Минералого-геохимическое исследование и классификационные признаки железного метеорита с силикатными включениями Маслянино

Пономарев Д. С., Литасов К. Д., Исикава А. н., Бажан И. С., Хирата Т. н., Подгорных Н. М.

Аннотация

В работе впервые детально описана минералогия и микроэлементный состав минералов железного метеорита Маслянино и обоснована его классификация. По структуре метеорит относится к тонкоструктурным октаэдритам. В металлической матрице выделяются камасит, тэнит и шрейберзит. Крупные выделения троилита связаны с силикатными включениями, кроме этого обнаружены редкие минералы – алтаит и добреелит. В состав силикатных включений входят оливин, ортопироксен, клинопироксен, плагиоклаз, апатит, мерриллит, хромит и графит. Детальный микроэлементный анализ металла позволил отнести метеорит Маслянино к узкой подгруппе Pitts внутри группы IAB, а также отметить сходство с подгруппой Udei Station. Обе подгруппы включают метеориты с силикатными включениями и занимают промежуточное положение между подгруппами sLL (низкие содержания Au и Ni) и sLM (низкие содержания Au и средние Ni). Скорость остывания метеорита Маслянино по металлографическим данным составляет 30–60 оС/млн. лет. Полученные данные согласуются с образованием вещества метеорита Маслянино в результате ударного события, которое привело к удалению внешней хондритно-винонаитовой оболочки. Из оставшейся части родительского астероида в результате последующих более мелких ударных событий образовались метеориты группы IAB (включая метеориты с силикатными включениями) и винонаиты.

Ключевые слова:

УДК 552.61, 523.681

Минералого-геохимическое исследование и классификационные признаки железного метеорита с силикатными включениями Маслянино

Д.С. Пономарев[1,2], К.Д. Литасов[1,2], А. Исикава[3], И.С. Бажан[1], Т. Хирата[3], Н.М. Подгорных[1]

[1]Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, 630090, Россия

[2]Новосибирский государственный университет, Новосибирск, 630090, Россия

[3]Токийский университет, Токио, Япония

АННОТАЦИЯ

В работе впервые детально описана минералогия и микроэлементный состав минералов железного метеорита Маслянино и обоснована его классификация. По структуре метеорит относится к тонкоструктурным октаэдритам. В металлической матрице выделяются камасит, тэнит и шрейберзит. Крупные выделения троилита связаны с силикатными включениями, кроме этого обнаружены редкие минералы – алтаит и добреелит. В состав силикатных включений входят оливин, ортопироксен, клинопироксен, плагиоклаз, апатит, мерриллит, хромит и графит. Детальный микроэлементный анализ металла позволил отнести метеорит Маслянино к узкой подгруппе Pitts внутри группы IAB, а также отметить сходство с подгруппой Udei Station. Обе подгруппы включают метеориты с силикатными включениями и занимают промежуточное положение между подгруппами sLL (низкие содержания Au и Ni) и sLM (низкие содержания Au и средние Ni). Скорость остывания метеорита Маслянино по металлографическим данным составляет 30–60 ºС/млн. лет. Полученные данные согласуются с образованием вещества метеорита Маслянино в результате ударного события, которое привело к удалению внешней хондритно-винонаитовой оболочки. Из оставшейся части родительского астероида в результате последующих более мелких ударных событий образовались метеориты группы IAB (включая метеориты с силикатными включениями) и винонаиты.

Ключевые слова: железный метеорит, камасит, тэнит, силикатные включения, оливин, пироксен, фосфаты, кристаллизация, ударный метаморфизм, астероиды.

ВВЕДЕНИЕ

Данные, получаемые при исследовании метеоритов, помогают определить состав вещества и охарактеризовать геологические процессы в Солнечной системе на различных этапах ее эволюции. Нередко метеориты несут информацию и о составе вещества за пределами Солнечной системы. Большой интерес представляют железные метеориты с силикатными включениями, поскольку они несут возможность датирования и выявления физико-химических и петрогенетических связей между железными и каменными метеоритами, то есть между железным ядром и силикатной оболочкой планетезималей.

