. ПРИЛОЖЕНИЯ / APPENDIX

Приложение 1. PXF_{O_2} диаграмма для минералов из тр. Аэромагнитной (а) и тр. Загадочной (б). Мантийная колонна под трубкой Аэромагнитной имеет ступенчатую геотерму, но она получена в основном по клинопироксенам и ильменитам, а хромитовые определения в точности отвечают им, как и ильменитовые, которые несколько более высокотемпературны. Гранатовые определения с колебаниями Fe# обнаруживают слоистый разрез собственно перидотитовой мантии (приложение 1, а). Мантийный разрез под тр. Загадочной [Sobolev V.S., Sobolev N.V., 1967; Nimis et al., 2009] (рис. 2, а) обнаруживает ступенчатую структуру (из 7 горизонтов), которая различима по вариациям на диаграмме P-Fe# для гранатов. Клинопироксены трассируют как высокотемпературную, так и низкотемпературные ветви геотерм (приложение 1, б). Разрез мантийной колонны под трубкой Интернациональной близок по строению к трубке Мир (приложение 2, а) и характеризуется обилием эклогитов и клинопироксенов с высоким содержанием Na_2O , Cr_2O_3 , FeO и Al_2O_3 [Ashchepkov et al., 2013a], что типично для гибридных (с материалом эклогитов) перидотитовых пород. Начиная с астеносферного уровня (6.5 ГПа) и далее выше до 5.0 ГПа мантийная колонна разогрева.

Appendix 1. PXF_{O_2} diagram for minerals from the Aeromagnitnaya pipe (a) and the Zagadochnaya pipe (b). The mantle column under the Aeromagnitnaya pipe has a stepped geotherm, but it is obtained mostly for clinopyroxenite and ilmenite, while the chromite data exactly correspond to them, as well as the ilmenite data, which are of somewhat higher temperature. Garnet determinations with Fe# oscillations reveal a layered section of the peridotite mantle itself (Appendix 1, a). The mantle cross-section under the Zagadochnaya pipe [Sobolev V.S., Sobolev N.V., 1967; Nimis et al., 2009] (Fig. 2, a) shows a stepped structure (including seven horizons), that is detectable from the variations in the P-Fe# diagram for garnets. Clinopyroxenes trace both the high- and low-temperature branches of the geotherms (Appendix 1, b). The mantle column cross-section under the Internation pipe is close in structure to that of the Mir pipe (Appendix 2, a), with abundant eclogites and clinopyroxenes and high contents of Na_2O , Cr_2O_3 , FeO and Al_2O_3 [Ashchepkov et al., 2013a], which is typical of hybrid (with eclogites) peridotite rocks. Starting from the asthenospheric level (6.5 GPa) and further up to 5.0 GPa, the mantle column is heated.

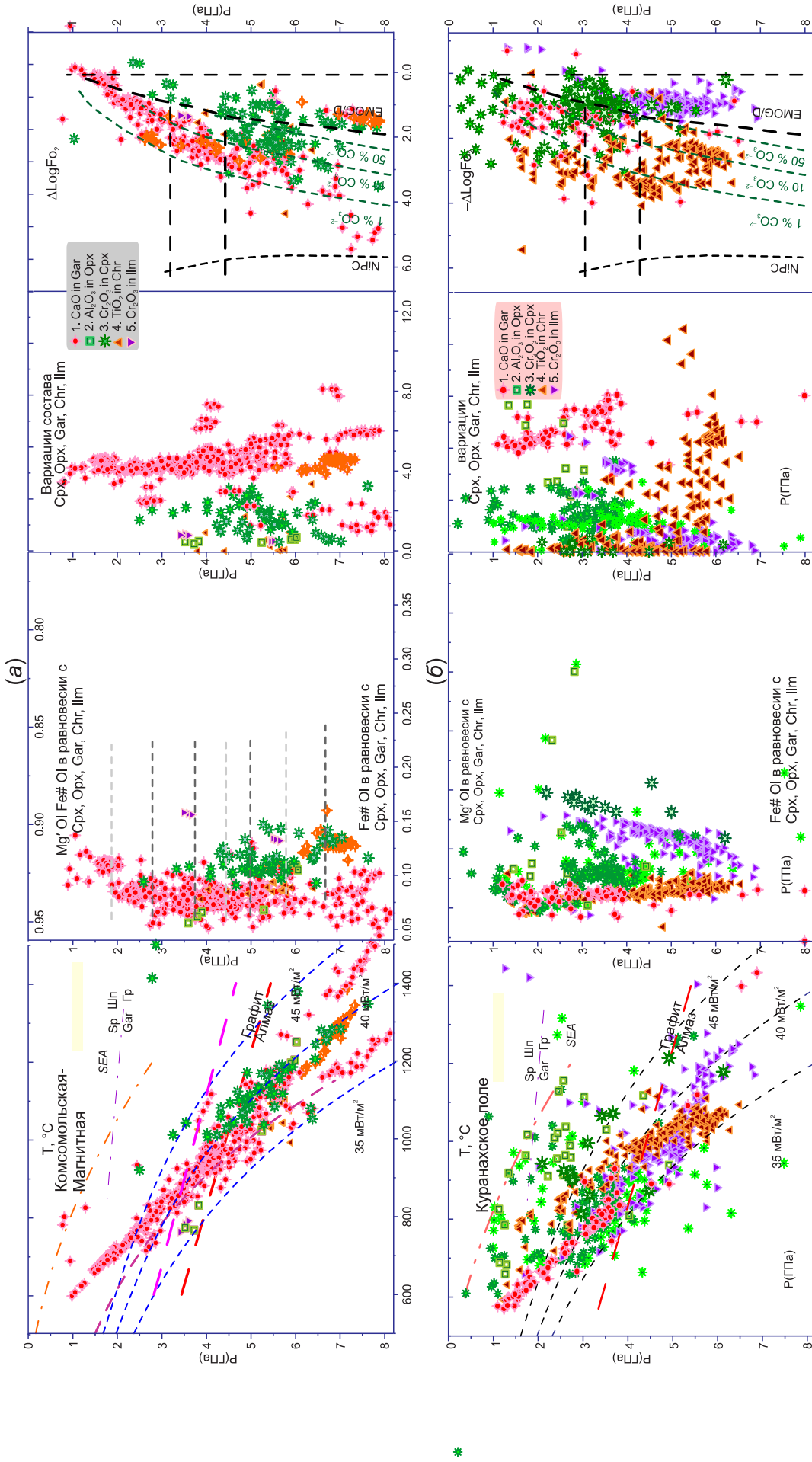






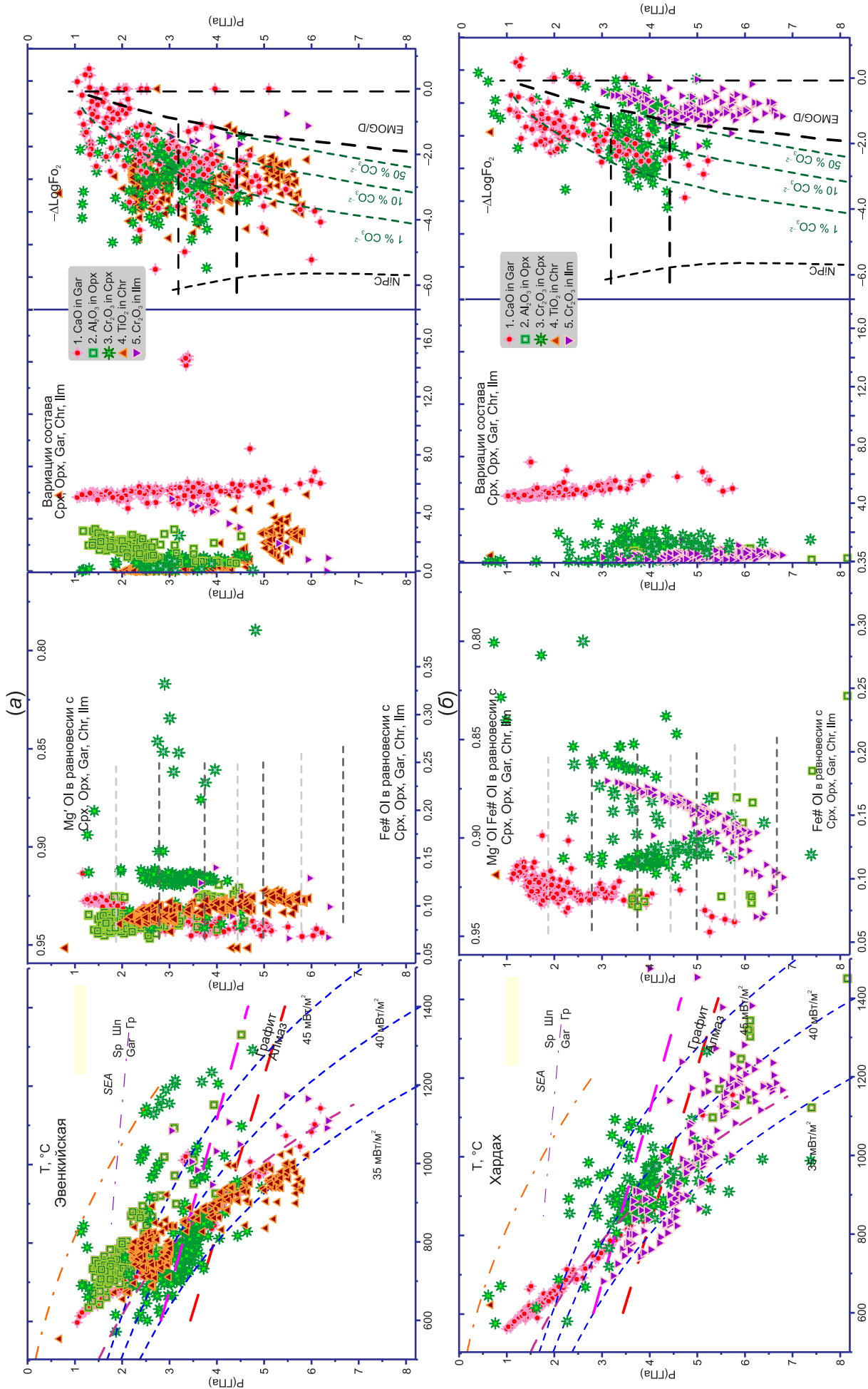
Приложение 2. P XFO_2 диаграмма для минералов из тр. Интернациональной (а) и тр. Майской (б).

Appendix 2. P XFO_2 diagram for minerals from the International pipe (a) and the Mayskaya pipe (b).



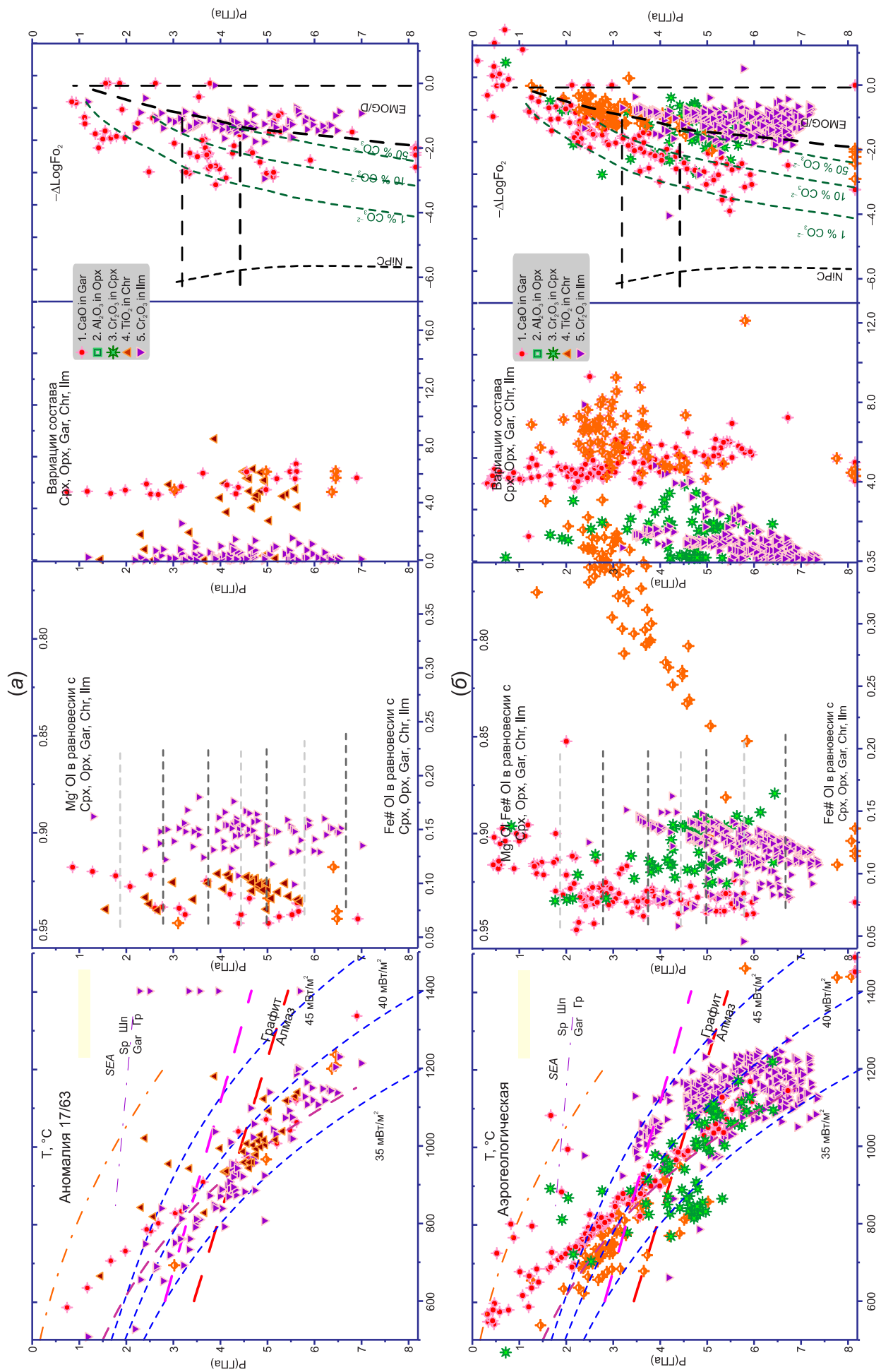
Приложение 3. P-XF₀₂ диаграмма для минералов из тр. Комсомольской-Магнитной (а) и трубок Куранахского поля: Малокуонамской, Трудовой, Университетской, Лось (б). мантийной колонне под трубкой Комсомольской-Магнитной суб-Са гранаты обнаружены начиная от 3 ГПа до основания СКЛМ на пяти уровнях (а). Для трубок Куранахского поля характерно наличие Ti-содержащих хромитов в основании разреза и сравнительно малохромистых пирролов, которые отвечают довольно окисленным условиям (б).

Appendix 3. P-XF₀₂ diagram for minerals from the Komsomolsk-Magnitnaya pipe (a) and pipes of the Kuranaokh field: Malokuonamskaya, Trudovaya, Universitetskaya, and Los' (b). In the mantle column under the Komsomolsk-Magnitnaya pipe sub-Ca garnets were found starting from 3 GPa to the base of the Siberian craton lithospheric mantle (SCLM) at five levels (a). The tubes of the Kuranaokh field are characterized by the presence of Ti-containing chromites at the base of the cross-section and relatively low-chromic pyrope corresponding to rather oxidized conditions (b).



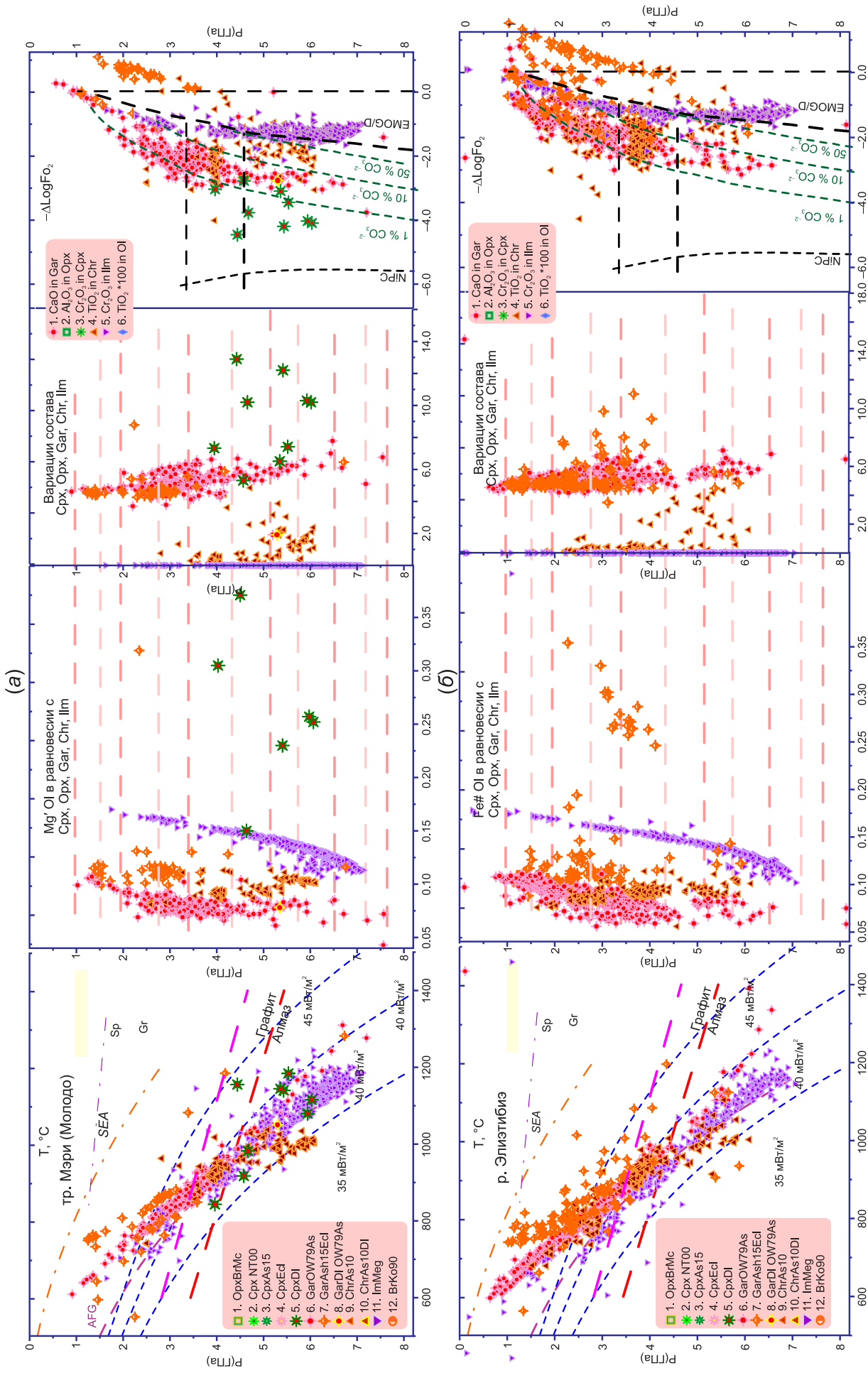
Приложение 4. PXF₀₂ диаграмма для минералов из тр. Эвенкийской (Харамайского поля) (а) и тр. Хардах (Ары-Мастахского поля) (б).

Appendix 4. PXF₀₂ diagram for minerals from the Evenki pipe (Kharamai field) (a) and the Khardakh pipe (Ary-Mastakh field) (b).



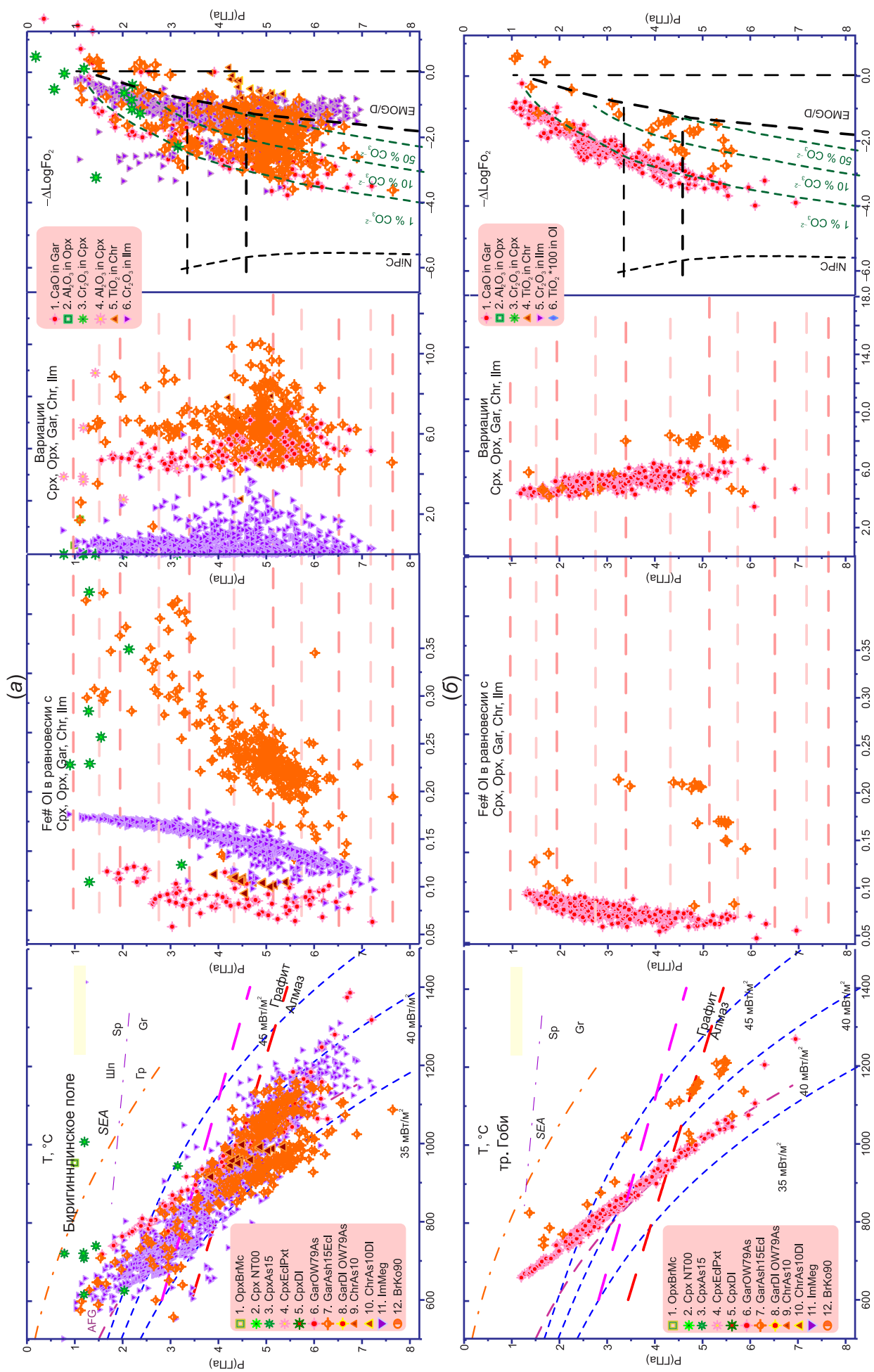
Приложение 5. PXF₀₂ диаграмма для минералов из трубки 17/63 Дюкенского поля (a) и тр. Аэрогеологической (Верхнемогорчунское поле) (б).

Appendix 5. PXF₀₂ diagram for minerals from Pipe 17/63 (Duken field) (a) and the Aerogeological pipe (Verkhne-Motorchunskoye field) (b).