Большинство железных метеоритов с силикатными включениями относятся к группам IAB (включая группу IIICD) и IIE [Bunch et al., 1970; Kracher, 1985; Benedix et al., 2000; Ruzicka, 2014]. Силикаты в этих метеоритах могут составлять до 50 об.%. Включения имеют состав от хондритового до дифференцированного, с появлением минеральных ассоциаций, характерных для базальтов, андезитов и даже кислых пород [Ruzicka, 2014]. Ранее предлагалось происхождение метеоритов группы IAB в результате ударного метаморфизма и частичного плавления [Wasson et al., 1980; Choi et al., 1995; Wasson, Kallemeyn, 2002], в результате неравновесной кристаллизации на границе ядро-мантия [Takeda et al., 2000] и ряд промежуточных моделей. Наиболее обоснована гипотеза гибридного происхождения с распадом частично дифференцированного не до конца застывшего тела в результате ударных событий и его последующей неравновесной аккреции с образованием фрагментов различного состава [Benedix et al., 2000; Benedix et al., 2005; Ruzicka, 2014].

Материалом для исследования в данной работе послужили фрагменты метеорита Маслянино из фондов Центрального Сибирского геологического музея, Новосибирск. Метеорит Маслянино (весом около 26 кг) был найден 25 мая 1992 г. в районе одноименного поселка Новосибирской области [Хотинок, 1993]. Позднее были найдены другие фрагменты общим весом около 100 кг. Первичная характеристика по валовому составу металла (Ni = 12.4 мас.%, Ga = 29 ppm, Ge = 70 ppm, Ir = 1.0 ppm) позволила отнести его к группе железных метеоритов IAB [Wlotzka, 1995]. Нами была поставлена цель провести детальное минералого-геохимическое исследование метеорита Маслянино для уточнения его классификации и выявления особенностей петрогенезиса.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Было исследовано 5 фрагментов метеорита Маслянино размером от 2 до 5 см (рис.1). Для определения модального состава и текстурно-структурных взаимоотношений минеральных фаз в метеорите использовали петрографический микроскоп Nikon Eclipse LV100n POL с камерой Nikon Digital Sight DS-U3. Для исследования микроструктуры и

определения химического состава фаз использовался метод сканирующей электронной микроскопии (Tescan MYRA 3 LMU) с энергодисперсионной приставкой X-Max-80 Oxford Instruments. В качестве стандартов использовались природные минералы и стандартные оксиды. Методика анализа детально описана в работе [Лаврентьев и др., 2015].

Микроэлементный анализ проводили методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-МС) и лазерной абляцией (ЛА) на приборе Thermo Scientific Element XR в Токийском Университете (Япония). В качестве стандарта для большинства сидерофильных элементов использовали сплав Ni-5, синтезированный в инертной атмосфере при 2700 ºС методом дуговой плавки. Состав и содержания микроэлементов в стандарте было определено тем же методом ЛА-ИСП-МС и приведены в работе [Литасов и др., 2018а]. В качестве вторичных стандартов были использованы собственные эталоны метеоритов Campo del Cielo и Guadalupe y Calvo, измеренные методом ИСП-МС в растворе (данные детального анализа стандартов будут опубликованы позднее). При анализе силикатов и фосфатов в качестве стандарта использовали базальт BCR-2G [Jochum et al., 2005] и силикатное стекло NIST-612. Интенсивность излучения Nd:ИАГ лазера составляла 50–80 мкДж/см^2. Диаметр пучка 100 мкм. Время анализа составляло 3 минуты, включая 60 секунд определения фоновых значений, 60 секунд на набор сигнала от образца и 60 секунд на снижение сигнала до фоновых значений. Стандарты снимали до и после измерения образцов метеорита.

Характеристика углеродного вещества, а также некоторых минералов проводилась методом рамановской спектрометрии в Институте геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск на приборе Horiba Jobin Yvon LabRAM HR800, совмещенном с микроскопом Olympus с 100х длиннофокусным объективом LMPLFLN. Длина волны возбуждающего Nd:ИАГ лазера – 532 нм, мощность – 15 мВ, диаметр лазерного пучка 1–2 мкм. Калибровка спектров осуществлялась относительно стандарта кремния с пиком 520.5 см$^{-1}$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Петрография метеорита Маслянино

Метеорит состоит из срастаний балок камасита и тэнита, образующих видманштеттенову структуру, и содержит большое количество силикатных включений (рис.1). Силикатные включения имеют самую разнообразную форму – от прямоугольных и угловатых выделений размером до 1–2 см (в крупных образцах) до равномернозернистой смеси с троилитом или металлом.