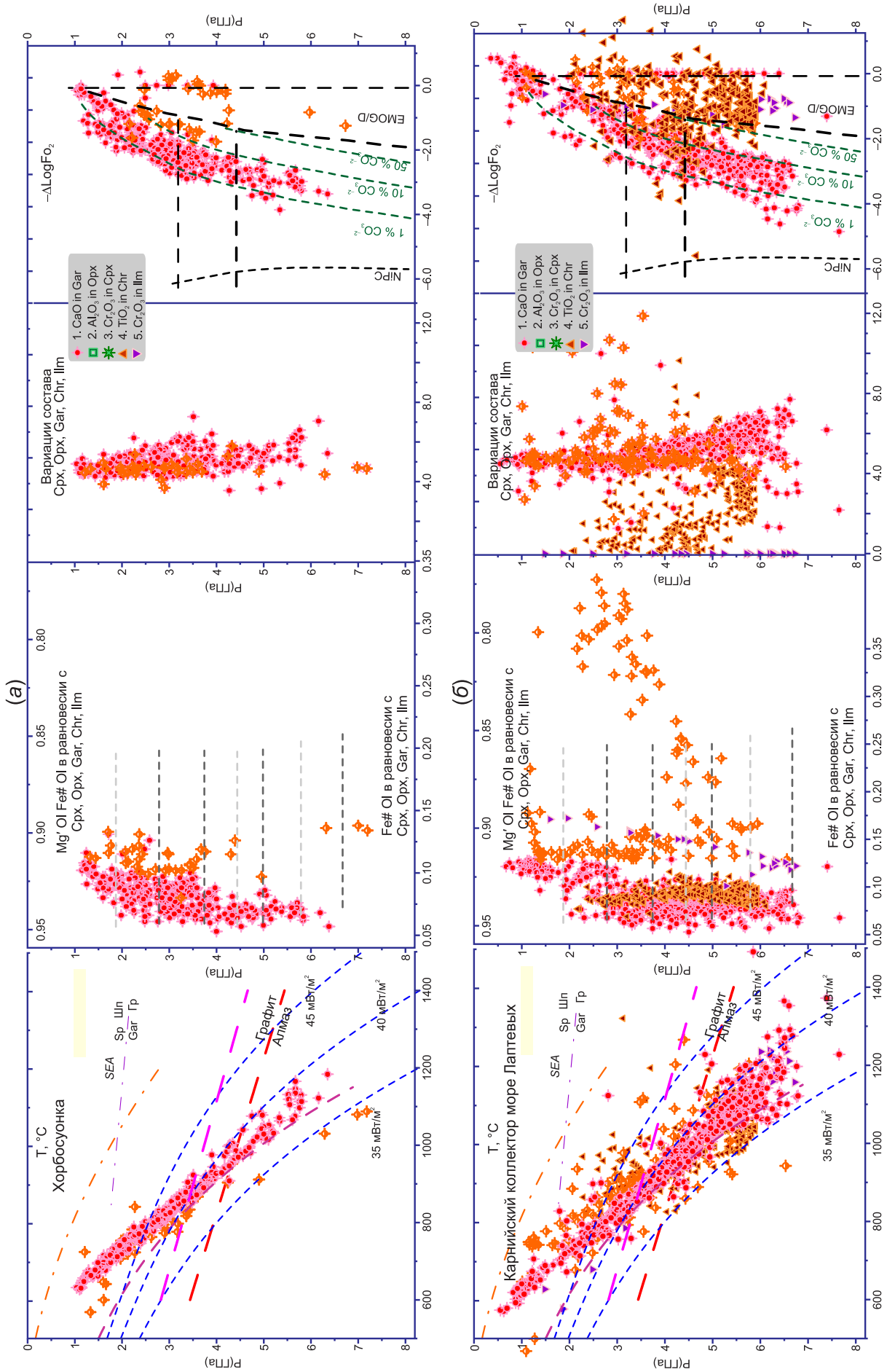
Приложение 6. PXF₀₂ диаграмма для минералов из шлихового материала тр. Мэри (Молодинское поле) и шлихового ареала р. Элиэтибиз (Нижнее Приленье) (б).

Appendix 6. PXF₀₂ diagram for minerals from placer material of the Mary pipe (Molodinskoe field) (a) and the placer area of the Elietibie river (Lower Lena region) (b).



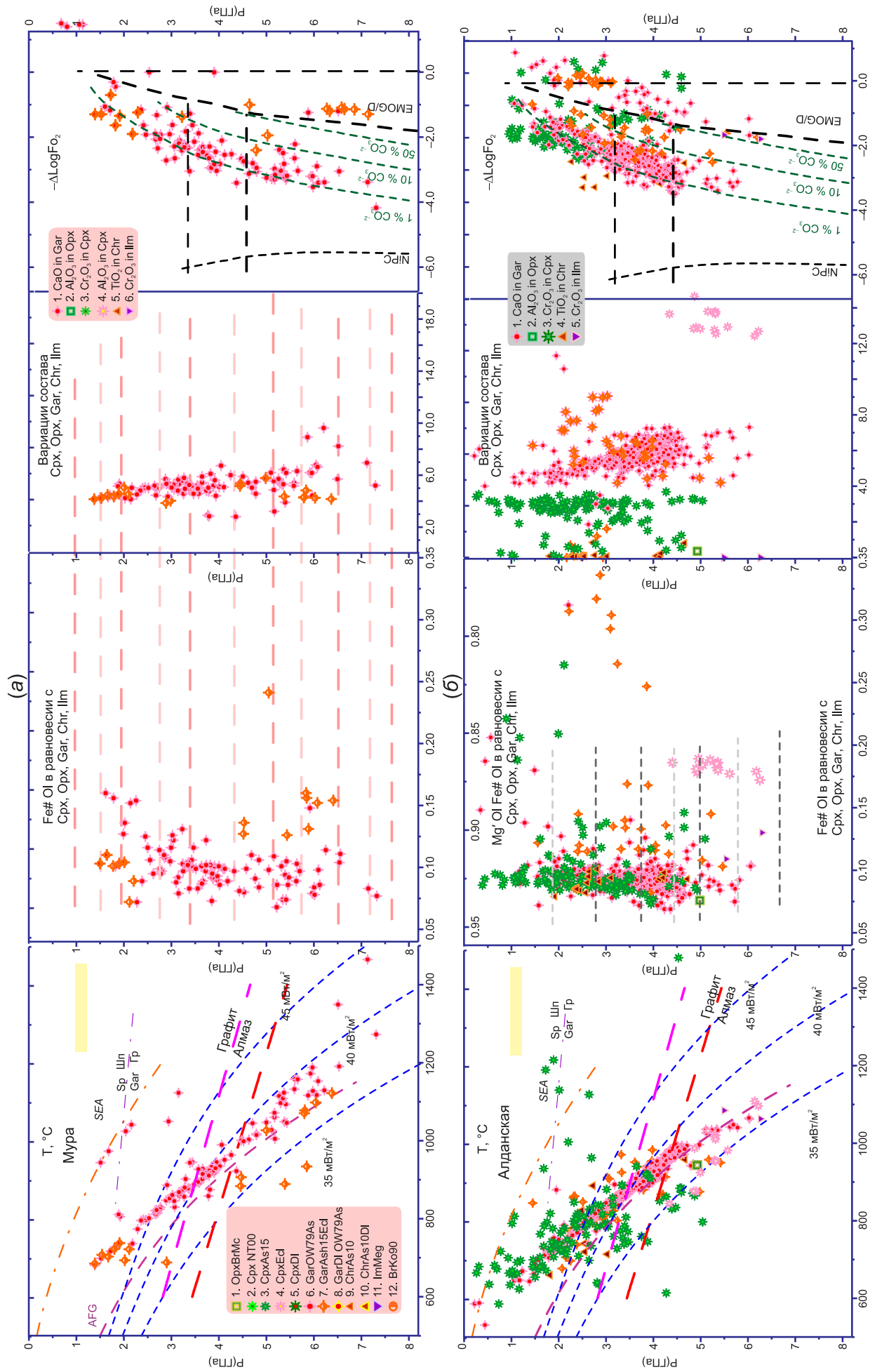
Приложение 7. PXF₀₂ диаграмма для минералов из трубок Биригиндинского поля (а) и тр. Гоби (Хорбосунское поле) (б).

Appendix 7. PXF₀₂ diagram for minerals from the pipes of the Biriginda field (a) and the Gobi pipe (Khorbosuon field) (b).



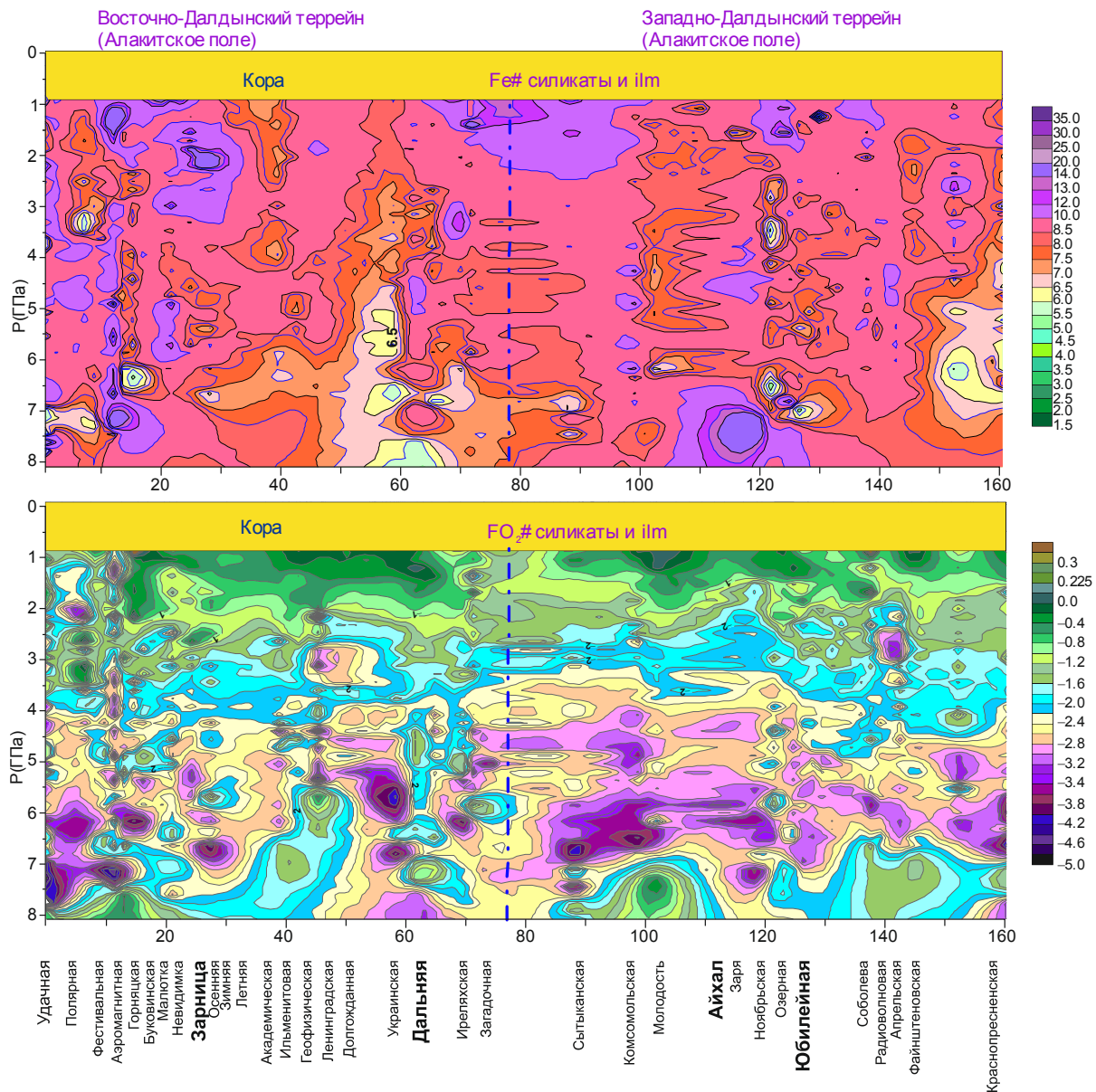
Приложение 8. PXF₀₂ диаграмма для минералов из тр. Хорбусонка (а) и Карнийского коллектора близ устья р. Лены (б) [Smelov et al., 2011].

Appendix 8. PXF₀₂ diagram for minerals from the Khorbusonka pipe (a) and the Carnian collector near the Lena river mouth (б) [Smelov et al., 2011].



Приложение 9. PXF₀₂ диаграмма для минералов из тр. Лорик (Бирингинское поле) (а) и шлихового ареала по р. Мура (б).

Appendix 9. PXF₀₂ diagram for minerals from the Lorik pipe (Biriginda field) (a) and the placer area on the Mura river (b).



Приложение 10. Мантийный разрез ССВ-ЮЮЗ через Далдыно-Алаkitский район от тр. Удачной до тр. Краснопресненской. Мантийный разрез через Далдынский и Алаkitский районы (Восточный и Западный Далдынский террейны) [Gladkochub et al., 2006] от тр. Краснопресненской до тр. Сытыканской предполагает, что его структура является непрерывной. Граница между Далдынским и Алаkitским полями между тр. Загадочной и Сытыканской не выражена резко. Перегиб возле трубок Юбилейной и Айхал соответствует оси структуры антиклинального типа с большим количеством относительно низкожелезистых дунитов – гарцбургитов, сформировавших ядро, которое претерпело интенсивный метасоматоз расплавами с высоким K/Na отношениями [Aschepkov et al., 2004; Sobolev et al., 2004]. Нижняя часть МР на севере области содержит большее количество суб-Са гранатов и менее окисленного материала. В центральной части пироксенитовые богатые Са гранаты часто встречаются в основании литосферы. В южном блоке наклон слоев мантии погружается до тр. Краснопресненской.

Appendix 10. The NNE–SSW mantle section across the Daldyno–Alakit region from the Udachnaya pipe to the Krasnopresnenskaya pipe. In the mantle cross-section across the East and West Daldyn terranes [Gladkochub et al., 2006] from the Krasnopresnenskaya pipe to the Sytykan pipe, it is assumed that its structure is continuous. The boundary is not clearly detectable between the Daldyn and Alakit fields (between the Zagadochnaya and Sytykan pipes). The inflection near the Yubileynaya and Aikhhal pipes corresponds to an anticline structure with a high content of relatively low-iron dunite – harzburgites that formed the core, which was subjected to intensive metasomatism due to melts with high K/Na ratios [Aschepkov et al., 2004; Sobolev et al., 2004]. In the northern areas of the region, the lower part of the mantle cross-section contains abundant sub-Ca garnets and a less oxidized material. In the central area, pyroxenite Ca-rich garnets are often found at the lithosphere base. In the southern area, the inclined mantle layers dip towards the Krasnopresnenskaya pipe.

15. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Afanasiev V.P., Ashchepkov I.V., Verzhak V.V., O'Brien H., Palessky S.V., 2013. PT conditions and trace element variations of picroilmenites and pyropes from placers and kimberlites in the Arkhangelsk region, NW Russia. *Journal of Asian Earth Sciences* 70–71, 45–63. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2013.03.002>.
- Agashev A.M., Ionov D.A., Pokhilenko N.P., Golovin A.V., Cherepanova Yu., Sharygin I.S., 2013. Metasomatism in lithospheric mantle roots: Constraints from whole-rock and mineral chemical composition of deformed peridotite xenoliths from kimberlite pipe Udachnaya. *Lithos* 160–161, 201–215. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2012.11.014>.
- Agashev A.M., Pokhilenko N.P., Tolstov A.V., Polyanchko V.G., Mal'kovets V.G., Sobolev N.V., 2004. New age data on kimberlites from the Yakutian diamondiferous province. *Doklady Earth Sciences* 399 (8), 1142–1145.
- Agee C.B., 1998. Crystal-liquid density inversions in terrestrial and lunar magmas. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 107 (1–3), 63–74 [https://doi.org/10.1016/S0031-9201\(97\)00124-6](https://doi.org/10.1016/S0031-9201(97)00124-6).
- Artemieva I.M., Thybo H., Cherepanova Y., 2019. Isopycnicity of cratonic mantle restricted to kimberlite provinces. *Earth and Planetary Science Letters* 505, 13–19. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2018.09.034>.
- Ashchepkov I.V., 2011. Program of mantle thermometers and barometers, and the use: reconstruction and calibration of PT methods. *Vestnik ONZ RAN* 3, NZ6008 (in Russian) [Ащепков И.В. Программа мантийных термометров и барометров, использование: реконструкции и калибровки РТ методов // Вестник ОНЗ РАН. 2011. Т. 3. NZ6008] <https://doi.org/10.2205/2011NZ000138>.
- Ashchepkov I.V., Alymova N.V., Logvinova A.M., Vladykin N.V., Kuligin S.S., Mityukhin S.I., Downes H., Stegnitsky Y.B., Prokopyev S.A., Salikhov R.F., Palessky S.V., Khmelnikova O.S., 2014. Picroilmenites in Yakutian kimberlites: Variations and genetic models. *Solid Earth* 5 (2), 915–938. <https://doi.org/10.5194/se-5-915-2014>.
- Ashchepkov I.V., Kuligin S.S., Vladykin N.V., Downes H., Vavilov M.A., Nigmatulina E.N., Babushkina S.A., Tychkov N.S., Khmelnikova O.S., 2016. Comparison of mantle lithosphere beneath Early Triassic kimberlite fields in Siberian craton reconstructed from deep-seated xenocrysts. *Geoscience Frontiers* 7 (4), 639–662. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2015.06.004>.
- Ashchepkov I.V., Logvinova A.M., Ntaflos T., Vladykin N.V., Kostrovitsky S.I., Spetsius Z., Mityukhin S.I., Prokopyev S.A., Medvedev N.S., Downes H., 2017b. Alakit and Daldyn kimberlite fields, Siberia, Russia: Two types of mantle subterranean beneath central Yakutia? *Geoscience Frontiers* 8 (4), 671–692. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2016.08.004>.
- Ashchepkov I.V., Logvinova A.M., Reimers L.F., Ntaflos T., Spetsius Z.V., Vladykin N.V., Downes H., Yudin D.S., Travin A.V., Makovchuk I.V., Palesskiy V.S., Khmel'nikova O.S., 2015. The Sytykanskaya kimberlite pipe: Evidence from deep-seated xenoliths and xenocrysts for the evolution of the mantle beneath Alakit, Yakutia, Russia. *Geoscience Frontiers* 6 (5), 687–714. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2014.08.005>.
- Ashchepkov I.V., Ntaflos T., Kuligin S.S., Malygina E.V., Agashev A.M., Logvinova A.M., Mityukhin S.I., Alymova N.V., Vladykin N.V., Palessky S.V., Khmelnikova O.S., 2013b. Deep-seated xenoliths from the Brown Breccia of the Udachnaya Pipe, Siberia. In: D. Graham Pearson, H.S. Grütter, J.W. Harris, B.A. Kjarsgaard, H. O'Brien, N.V. Chalapati Rao, S. Sparks (Eds.), *Proceedings of 10th International Kimberlite Conference. Vol. 1 (Special Issue of the Journal of the Geological Society of India)*, Springer, New Delhi, p. 59–73. https://doi.org/10.1007/978-81-322-1170-9_5.
- Ashchepkov I.V., Ntaflos T., Logvinova A.M., Spetsius Z.V., Downes H., Vladykin N.V., 2017a. Monomineral universal clinopyroxene and garnet barometers for peridotitic, eclogitic and basaltic systems. *Geoscience Frontiers* 8 (4), 775–795 <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2016.06.012>.
- Ashchepkov I.V., Ntaflos T., Spetsius Z.V., Salikhov R.F., Downes H., 2017c. Interaction between protokimberlite melts and mantle lithosphere: Evidence from mantle xenoliths from the Dalnyaya kimberlite pipe, Yakutia (Russia). *Geoscience Frontiers* 8 (4), 693–710. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2016.05.008>.
- Ashchepkov I.V., Pokhilenko N.P., Vladykin N.V., Logvinova A.M., Afanasiev V.P., Pokhilenko L.N., Kuligin S.S., Malygina E.V., Alymova N.A., Kostrovitsky S.I., Rotman A.Y., Mityukhin S.I., Karpenko M.A., Stegnitsky Y.B., Khmelnikova O.S., 2010. Structure and evolution of the lithospheric mantle beneath Siberian craton, thermobarometric study. *Tectonophysics* 485 (1–4), 17–41. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2009.11.013>.
- Ashchepkov I.V., Vladykin N.N., Ntaflos T., Kostrovitsky S.I., Prokopyev S.A., Downes H., Smelov A.P., Agashev A.M., Logvinova A.M., Kuligin S.S., Tychkov N.S., Salikhov R.F., Stegnitsky Yu.B., Alymova N.V., Vavilov M.A., Minin V.A., Babushkina S.A., Ovchinnikov Yu.I., Karpenko M.A., Tolstov A.V., Shmarov G.P., 2014a. Layering of the lithospheric mantle beneath the Siberian Craton: Modeling using thermobarometry of mantle xenolith and xenocrysts. *Tectonophysics* 634 (1–4), 55–75. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2014.07.017>.
- Ashchepkov I.V., Vladykin N.V., Nikolaeva I.V., Palessky S.V., Logvinova A.M., Saprykin A.I., Khmel'nikova O.S., Anoshin G.N., 2004. Mineralogy and geochemistry of mantle inclusions and mantle column structure of the Yubileynaya kimberlite pipe, Alakit field, Yakutia. *Doklady Earth Sciences* 395 (3), 378–384.
- Ashchepkov I.V., Vladykin N.V., Ntaflos T., Downes H., Mitchell R., Smelov A.P., Alymova N.V., Kostrovitsky S.I., Rotman A.Y., Smarov G.P., Makovchuk I.V., Stegnitsky Yu.B., Nigmatulina E.N., Khmelnikova O.S., 2013a. Regularities and mechanism of formation of the mantle lithosphere structure beneath the Siberian Craton in comparison with other cratons. *Gondwana Research* 23 (1), 4–24. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2012.03.009>.
- Ashchepkov I.V., Vladykin N.V., Saprykin A.I., Khmelnikova O.S., Anoshin G.N., 2001. Composition and thermal structure of the mantle in peripheral parts of Siberian craton. *Revista Brasileira de Geociências* 31 (4), 493–496.