Балки камасита и тэнита как правило прямолинейны, но бывают слабоизогнутыми и прерывистыми (рис.2). Толщина балок тэнита в исследованных образцах варьирует от первых микрометров до 1–2 мм. Для всех образцов было рассчитано модальное соотношение тэнита и камасита в металлической части. Среднее содержание тэнита составляет 25.3±0.5 мод.%. Так как минералы имеют близкую плотность модальные соотношения для них соответствуют массовым в пределах 0.5–1.0%. Эти соотношения были использованы для определения валового микроэлементного состава металла метеорита. Силикатные включения полностью или частично окружены оторочками и крупными зернами троилита и шрейберзита. Редкими акцессорными фазами являются алтаит и добреелит.

Шрейберзит представлен в виде изометричных или удлиненных зерен. Он почти всегда встречается на границе металла и силикатными включений или троилита (рис.3а, б). Размер зерен шрейберзита достигает 2–3 мм. Также вместе с троилитом он встречается в составе округлых включений в оливине (рис.4).

Выделения троилита имеют аллотриаморфную структуру, границы зерен гладкие и обычно резко отделены от основной металлической массы трещинами, выполненными гидроксидами железа. Размер выделений троилита достигает 5 мм и более. Часто троилит служит матрицей для силикатных включений (рис.3б). В большом количестве обнаружены включения троилита в зернах силикатов (рис.4). Было обнаружено единичное выделение редкого акцессорного минерала алтаита (рис.2е). Размер найденного зерна составляет 25 мкм в длину и 5 мкм в ширину. Минерал имеет удлиненную форму и неровные края. Также алтаит выполняет трещины в хромите, отходящие от основного зерна. Ранее алтаит встречался только в двух метеоритах, которые, так же, как и Маслянино, относятся к группе IAB – Эгвекинот [Пляшкевич и др., 1980] и Мораско [Karwowski et al., 2009]. Выделения алтаита описаны отдельно в работе [Литасов и др.., 2018b]. Внутри сульфидных зерен в составе округлых включений в оливине обнаружены игольчатые кристаллы добреелита толщиной не более 3 мкм (рис.4д).

Среди минералов включений обнаружены не только силикаты: оливин, ортопироксен, клинопироксен, плагиоклаз, но и другие минералы: мерриллит, апатит, хромит, графит. Прожилки и оторочки вторичных минералов представлены в основном магнетитом и гидрооксидами железа. Для образцов Mas-1 и Mas-5 было рассчитано модальное соотношение минералов: металл (камасит+тэнит+шрейберзит) = 54–57%, силикаты и фосфаты = 20–29%, троилит = 14–21%, графит = 3–5%, шрейберзит = 1–2%. Подобные соотношения сохраняются и в крупных срезах музейных образцов метеорита размером 10–20 см.

Оливин и ортопироксен имеют изометричную, иногда полуограненную форму (рис.3). Размер зерен до 1–1.5 мм, самые мелкие не превышают первых десятков микрон. В зернах оливина часто встречаются серии включений металл-сульфидного состава (рис.4). Вокруг этих включений обнаружены оторочки более светлого оливина (рис.4б, в). Внутри оторочек также встречаются округлые включения серпентина. Также встречаются участки, сложенные эмульсионной смесью оливина, сульфида, металла и хромита, свидетельствующей об ударном плавлении этих участков (рис.4е).

Клинопироксен и плагиоклаз имеют меньшие размеры зерен до 0.3 мм и подчиненную форму выделений по отношению к оливину и ортопироксену. Плагиоклаз часто заключен внутри других минералов (графит, мерриллит, апатит) (рис.2).

Хромит обычно встречается в виде удлиненных кристаллов размером до 0.1 мм, часто зерна идиоморфные и несут следы кристаллографической огранки (рис.2г).