- Aulbach S., Griffin W.L., Pearson N.J., O'Reilly S.Y., Kivi K., Doyle B.J., 2004. Mantle formation and evolution, Slave craton: constraints from HSE abundances and Re-Os isotope systematics of sulfide inclusions in mantle xenocrysts. *Chemical Geology* 208 (1–4), 61–88. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2004.04.006>.
- Babushkina S.A., 2013. Типоморфизм гранатов из Запретной трубы. *Razvedka i Okhrana Nedr (Exploration and Protection of Mineral Resources)* (12), 13–16 (in Russian) [Бабушкина С.А. Типоморфизм гранатов трубки Запретная // *Разведка и охрана недр*. 2013. № 12. С. 13–16].
- Bascou J., Doucet L.S., Saumet S., Ionov D.A., Ashchepkov I.V., Golovin A.V., 2011. Seismic velocities, anisotropy and deformation in Siberian cratonic mantle: EBSD data on xenoliths from the Udachnaya kimberlite. *Earth and Planetary Science Letters* 304 (1–2), 71–84. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2011.01.016>.
- Batumike J.M., Griffin W.L., O'Reilly S.Y., 2009. Lithospheric mantle structure and the diamond potential of kimberlites in southern D.R. Congo. *Lithos* 112 (Supplement 1), 166–176. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2009.04.020>.
- Beard B.L., Fraracci K.N., Taylor L.A., Snyder G.A., Clayton R.N., Mayeda T.K., Sobolev N.V., 1996. Petrography and geochemistry of eclogites from the Mir kimberlite, Yakutia, Russia. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 125 (4), 293–310. <https://doi.org/10.1007/s004100050223>.
- Boyd F.R., 1973. A pyroxene geotherm. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 37 (12), 2533–2546. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(73\)90263-9](https://doi.org/10.1016/0016-7037(73)90263-9).
- Boyd F.R., Nixon P.H., 1978. Ultramafic nodules from the Kimberley pipes, South Africa. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 42 (9), 1367–1382. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(78\)90042-X](https://doi.org/10.1016/0016-7037(78)90042-X).
- Boyd F.R., Pokhilenko N.P., Pearson D.G., Mertzman S.A., Sobolev N.V., Finger L.W., 1997. Composition of the Siberian cratonic mantle: evidence from Udachnaya peridotite xenoliths. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 128 (2–3), 228–246. <https://doi.org/10.1007/s004100050305>.
- Brey G.P., Köhler T., 1990. Geothermobarometry in four-phase lherzolites. II. New thermobarometers, and practical assessment of existing thermobarometers. *Journal of Petrology* 31 (6), 1353–1378. <https://doi.org/10.1093/petrology/31.6.1353>.
- Bushenkova N., Tychkov S., Koulakov I., 2002. Tomography on PP-P waves and its application for investigation of the upper mantle in central Siberia. *Tectonophysics* 358 (1–4), 57–76. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(02\)00417-1](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(02)00417-1).
- Condie K.C., 2004. Supercontinents and superplume events: distinguishing signals in the geologic record. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 146 (1–2), 319–332. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2003.04.002>.
- Dawson J.B., 1980. Kimberlites and Their Xenoliths. Springer-Verlag, Berlin, New York, 208 p.
- Deschamps F., Godard M., Guillot S., Hattori K., 2013. Geochemistry of subduction zone serpentinites: A review. *Lithos* 178, 96–127. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2013.05.019>.
- Egorov K.N., Kiselev A.I., Men'shagin Y.V., Minaeva Y.A., 2010. Lamproite and kimberlite of the Sayany area: Composition, sources, and diamond potential. *Doklady Earth Sciences* 435 (2), 1670–1675. <https://doi.org/10.1134/S1028334X10120251>.
- Egorov K.N., Solov'eva L.V., Kovach V.P., Men'shagin Yu.V., Maslovskaya M.N., Sekerin A.P., Bankovskaya E.V., 2006. Petrological features of olivine-phlogopite lamproites of the Sayan region: Evidence from Sr-Nd isotope and ICP-MS trace-element data. *Geochemistry International* 44 (7), 729–735. <https://doi.org/10.1134/S0016702906070093>.
- Ernst W.G., 2017. Earth's thermal evolution, mantle convection, and Hadean onset of plate tectonics. *Journal of Asian Earth Sciences* 145 (Part B), 334–348. <https://doi.org/10.1016/j.jseaeas.2017.05.037>.
- Evensen N.M., Hamilton P.J., O'Nions R.K., 1978. Rare-earth abundances in chondritic meteorites. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 42 (8), 1199–1212. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(78\)90114-X](https://doi.org/10.1016/0016-7037(78)90114-X).
- Foley S.F., Pintér Z., 2018. Chapter 1 – Primary melt compositions in the Earth's mantle. In: Y. Kono, C. Sanloup (Eds.), *Magmas Under Pressure. Advances in High-Pressure Experiments on Structure and Properties of Melts*. Elsevier, Amsterdam, p. 3–42. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811301-1.00001-0>.
- Foley S.F., Yaxley G.M., Rosenthal A., Buhre S., Kiseeva E.S., Rapp R.P., Jacob D.E., 2009. The composition of near-solidus melts of peridotite in the presence of CO₂ and H₂O between 40 and 60 kbar. *Lithos* 112 (Supplement 1), 274–283. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2009.03.020>.
- Garanin V.K., Zvezdin A.B., Okrugin G.V., 1998. Mineralogy of oxide minerals from kimberlites of the Morkok pipe in connection with the assessment of its diamond content (Yakutsk diamondiferous province). *Bulletin of the Moscow University. Series 4: Geology* (4), 39–46 (in Russian) [Гаранин В.К., Звездин А.В., Округин Г.В. Минералогия оксидных минералов из кимберлитов трубки Моркока в связи с оценкой ее алмазоносности (Якутская алмазоносная провинция) // *Вестник Московского университета. Серия 4: Геология*. 1998. № 4. С. 39–46].
- Gaul O.F., Griffin W.L., O'Reilly S.Y., Pearson N.J., 2000. Mapping olivine composition in the lithospheric mantle. *Earth and Planetary Science Letters* 182 (3–4), 223–235. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(00\)00243-0](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(00)00243-0).
- Gerya T., 2014. Precambrian geodynamics: Concepts and models. *Gondwana Research* 25 (2), 442–463. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2012.11.008>.
- Gladkochub D.P., Donskaya T.V., Stanevich A.M., Pisarevsky S.A., Zhang S., Motova Z.L., Mazukabzov A.M., Li H., 2019. U-Pb detrital zircon geochronology and provenance of Neoproterozoic sedimentary rocks in southern Siberia: New

- insights into breakup of Rodinia and opening of Paleo-Asian Ocean. *Gondwana Research* 65, 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2018.07.007>.
- Gladkochub D.P., Pisarevsky S.A., Donskaya T.V., Natapov L.M., Mazukabzov A.M., Stanevich A.M., Sklyarov E.V., 2006. Siberian Craton and its evolution in terms of Rodinia hypothesis. *Episodes* 29 (3), 169–174.
- Gornova M.A., Belyaev V.A., Belozeroва O.Yu., 2013. Textures and geochemistry of the Saramta peridotites (Siberian craton): Melting and refertilization during early evolution of the continental lithospheric mantle. *Journal of Asian Earth Sciences* 62, 4–17. <https://doi.org/10.1016/j.jseae.2012.10.004>.
- Grakhanov A.S., Zaruikin R.A., Bogush I.N., Yadrenkin A.B., 2009. Discovery of Upper Triassic diamond placers in the Olenek Bay of the Laptev Sea. *Otechestvennaya Geologia (Russian Geology)* (1), 53–61 (in Russian) [Граханов А.С., Зарукин Р.А., Бозуш И.Н., Ядренкин А.Б. Открытие верхнетриасовых россыпей алмазов в Оленекском заливе моря Лаптевых // Отечественная геология. 2009. № 1. С. 53–61].
- Grégoire M., Bell D., Le Roex A., 2002. Trace element geochemistry of phlogopite-rich mafic mantle xenoliths: their classification and their relationship to phlogopite-bearing peridotites and kimberlites revisited. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 142 (5), 603–625. <https://doi.org/10.1007/s00410-001-0315-8>.
- Grégoire M., Bell D.R., Le Roex A.P., 2003. Garnet lherzolites from the Kaapvaal Craton (South Africa): trace element evidence for a metasomatic history. *Journal of Petrology* 44 (4), 629–657. <https://doi.org/10.1093/ptrology/44.4.629>.
- Griffin W.L., Fisher N.I., Friedman J., Ryan C.G., O'Reilly S.Y., 1999a. Cr-pyrope garnets in the lithospheric mantle. I. Compositional systematics and relations to tectonic setting. *Journal of Petrology* 40 (5), 679–704. <https://doi.org/10.1093/ptrology/40.5.679>.
- Griffin W.L., Natapov L.M., O'Reilly S.Y., van Acherbergh E., Cherenkova A.F., Cherenkov V.G., 2005. The Kharamai kimberlite field, Siberia: modification of the lithospheric mantle by the Siberian Trap event. *Lithos* 81 (1–4), 167–187. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2004.10.001>.
- Griffin W.L., O'Reilly S.Y., 2007. Cratonic lithospheric mantle: is anything subducted? *Episodes* 30 (1), 43–53.
- Griffin W.L., O'Reilly S.Y., Abe N., Aulbach S., Davies R.M., Pearson N.J., Doyle B.J., Kivi K., 2003. The origin and evolution of Archean lithospheric mantle. *Precambrian Research* 127 (1–3), 19–41. [https://doi.org/10.1016/S0301-9268\(03\)00180-3](https://doi.org/10.1016/S0301-9268(03)00180-3).
- Griffin W.L., O'Reilly S.Y., Afonso J.C., Begg G.C., 2009. The composition and evolution of lithospheric mantle: a reevaluation and its tectonic implications. *Journal of Petrology* 50 (7), 1185–1204. <https://doi.org/10.1093/ptrology/egn033>.
- Griffin W.L., Ryan C.G., Kaminsky F.V., O'Reilly S.Y., Natapov L.M., Win T.T., Kinny P.D., Ilupin I.P., 1999c. The Siberian lithosphere traverse: mantle terranes and the assembly of the Siberian Craton. *Tectonophysics* 310 (1–4), 1–35. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(99\)00156-0](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(99)00156-0).
- Griffin W.L., Shee S.R., Ryan C.G., Win T.T., Wyatt B.A., 1999b. Harzburgite to lherzolite and back again: metasomatic processes in ultramafic xenoliths from the Wesselton kimberlite, Kimberley, South Africa. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 134 (2–3), 232–250. <https://doi.org/10.1007/s004100050481>.
- Gudmundsson G., Wood B.J., 1995. Experimental tests of garnet peridotite oxygen barometry. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 119 (1), 56–67. <https://doi.org/10.1007/BF00310717>.
- Helmstaedt H., 2009. Crust–mantle coupling revisited: the Archean Slave craton, NWT, Canada. *Lithos* 112 (Supplement 2), 1055–1068. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2011.04.034>.
- Herzberg C., 2004. Geodynamic information in peridotite petrology. *Journal of Petrology* 45 (12), 2507–2530. <https://doi.org/10.1093/ptrology/egh039>.
- Ionov D.A., Doucet L.S., Ashchepkov I.V., 2010. Composition of the lithospheric mantle in the Siberian Craton: new constraints from fresh peridotites in the Udachnaya-East Kimberlite. *Journal of Petrology* 51 (11), 2177–2210. <https://doi.org/10.1093/ptrology/egq053>.
- Ionov D.A., Doucet L.S., Carlson R.W., Golovin A.V., Korsakov A.V., 2015. Post-Archean formation of the lithospheric mantle in the central Siberian craton: Re–Os and PGE study of peridotite xenoliths from the Udachnaya kimberlite. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 165, 466–483. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2015.06.035>.
- Ionov D.A., Doucet L.S., Xu Y., Golovin A.V., Oleinikov O.B., 2018. Reworking of Archean mantle in the NE Siberian craton by carbonatite and silicate melt metasomatism: Evidence from a carbonate-bearing, dunite-to-websterite xenolith suite from the Obnazhennaya kimberlite. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 224, 132–153. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2017.12.028>.
- Jagoutz E., Lowry D., Matthey D., Kudrjavitseva G., 1994. Diamondiferous eclogites from Siberia: Remnants of Archean oceanic crust. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 58 (23), 5191–5207. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(94\)90304-2](https://doi.org/10.1016/0016-7037(94)90304-2).
- Karato S.I., 2010. Rheology of the Earth's mantle: A historical review. *Gondwana Research* 18 (1), 17–45. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2010.03.004>.
- Kopylova M.G., Caro G., 2004. Mantle xenoliths from the Southeastern Slave craton: Evidence for chemical zonation in a thick, cold lithosphere. *Journal of Petrology* 45 (5), 1045–1067. <https://doi.org/10.1093/ptrology/egh003>.

- Koreshkova M.Yu., Downes H., Nikitina L.P., Vladykin N.V., Larionov A.N., Sergeev S.A., 2009. Trace element and age characteristics of zircons in granulite xenoliths from the Udachnaya kimberlite pipe, Siberia. *Precambrian Research* 168 (3–4), 197–212. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2008.09.007>.
- Kornilova V.P., Spetsius Z.V., Pomazanskiy B.S., 2016. Petrographic-mineralogical peculiarities and feasibility of kimberlite pipes Loric and Svetlana grade re-estimation (West-Ukukitsky field, Yakutia). *Regional Geology and Metallogeny* (68), 92–99 (in Russian) [Корнилова В.П., Спеццус З.В., Помазанский Б.С. Петрографо-минералогические особенности и целесообразность переоценки алмазности кимберлитовых трубок Лорик и Светлана (Западно-Укукитское поле, Якутия) // Региональная геология и металлогения. 2016. № 68. С. 92–99].
- Kostrovitsky S.I., Alymova N.V., Yakovlev D.A., Serov I.V., Ivanov A.S., Serov V.P., 2006. Specific features of picroilmenite composition in various diamondiferous fields of the Yakutian province. *Doklady Earth Sciences* 406 (1), 19–23. <https://doi.org/10.1134/S1028334X06010065>.
- Kostrovitsky S.I., Morikiyo T., Serov I.V., Yakovlev D.A., Amirzhanov A.A., 2007. Isotope-geochemical systematics of kimberlites and related rocks from the Siberian Platform. *Russian Geology and Geophysics* 48 (3), 272–290. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2007.02.011>.
- Koulakov I., Bushenkova N., 2010. Upper mantle structure beneath the Siberian craton and surrounding areas based on fieldal tomographic inversion of P and PP travel times. *Tectonophysics* 486 (1–4), 81–100. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2010.02.011>.
- Krogh E.J., 1988. The garnet-clinopyroxene Fe-Mg geothermometer – a reinterpretation of existing experimental data. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 99 (1), 44–48. <https://doi.org/10.1007/BF00399364>.
- Kuligin S.S., 1997. A Complex of Pyroxenite Xenoliths from Different Regions of the Siberian Platform. PhD Thesis (Candidate of Geology and Mineralogy). UIGGM SB RAS, Novosibirsk, 190 p. (in Russian) [Кулигин С.С. Комплекс ксенолитов пироксенитов различных регионов Сибирской платформы: Дис. ... канд. геол.-мин. наук. Новосибирск: ОИГГМ СО РАН, 1997. 190 с.].
- Kuskov O.L., Kronrod V.A., Prokofev A.A., 2011. Thermal structure and thickness of the lithospheric mantle underlying the Siberian Craton from the kraton and kimberlit superlong seismic profiles. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth* 47 (3), 155–175. <https://doi.org/10.1134/S1069351310111011>.
- Kuskov O.L., Kronrod V.A., Prokofev A.A., Pavlenkova N.I., 2014a. Lithospheric mantle structure of the Siberian craton inferred from the superlong Meteorite and Rift seismic profiles. *Russian Geology and Geophysics* 55 (7), 892–906. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2014.06.008>.
- Kuskov O.L., Kronrod V.A., Prokofyev A.A., Pavlenkova N.I., 2014b. Thermo-chemical structure of the lithospheric mantle underneath the Siberian craton inferred from long-range seismic profiles. *Tectonophysics* 615–616, 154–166. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2014.01.006>.
- Lavrentiev Yu.G., Usova L.V., 1994. The new version of the Karat software for quantitative X-ray microanalysis. *Journal of Analytical Chemistry* 46 (5), 462–468 (in Russian) [Лаврентьев Ю.Г., Усова Л.В. Новая версия программы «Карат» для количественного рентгеноспектрального микроанализа // Журнал аналитической химии. 1994. Т. 46. № 5. С. 462–468].
- Lavrentiev Yu.G., Usova L.V., Kuznetsova A.I., Letov S.V., 1987. X-ray quantum-micrometric analysis of the most important kimberlite minerals. *Geologiya i Geofizika (Russian Geology and Geophysics)* 28 (5), 75–81 (in Russian) [Лаврентьев Ю.Г., Усова Л.В., Кузнецова А.И., Летов С.В. Рентгеноспектральный квантометрический микроанализ важнейших минералов кимберлитов // Геология и геофизика. 1987. Т. 28. № 5. С. 75–81].
- Laz'ko E.E., Roden M.F., 2003. Garnet peridotites and pyroxenites in the subcontinental lithosphere of the central part of the Siberian craton (xenoliths from the Mir pipe). In: Problems of forecasting, prospecting and study of mineral deposits on the threshold of the XXI century. Voronezh State University Publishing House, Voronezh, p. 307–318 (in Russian) [Лазько Е.Е., Роден М.Ф. Гранатовые перидотиты и пироксениты в субконтинентальной литосфере центральной части Сибирского кратона (ксенолиты из трубки Мир) // Проблемы прогнозирования, поисков и изучения месторождений полезных ископаемых на пороге XXI века. Воронеж: Изд-во Воронежского государственного университета, 2003. С. 307–318].
- Lazarov M., Brey G.P., Weyer S., 2012. Evolution of the South African mantle – A case study of garnet peridotites from the Finsch diamond mine (Kaapvaal craton); part 1: Inter-mineral trace element and isotopic equilibrium. *Lithos* 154, 193–209. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2012.07.013>.
- Lee C.T.A., Luffi P., Chin E.J., 2011. Building and destroying continental mantle. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 39, 59–90. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-040610-133505>.
- Lehtonen M.L., O'Brien H.E., Peltonen P., Johanson B.S., Pakkanen L.K., 2004. Layered mantle at the Karelian Craton margin: P–T of mantle xenocrysts and xenoliths from the Kaavi–Kuopio kimberlites, Finland. *Lithos* 77 (1–4), 593–608. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2004.04.026>.
- Liu J., Rudnick R.L., Walker R.J., Gao S., Wu F.-Y., Piccoli P.M., Yuan H., Xu W.-L., Xu Y.-G., 2011. Mapping lithospheric boundaries using Os isotopes of mantle xenoliths: An example from the North China Craton. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 75 (13), 3881–3902. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2004.04.026>.
- Logvinova A.M., Taylor L.A., Floss C., Sobolev N.V., 2005. Geochemistry of multiple diamond inclusions of harzburgitic garnets as examined in situ. *International Geology Review* 47 (12), 1223–1233. <https://doi.org/10.2747/0020-6814.47.12.1223>.

- Malkovets V.G., Griffin W.L., O'Reilly S.Y., Wood B.J., 2007. Diamond, subcalcic garnet, and mantle metasomatism: Kimberlite sampling patterns define the link. *Geology* 35 (4), 339–342. <https://doi.org/10.1130/G23092A.1>.
- Malygina E.V., 2000. Mineralogy of Xenoliths of Granular Peridotites from the Udachnaya Kimberlite Pipe in Connection to the Problem of the Upper Mantle Composition of the Siberian Platform. PhD Thesis (Candidate of Geology and Mineralogy). UGM SB RAS, Novosibirsk, 195 p. (in Russian) [Малыгина Е.В. Минералогия ксенолитов зернистых перидотитов из кимберлитовой трубки Удачная в связи с проблемой состава верхней мантии Сибирской платформы: Дис. ... канд. геол.-мин. наук. Новосибирск: ИГМ СО РАН, 2000. 195 с.].
- Manikyamba C., Kerrich R., 2012. Eastern Dharwar Craton, India: continental lithosphere growth by accretion of diverse plume and arc terranes. *Geoscience Frontiers* 3 (3), 225–240. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2011.11.009>.
- Manning C.E., 2004. The chemistry of subduction-zone fluids. *Earth and Planetary Science Letters* 223 (1–2), 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2004.04.030>.
- McDonough W.F., Sun S.S., 1995. The composition of the Earth. *Chemical Geology* 120 (3–4), 223–253. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(94\)00140-4](https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)00140-4).
- McGregor I.D., 1974. The system MgO-SiO₂-Al₂O₃: solubility of Al₂O₃ in enstatite for spinel and garnet peridotite compositions. *American Mineralogist* 59 (11), 110–119.
- McKenzie D., Priestley K., 2008. The influence of lithospheric thickness variations on continental evolution. *Lithos* 102 (1–2), 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2007.05.005>.
- Mei S., Bai W., Hiraga T., Kohlstedt D.L., 2002. Influence of melt on the creep behavior of olivine-basalt aggregates under hydrous conditions. *Earth and Planetary Science Letters* 201 (3–4), 491–507. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(02\)00745-8](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(02)00745-8).
- Misra K.C., Anand M., Taylor L.A., Sobolev N.V., 2004. Multi-stage metasomatism of diamondiferous eclogite xenoliths from the Udachnaya kimberlite pipe, Yakutia, Siberia. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 146 (6), 696–714. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2004.03.026>.
- Nickel K.G., Green D.H., 1985. Empirical geothermobarometry for garnet peridotites and implications for the nature of the lithosphere, kimberlites and diamonds. *Earth and Planetary Science Letters* 73 (1), 158–170. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(85\)90043-3](https://doi.org/10.1016/0012-821X(85)90043-3).
- Nicolas A., Dupuy C., 1984. Origin of ophiolitic and oceanic lherzolites. *Tectonophysics* 110 (3–4), 177–187. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(84\)90259-2](https://doi.org/10.1016/0040-1951(84)90259-2).
- Nimis P., Kuzmin D.V., Malkovets V., 2016. Error sources in single-clinopyroxene thermobarometry and a mantle geotherm for the Novinka kimberlite, Yakutia. *American Mineralogist* 101 (10), 2222–2232. <https://doi.org/10.2138/am-2016-5540>.
- Nimis P., Taylor W.R., 2000. Single clinopyroxene thermobarometry for garnet peridotites. Part I. Calibration and testing of a Cr-in-Cpx barometer and an enstatite-in-Cpx thermometer. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 139 (5), 541–554. <https://doi.org/10.1007/s004100000156>.
- Nimis P., Zanetti A., Dencker I., Sobolev N.V., 2009. Major and trace element composition of chromian diopsides from the Zagadochnaya kimberlite (Yakutia, Russia): Metasomatic processes, thermobarometry and diamond potential. *Lithos* 112 (3–4), 397–412. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2009.03.038>.
- Oleynikov O.B., 2000. Xenoliths of deep serpentinized alkaline ultrabasic rocks from the Yubileynaya kimberlite pipe. *Otechestvennaya Geologia (Russian Geology)* (5), 74–76 (in Russian) [Олейников О.Б. Ксенолиты глубинных серпентинизированных щелочно-ультраосновных пород из кимберлитовой трубки Юбилейная // Отечественная геология. 2000. № 5. С. 74–76].
- O'Neill H.S.C., Pownceby M.L., Wall V.J., 1988. Ilmenite-rutile-iron and ulvospinel-ilmenite-iron equilibria and the thermochemistry of ilmenite (FeTiO₃) and ulvospinel (Fe₂TiO₄). *Geochimica et Cosmochimica Acta* 52 (8), 2065–2072. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(88\)90185-8](https://doi.org/10.1016/0016-7037(88)90185-8).
- O'Neill H.S.C., Wall V.J., 1987. The olivine-orthopyroxene-spinel oxygen geobarometer, the nickel precipitation curve, and the oxygen fugacity of the Earth's upper mantle. *Journal of Petrology* 28 (6), 1169–1191. <https://doi.org/10.1093/petrology/28.6.1169>.
- O'Neill H.S.C., Wood B.J., 1979. An experimental study of Fe-Mg partitioning between garnet and olivine and its calibration as a geothermometer. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 70 (1), 59–70. <https://doi.org/10.1007/BF00371872>.
- O'Reilly S.Y., Zhang M., Griffin W.L., Begg G., Hronsky J., 2009. Ultradeep continental roots and their oceanic remnants: A solution to the geochemical “mantle reservoir” problem? *Lithos* 112 (Supplement 2), 1043–1054. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2009.04.028>.
- Ovchinnikov Yu.I., 1990. Deep Xenoliths of the Obnazhennaya Kimberlite Pipe and Basalts of the Minusinsk Depression: PhD Thesis (Candidate of Geology and Mineralogy). UIGGM SB RAS, Novosibirsk, 225 p. (in Russian) [Овчинников Ю.И. Глубинные ксенолиты кимберлитовой трубки Обнаженная и базальтов Минусинской впадины: Дис. ... канд. геол.-мин. наук. Новосибирск: ОИГГМ СО РАН, 1990. 225 с.].
- Parkinson I.J., Pearce J.A., 1998. Peridotites from the Izu-Bonin-Mariana forearc (ODP Leg 125): evidence for mantle melting and melt-mantle interaction in a supra-subduction zone setting. *Journal of Petrology* 39 (9), 1577–1618. <https://doi.org/10.1093/ptro/39.9.1577>.