Мерриллит и апатит имеют аллотриаморфную форму выделения по отношению к силикатам и встречаются в виде крупных до 0.4 мм кристаллов, заполняющих пространство между силикатами и графитом (рис.3в,г). Апатит встречается гораздо реже мерриллита.

Графит рассеян по площади силикатных включений, но иногда встречается и внутри металла. Размер зерен от нескольких микрометров до 0.5 мм. Наблюдаются две формы выделений графита (рис.3г, рис.5). Первая имеет следы кристаллографической огранки клифтонита (рис.5а) – графита с кубической морфологией, часто встречаемого в железных метеоритах. Вторая имеет сглаженные очертания (рис.5б) и встречается совместно с магнетитом. Такие выделения часто имеют катаклазированную структуру со следами деформаций (рис.5б).

Химический состав минералов

Представительные составы минералов метеорита Маслянино приведены в таблицах 1 и 2. Содержания Ni в камасите составляют= 6.2–7.9 мас.%. Также обнаружены примеси Co (0.4–0.9 мас.%) и P (до 0.15 мас.%). Включения камасита из оливина содержат меньше Ni (около 5.2 мас.%). Содержания Ni в центральной части балок тэнита составляют 12.3–40.0 мас.%. Как и в камасите, присутствуют незначительные примеси Co (0.3–0.6 мас.%) и P (до 0.03 мас.%). Проведенный профильный анализ состава балок видманштеттеновых структур, показал, что на границах зерен тэнита содержание Ni резко увеличивается, достигая 49 мас. %. Тэнит в составе включений в оливине содержит в среднем около 40 мас.% Ni.

Шрейберзит содержит 34.5–37.2 мас.% Ni. Внутри включений в оливине все зерна шрейберзита имеют повышенное содержание Ni = 52–54 мас.%. Троилит имеет стехиометрический состав с небольшой примесью Cr (0.3–0.5 мас.%). Химический состав

алтаита: Pb = 60.5 мас.% и Te = 37.4 мас.%. Также присутствуют примеси Fe (1.3–2.0 мас.%) и Cr (0.4–0.6 мас. %). Добреелит ($FeCr_2S_4$) содержит примеси Mn (1.3–1.6 мас.%), Ni (0.4–0.6 мас.%) и Co (~0.1 мас.%).

Оливин в силикатных включениях имеет состав Fa_{4-6} (рис.6) со средним значением $Fa_{5.0}$. В одном из зерен вокруг округлых включений обнаружены выделения более железистого оливина Fa_{9-13} (рис.4а–в). Соответствие железистых выделений оливину было подтверждено рамановской спектроскопией. Ранее подобные оливины не описывались в железных метеоритах группы IAB. Вероятно, они образовались при реакции первичного оливина с металлическим или сульфидным расплавом, захваченным в виде эмульсионных включений.

Ромбические пироксены соответствуют составу $En_{88–94}Fs_{5–7}Wo_{1–2}$ (рис.7). Примеси других компонентов не значительны (табл.2). Клинопироксен отвечает составу $En_{53–54}Fs_{3–5}Wo_{45–46}$ (рис.7) и содержит примеси (мас.%): TiO_2 = 0.5–0.9, Al_2O_3 = 0.6–0.9, Cr_2O_3 = 0.7–1.3, MnO = 0.1–0.3, Na_2O = 0.4–0.7. Состав плагиоклаза (рис.8) – $Ab_{72–84}$ $An_{15–25}$ $Or_{3–5}$. Состав пироксенов и плагиоклазов хорошо согласуется с предыдущими данными по метеоритам группы IAB (рис. 7–8).

Хромиты имеют магнезиальность Mg#=100Mg(Mg+Fe) = 36–40 и содержат примеси MnO = 3.7–4.5 мас.% и ZnO = 1.8–2.3 мас.%. Содержания Al_2O_3 не превышают 0.2 мас.%. Состав хромита соответствует другим метеоритам группы IAB и винонаитам [Benedix et al., 1998; Benedix et al., 2005].

Химический анализ мерриллита близко соответствует формуле минерала $Ca_{18}Na_2Mg_2(PO_4)_{14}$ (табл.2). Апатит содержит небольшие примеси SiO_2, FeO и Na_2O (табл.2). Он имеет практически равное соотношение галогенов: Cl = 2.5–3.0 мас.% и F = 2.0–2.5 мас. %).