- Pavlenkova N.I., 2011. Seismic structure of the upper mantle along the long-range PNE profiles – rheological implication. *Tectonophysics* 508 (1–4), 85–95. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2010.11.007>.
- Pearson D.G., 1999. The age of continental roots. In: R.D. van der Hilst, W.F. McDonough (Eds.), *Composition, deep structure and evolution of continents*. Developments in Geotectonics, vol. 24, p. 171–194. [https://doi.org/10.1016/S0024-4937\(99\)00026-2](https://doi.org/10.1016/S0024-4937(99)00026-2).
- Pearson D.G., Irvine G.J., Carlson R.W., Kopylova M.G., Ionov D.A., 2002. The development of lithospheric keels beneath the earliest continents: time constraints using PGE and Re-Os isotope systematics. In: C.M.R. Fowler, C.J. Ebinger, C.J. Hawkesworth (Eds.), *The Early Earth: physical, chemical and biological development*. Geological Society, London, Special Publications, vol. 199, p. 65–90. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2002.199.01.04>.
- Pearson D.G., Snyder G.A., Shirey S.B., Taylor L.A., Carlson R.W., Sobolev N.V., 1995. Archaean Re–Os age for Siberian eclogites and constraints on Archaean tectonics. *Nature* 374 (6524), 711–713. <https://doi.org/10.1038/374711a0>.
- Perchuk A.L., Safonov O.G., Smit C.A., van Reenen D.D., Zakharov V.S., Gerya T.V., 2018. Precambrian ultra-hot orogenic factory: Making and reworking of continental crust. *Tectonophysics* 746, 572–586. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2016.11.041>.
- Pernet-Fisher J.F., Howarth G.H., Liu Y., Barry P.H., Carmody L., Valley J.W., Bodnar R.J., Spetsius Z.V., Taylor L.A., 2014. Komsomolskaya diamondiferous eclogites: evidence for oceanic crustal protoliths. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 167 (3), 981. <https://doi.org/10.1007/s00410-014-0981-y>.
- Pokhilenko N.P., Agashev A.M., Litasov K.D., Pokhilenko L.N., 2015. Carbonatite metasomatism of peridotite lithospheric mantle: implications for diamond formation and carbonatite-kimberlite magmatism. *Russian Geology and Geophysics* 56 (1–2), 280–295. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2015.01.020>.
- Pokhilenko N.P., Pearson D.G., Boyd F.R., Sobolev N.V., 1991. Megacrystalline dunites: sources of Siberian diamonds. *Carnegie Institute Washington Yearbook* 90, 11–18.
- Pokhilenko N.P., Sobolev N.V., Chernyi S.D., Yanygin Yu.T., 2000. Pyropes and chromites from kimberlites in the Nakyn Field (Yakutia) and Snipe Lake District (Slave River Region, Canada): evidence for anomalous structure of the lithosphere. *Doklady Earth Sciences* 372 (4), 638–642.
- Pokhilenko N.P., Sobolev N.V., Sobolev V.S., Lavrent'ev Yu.G., 1976. Xenolith of diamond-bearing ilmenite-pyrope hercynite from the Udachnaya pipe (Yakutia). *Doklady AN SSSR* 231 (2), 438–441 (in Russian) [Похиленко Н.П., Соболев Н.В., Соболев В.С., Лаврентьев Ю.Г. Ксенолит алмазонасных ильменитовых пироповых дерцолитов из кимберлитовой трубки Удачная // Доклады АН СССР. 1976. Т. 231. № 2. С. 438–441].
- Pollack H.N., Chapman D.S., 1977. On the regional variation of heat flow, geotherms, and lithospheric thickness. *Tectonophysics* 38 (3–4), 279–296. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(77\)90215-3](https://doi.org/10.1016/0040-1951(77)90215-3).
- Ponomarenko A.I., Sobolev N.V., Pokhilenko N.P., Lavrentiev Yu.G., Sobolev V.S., 1976. Diamondiferous grosspidite and diamondiferous dystenic eclogites from the Udachnaya kimberlite pipe, Yakutia. *Doklady AN SSSR* 226 (4), 927–930 (in Russian) [Пономаренко А.И., Соболев Н.В., Похиленко Н.П., Лаврентьев Ю.Г., Соболев В.С. Алмазонасний гросспидит и алмазонасные дистеновые эклогиты из кимберлитовой трубки «Удачная», Якутия // Доклады АН СССР. 1976. Т. 226. № 4. С. 927–930].
- Pouchou J.L., Pichoir F., 1984. A new model for quantitative X-ray microanalysis. Part I: application to the analysis of homogeneous samples. *Recherche Aerospatiale* 3, 167–192.
- Riches A.J.V., Liu Y., Day J.M.D., Spetsius Z.V., Taylor L.A., 2010. Subducted oceanic crust as diamond hosts revealed by garnets of mantle xenoliths from Nyurbinskaya, Siberia. *Lithos* 120 (3–4), 368–378. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2010.09.006>.
- Roden M.F., Patiño-Douce A.E., Jagoutz E., Laz'ko E.E., 2006. High pressure petrogenesis of Mg-rich garnet pyroxenites from Mir kimberlite, Russia. *Lithos* 90 (1–2), 77–91. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2006.01.005>.
- Rodionov A.S., Pokhilenko N.P., Sobolev N.V., 1984. Comparative characteristics of the main minerals of the concentrates of two types from the Dalnyaya kimberlite pipe. *Geologiya i Geofizika (Russian Geology and Geophysics)* 25 (5), 38–50 (in Russian) [Родионов А.С., Похиленко Н.П., Соболев Н.В. Сравнительная характеристика главнейших минералов концентрата двух разновидностей кимберлита трубки Дальняя // Геология и геофизика. 1984. Т. 25. № 5. С. 38–50].
- Rosen O.M., 2003. The Siberian craton: tectonic zonation and stages of evolution. *Geotectonics* 37 (3), 175–192.
- Rosen O.M., Levskii L.K., Zhuravlev D.Z., Rotman A.Ya., Spetsius Z.V., Makeev A.F., Zinchuk N.N., Manakov A.V., Serenko V.P., 2006. Paleoproterozoic accretion in the northeast Siberian craton: isotopic dating of the Anabar collision system. *Stratigraphy and Geological Correlation* 14 (6), 581–601. <https://doi.org/10.1134/S0869593806060013>.
- Rosen O.M., Manakov A.V., Zinchuk N.N., 2006. Siberian Craton: Formation, and Diamond Content. Nauchny Mir, Moscow, 212 p. (in Russian) [Розен О.М., Манакоев А.В., Зинчук Н.Н. Сибирский кратон: формирование, алмазонасность. М.: Научный мир, 2006. 212 с.].
- Rosen O.M., Serenko V.P., Spetsius Z.V., Manakov A.V., Zinchuk N.N., 2002. Yakutian kimberlite province: position in the structure of the Siberian craton and composition of the upper and lower crust. *Geologiya i Geofizika (Russian Geology and Geophysics)* 43 (1), 3–26.

- Ryan C.G., Griffin W.L., Pearson N.J., 1996. Garnet geotherms: Pressure-temperature data from Cr-pyrope garnet xenocrysts in volcanic rocks. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 101 (B3), 5611–5625. <https://doi.org/10.1029/95JB03207>.
- Santosh M., Maruyama S., Yamamoto S., 2009. The making and breaking of supercontinents: some speculations based on superplumes, super downwelling and the role of tectosphere. *Gondwana Research* 15 (3–4), 324–341. <https://doi.org/10.1016/j.jgr.2008.11.004>.
- Sekerin A.P., Menshagin Yu.V., Laschenov V.A., 1988. Alkaline-ultrabasic rocks and carbonatites of the Eastern Sayan region. *Doklady AN SSSR* 299 (3), 711–714 (in Russian) [Секерин А.П., Меньшагин Ю.В., Лащенко В.А. Щелочно-ультраосновные породы и карбонатиты Восточного Саяна // Доклады АН СССР. 1988. Т. 299. № 3. С. 711–714].
- Sekerin A.P., Menshagin Yu.V., Lashchenov V.A., 1993. Precambrian lamproites of the Sayan region. *Doklady AN SSSR* 329 (3), 328–331 (in Russian) [Секерин А.П., Меньшагин Ю.В., Лащенко В.А. Докембрийские лампроиты Присяня // Доклады АН. 1993. Т. 329. № 3. С. 328–331].
- Shatsky V.S., Zedgenizov D.A., Ragozin A.L., Kalinina V.V., 2015. Diamondiferous subcontinental lithospheric mantle of the northeastern Siberian Craton: Evidence from mineral inclusions in alluvial diamonds. *Gondwana Research* 28 (1), 106–120. <https://doi.org/10.1016/j.jgr.2014.03.018>.
- Smelov A.P., Andreev A.P., Altukhova Z.A., Babushkina S.A., Bekrenev K.A., Zaitsev A.I., Izbekov E.D., Koroleva O.V., Mishnin V.M., Okrugin A.V., Oleinikov O.B., Surnin A.A., 2010. Kimberlites of the Manchary pipe: a new kimberlite field in Central Yakutia. *Russian Geology and Geophysics* 51 (1), 121–126. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2009.12.012>.
- Smelov A.P., Ashchepkov I.V., Oleinikov O.B., Surnin A.A., Babushkina S.A., Polufuntikova L.L., Koroleva O.V., 2009. Chemical composition and PT conditions for the formation of barophilic minerals of the Manchary kimberlite pipe (Central Yakutia). *Otechestvennaya Geologia (Russian Geology)* (5), 27–31 (in Russian) [Смелов А.П., Ащепков И.В., Олейников О.Б., Сурнин А.А., Бабушкина С.А., Полуфунтикова Л.И., Королева О.В. Химический состав и P-T условия образования барофильных минералов из кимберлитовой трубки Манчары (Центральная Якутия) // Отечественная геология. 2009. № 5. С. 27–31].
- Smelov A.P., Biller A.Ya., Zaitsev A.I., 2011. Ratio of different crystal-morphological types of diamond in tuffites of the Carnian tier of the north-eastern part of the Yakutia kimberlite province. *Otechestvennaya Geologia (Russian Geology)* (5), 50–55 (in Russian) [Смелов А.П., Биллер А.Я., Зайцев А.И. Соотношение различных кристалло-морфологических типов алмаза в туффитах карнийского яруса северо-восточной части Якутской кимберлитовой провинции // Отечественная геология. 2011. № 5. С. 50–55].
- Smelov A.P., Kotov A.B., Sal'nikova E.B., Kovach V.P., Beryozkin V.I., Kravchenko A.A., Dobretsov V.N., Velikoslavinskii S.D., Yakovleva S.Z., 2012. Age and duration of the formation of the Billyakh tectonic melange zone, Anabar shield. *Petrology* 20 (3), 286–300. <https://doi.org/10.1134/S0869591112030058>.
- Smelov A.P., Kovach V.P., Gabyshev V.D., 1998. Tectonic structure and age of the basement of the eastern part of the North Asian craton. *Otechestvennaya Geologia (Russian Geology)* (6), 6–10 (in Russian) [Смелов А.П., Ковач В.П., Габышев В.Д. Тектоническое строение и возраст фундамента восточной части Северо-Азиатского кратона // Отечественная геология. 1998. № 6. С. 6–10].
- Smelov A.P., Zaitsev A.I., 2013. The age and localization of kimberlite magmatism in the Yakutian kimberlite province: constraints from isotope geochronology – an overview. In: D.G. Pearson et al. (Eds.), *Proceedings of 10th International Kimberlite Conference, vol. 1 (Special Issue of the Journal of the Geological Society of India)*, p. 225–234. https://doi.org/10.1007/978-81-322-1170-9_14.
- Smith C.B., Pearson D.G., Bulanova G.P., Beard A.D., Carlson R.W., Wittig N., Sims K., Chimuka L., Muchemwa E., 2009. Extremely depleted lithospheric mantle and diamonds beneath the southern Zimbabwe Craton. *Lithos* 112 (Supplement 2), 1120–1132. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2009.05.013>.
- Snyder D.B., 2008. Stacked uppermost mantle layers within the Slave craton of NW Canada as defined by anisotropic seismic discontinuities. *Tectonics* 27 (4), TC4006. <https://doi.org/10.1029/2007TC002132>.
- Snyder D.B., Humphreys E., Pearson D.G., 2017. Construction and destruction of some North American cratons. *Tectonophysics* 694, 464–485. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2016.11.032>.
- Snyder G.A., Taylor L.A., Crozaz G., Halliday A.N., Beard B.L., Sobolev V.N., Sobolev N.V., 1997. The origins of Yakutian eclogite xenoliths. *Journal of Petrology* 38 (1), 85–113. <https://doi.org/10.1093/ptro/38.1.85>.
- Sobolev N.V., 1974. Deep Inclusions in Kimberlites and the Problem of the Upper Mantle Composition. Nauka, Novosibirsk, 264 p. (in Russian) [Соболев Н.В. Глубинные включения в кимберлитах и проблема состава верхней мантии. Новосибирск: Наука, 1974. 264 с.].
- Sobolev N.V., Lavrent'ev Y.G., Pokhilenko N.P., Usova L.V., 1973. Chrome-rich garnets from the kimberlites of Yakutia and their parageneses. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 40 (1), 39–52. <https://doi.org/10.1007/BF00371762>.
- Sobolev N.V., Logvinova A.M., Nikolenko E.I., Lobanov S.S., 2013. Mineralogical criteria for the diamond potential of Upper Triassic placers on the northeastern margin of the Siberian Platform. *Russian Geology and Geophysics* 54 (8), 903–916. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2013.07.010>.
- Sobolev N.V., Logvinova A.M., Zedgenizov D.A., Seryotkin Y.V., Yefimova E.S., Floss C., Taylor L.A., 2004. Mineral inclusions in microdiamonds and macrodiamonds from kimberlites of Yakutia: a comparative study. *Lithos* 77 (1–4), 225–242. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2004.04.001>.

- Sobolev N.V., Pokhilenko N.V., Efimova E.S., 1984. Xenoliths of diamond bearing peridotites in kimberlites and problem of the diamond origin. *Geologiya i Geofizika (Soviet Geology and Geophysics)* 25 (12), 63–80 (in Russian) [Соболев Н.В., Похиленко Н.П., Ефимова Э.С. Ксенолиты алмазных перидотитов в кимберлитах и проблема происхождения алмазов // *Геология и геофизика*. 1984. Т. 25. № 12. С. 63–80].
- Sobolev N.V., Pustyntsev V.I., Kuznetsova I.K., Khar'kiv A.D., 1970. New data on the mineralogy of the diamond-bearing eclogites from the "Mir" pipe (Yakutia). *International Geology Review* 12 (6), 657–659. <https://doi.org/10.1080/00206817009475272>.
- Sobolev N.V., Sobolev V.N., Snyder G.A., Yefimova E.S., Taylor L.A., 1999. Significance of eclogitic and related parageneses of natural diamonds. *International Geology Review* 41 (2), 129–140. <https://doi.org/10.1080/00206819909465135>.
- Sobolev V.S., Sobolev N.V., 1967. About chromium and chromium-containing minerals in deep xenoliths of kimberlite pipes. *Geologiya Rudnykh Mestorozhdeniy (Geology of Ore Deposits)* (2), 18–37 (in Russian) [Соболев В.С., Соболев Н.В. О хrome и хромсодержащих минералах в глубоких ксенолитах кимберлитовых трубок // *Геология рудных месторождений*. 1967. № 2. С. 18–37].
- Spetsius Z.V., 2004. Petrology of highly aluminous xenoliths from kimberlites of Yakutia. *Lithos* 77 (1–4), 525–538. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2004.04.021>.
- Spetsius Z.V., Belousova E.A., Griffin W.L., O'Reilly S.Y., Pearson N.J., 2002. Archean sulfide inclusions in Paleozoic zircon megacrysts from the Mir kimberlite, Yakutia: implications for the dating of diamonds. *Earth and Planetary Science Letters* 199 (1–2), 111–126. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2004.04.021>.
- Spetsius Z.V., Serenko V.P., 1990. Composition of the Continental Mantle and Lower Crust beneath the Siberian Platform. Nauka, Moscow, 271 p. (in Russian) [Спеццус З.В., Серенко В.П. Состав континентальной мантии и нижней коры под Сибирской платформой. М.: Наука, 1990. 271 с.].
- Spetsius Z.V., Taylor L.A., Valley J.W., Deangelis M.T., Spicuzza M., Ivanov A.S., Banzeruk V.I., 2008. Diamondiferous xenoliths from crustal subduction: garnet oxygen isotopes from the Nyurbinskaya pipe, Yakutia. *European Journal of Mineralogy* 20 (3), 375–385. <https://doi.org/10.1127/0935-1221/2008/0020-1828>.
- Stachel T., Viljoen K.S., McDade P., Harris J.W., 2004. Diamondiferous lithospheric roots along the western margin of the Kalahari Craton – the peridotitic inclusion suite in diamonds from Orapa and Jwaneng. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 147 (1), 32–47. <https://doi.org/10.1007/s00410-003-0535-1>.
- Sun J., Liu C.-Z., Tappe S., Kostrovitsky S.I., Wu F.-Y., Yakovlev D., Yang Y.-H., Yang J.-H., 2014. Repeated kimberlite magmatism beneath Yakutia and its relationship to Siberian flood volcanism: Insights from in situ U–Pb and Sr–Nd perovskite isotope analysis. *Earth and Planetary Science Letters* 404, 283–295. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2014.07.039>.
- Sun J., Tappe S., Kostrovitsky S.I., Liu C.-Z., Skuzovatov S.Y., Wu F.-Y., 2018. Mantle sources of kimberlites through time: A U–Pb and Lu–Hf isotope study of zircon megacrysts from the Siberian diamond fields. *Chemical Geology* 479, 228–240. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2018.01.013>.
- Suvorov V.D., Mel'nik E.A., Mishen'kina Z.R., Pavlov E.V., Kochnev V.A., 2013. Seismic inhomogeneities in the upper mantle beneath the Siberian craton (Meteorite profile). *Russian Geology and Geophysics* 54 (9), 1108–1120. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2013.07.023>.
- Suvorov V.D., Melnik E.A., Thybo H., Perchuc E., Parasotka B.S., 2006. Seismic velocity model of the crust and uppermost mantle around the Mirnyi kimberlite field in Siberia. *Tectonophysics* 420 (1–2), 49–73. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2006.01.009>.
- Suvorov V.D., Yurin Yu.A., Parasotka B.S., 1994. The structure of the lower crust and the mantle top in the western part of the Yakutia kimberlite province (according to the deep seismic sounding data). *Geologiya i Geofizika (Russian Geology and Geophysics)* 35 (11), 126–133 (in Russian) [Суворов В.Д., Юрин Ю.А., Парасотка Б.С. Структура нижней части земной коры и верхов мантии западной части Якутской кимберлитовой провинции (по данным ГСЗ) // *Геология и геофизика*. 1994. Т. 35. № 11. С. 126–133].
- Tappe S., Foley S.F., Jenner G.A., Heaman L.M., Kjarsgaard B.A., Romer R.L., Stracke A., Joyce N., Hoefs J., 2006. Genesis of ultramafic lamprophyres and carbonatites at Aillik Bay, Labrador: a consequence of incipient lithospheric thinning beneath the North Atlantic craton. *Journal of Petrology* 47 (7), 1261–1315. <https://doi.org/10.1093/petrology/egl008>.
- Taylor L.A., Snyder G.A., Keller R., Remley D.A., Anand M., Wiesli R., Valley J., Sobolev N.V., 2003. Petrogenesis of group A eclogites and websterites: evidence from the Obnazhennaya kimberlite, Yakutia. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 145 (4), 424–443. <https://doi.org/10.1007/s00410-003-0465-y>.
- Taylor W.R., Kammerman M., Hamilton R., 1998. New thermometer and oxygen fugacity sensor calibrations for ilmenite and chromium spinel-bearing peridotitic assemblages. In: 7th International kimberlite conference. Extended abstracts. Cape Town, p. 891–901.
- Tolstov A.V., Minin V.A., Vasilenko V.B., Kuznetsova L.G., Razumov A.N., 2009. A new body of highly diamondiferous kimberlites in the Nakyn field of the Yakutian kimberlite province. *Russian Geology and Geophysics* 50 (3), 162–173. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2008.09.001>.
- Van Hunen J., van den Berg A.P., 2008. Plate tectonics on the early Earth: Limitations imposed by strength and buoyancy of subducted lithosphere. *Lithos* 103 (1–2), 217–235. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2007.09.016>.

- Vladimirov B.M., Volyanyuk N.Ya., Ponomarenko A.I., 1976. Deep Inclusions in Kimberlites, Basalts and Kimberlite-Like Rocks. Nauka, Moscow, 284 p. (in Russian) [Владимиров Б.М., Волянюк Н.Я., Пономаренко А.И. Глубинные включения из кимберлитов, базальтов и кимберлитоподобных пород. М.: Наука, 1976. 284 с.].
- Wyllie P.J., Ryabchikov I.D., 2000. Volatile components, magmas and critical fluids in upwelling mantle. *Journal of Petrology* 41 (7), 1195–1206. <https://doi.org/10.1093/petrology/41.7.1195>.
- Zaitsev A.I., Smelov A.P., 2010. Isotopic Geochronology of Rocks of the Kimberlite Formation of the Yakutia Province. Institute of Geology of Diamond and Precious Metals SB RAS, Yakutsk, 105 p. (in Russian) [Зайцев А.И., Смелов А.П. Изотопная геохронология пород кимберлитовой формации Якутской провинции. Якутск: Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, 2010. 105 с.].


СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ | INFORMATION ABOUT AUTHORS

Игорь Викторович Ащепков

канд. геол.-мин. наук, с.н.с.

Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН
630090, Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, Россия

✉ e-mail: igor.ashchepkov@igm.nsc.ru

 <https://orcid.org/0000-0003-3985-7661>

Igor V. Ashchepkov

Candidate of Geology and Mineralogy, Senior Researcher

V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of RAS
3 Academician Koptyug ave., Novosibirsk 630090, Russia

Александр Сергеевич Иванов

в.н.с.

Научно-исследовательское геологоразведочное
предприятие АК «АЛРОСА» (ПАО)
678174, Мирный, Чернышевское шоссе, 16, Россия

e-mail: IvanovAS@alrosa.ru

Aleksandr S. Ivanov

Lead Researcher

Geological Enterprise of Exploration, Public Joint Stock Company «ALROSA»
16 Chernychevskoe highway, Mirny 678174, Russia

Сергей Иванович Костровицкий

докт. геол.-мин. наук, в.н.с.

Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН
664033, Иркутск, ул. Фаворского, 1А, Россия

Институт земной коры СО РАН
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия

e-mail: serkost@igc.irk.ru

Sergei I. Kostrovitsky

Doctor of Geology and Mineralogy, Lead Researcher

A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry, Siberian Branch of RAS
1A Favorsky street, Irkutsk 664033, Russia

Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of RAS
128 Lermontov street, Irkutsk 664033, Russia

Михаил Анатольевич Вавилов

ведущий инженер

Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН
630090, Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, Россия

e-mail: mav@igm.nsc.ru

Mikhail A. Vavilov

Lead Engineer

V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of RAS
3 Academician Koptyug ave., Novosibirsk 630090, Russia


Светлана Анатольевна Бабушкина

канд. геол.-мин. наук, с.н.с.

Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН
677007, Республика Саха (Якутия), Якутск, пр. Ленина, 39, Россия

Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова
677000, Республика Саха (Якутия), Якутск, ул. Белинского, 58, Россия

e-mail: ssta@list.ru; sa.babushkina@s-vfu.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-4806-7744>

Svetlana A. Babushkina

Candidate of Geology and Mineralogy, Senior Researcher

Institute of Diamond and Precious Metals Geology, Siberian Branch of RAS
39 Lenin avenue, Yakutsk 677007, Sakha (Yakutia) Republic, Russia

M.K. Ammosov North-Eastern Federal University
58 Belinsky street, Yakutsk 677000, Sakha (Yakutia) Republic, Russia

Николай Васильевич Владыкин

докт. геол.-мин. наук

Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН
664033, Иркутск, ул. Фаворского, 1А, Россия

e-mail: vlad@igc.irk.ru

Nikolai V. Vladykin

Doctor of Geology and Mineralogy

A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry, Siberian Branch of RAS
1A Favorsky street, Irkutsk 664033, Russia

Николай Сергеевич Тычков

канд. геол.-мин. наук, с.н.с., заведующий лабораторией

Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН
630090, Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, Россия

e-mail: tych@igm.nsc.ru

Nikolai S. Tychkov

Candidate of Geology and Mineralogy, Senior Researcher, Head of Laboratory

V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of RAS
3 Academician Koptyug ave., Novosibirsk 630090, Russia

Николай Сергеевич Медведев

канд. хим. наук

Институт неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН
630090, Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 3, Россия

e-mail: medvedev@niic.nsc.ru

 <https://orcid.org/0000-0003-2783-071X>

Nikolai S. Medvedev

Candidate of Chemistry

A.V. Nikolaev Institute of Inorganic Chemistry, Siberian Branch of RAS
3 Academician Lavrentiev ave., Novosibirsk 630090, Russia