Микроэлементный состав минералов

Средний состав металла метеорита Маслянино рассчитан как среднее анализов камасита и тэнита в соотношении 75/25% (табл.3). По соотношению Ni, Ga и Ge в металле на классификационных диаграммах метеорит Маслянино располагается между полями IAB и IIICD (рис.9), которые в настоящее время объединяются в единую группу IAB. Близко к метеориту Маслянино располагается и группа IIC [Wasson, 1969], однако по содержанию еще одного классификационного элемента, Ir, она сильно отличается. Метеориты группы IIC содержат 4,4-11,0 ppm Ir, тогда как метеориты группы IAB содержат не более 3 ppm Ir (при близких концентрациях Ni в интервале 9-11 мас.%). Другие элементы в железных метеоритах группы IIC не измеряли. На диаграммах соотношения содержания Au и других элементов Ni,

Co, Ga, Ge, Cu, W в металле метеоритов группы IAB [Wasson, Kallemeyn, 2002], метеорит Маслянино попадает в область между подгруппами sLL (низкие содержания Au и Ni) и sLM (низкие содержания Au и средние содержания Ni, бывшая группа IIIC) и наиболее точно соответствует небольшой подгруппе Pitts (рис.10). Между sLL и sLM также располагается подгруппа Udei Station. Метеорит Маслянино хорошо соответствует подгруппам Pitts и Udei Station по всем элементам, включая элементы платиновой группы.

Микроэлементный состав троилита и шрейберзита показан в табл. 4. По отношению к камаситу и тэниту троилит является концентратором Cr = 0.3–0.4 мас.%, Mn = 97–120 ppm, Zn = 20–26 ppm, Se = 36–40 ppm и Te = 1.2–2.2 ppm. В шрейберзите можно отметить высокие содержания Mo = 19–29 ppm и Pd = 3.8–5.7 ppm.

На рис. 11 показаны спектры микроэлементов в различных минералах метеорита Маслянино, нормализованные на содержания в хондритах CI. Для сравнения показаны спектры минералов метеорита Udei Station [Ruzicka, Hutson, 2010]. К сожалению, пока немного силикатных минералов из метеоритов группы IAB проанализированы на содержания микроэлементов и для других метеоритов полный микроэлементный анализ не проводился. Концентрации микроэлементов приведены в табл. 5–6. Для оливина характерны повышенные содержания Sc, Ti, V, Cr. Содержания La, Ce и Zr немного выше, чем в оливине из метеорита Udei Station. Для спектров плагиоклаза характерна положительная Eu аномалия и повышенные содержания LREE и Sr. Для ортопироксена характерны спектры с обеднением LREE, небольшая отрицательная Eu аномалия, а также низкие содержания Ti и Cr по сравнению с ортопироксеном метеорита Udei Station. Микроэлементный состав клинопироксена (рис. 11в) показывает M-образный тренд распределения редкоземельных элементов, с уменьшением самых тяжелых и самых легких лантаноидов с сильной отрицательной Eu аномалией. Клинопироксен резко обеднени Nb и Sr и практически идентичен составу клинопироксена метеорита Udei Station. Апатита и мерриллит являются концентраторами REE и Sr, имеют выраженную Eu аномалию и обеднены Zr и Nb (рис.11г).

Рамановская спектроскопия

Исследования минералов метеорита Маслянино с помощью рамановской спектроскопии проводилось с целью поиска высокобарических минеральных фаз. Однако все исследованные минералы (оливин, включая железистые разновидности и фосфаты) относятся к никзобарическим модификациям, стабильным при нормальных условиях. Спектры силикатов часто содержат пики графита (рис. 12), что свидетельствует о наличии микровключений этого минерала. Это наиболее характерно для оливина, ортопироксена и мерриллита.

Сам графит имеет три пика – линии 1344 (D), 1577 (G) и 1620 (D’) $см^{-1}$ (рис.13). Различия между двумя типами выделений графита (рис.5) на рамановских спектрах не обнаружено. В работе [Ferrari, Robertson, 2000] была показана зависимость степени аморфизации графита от дисперсии пика G и отношения интенсивностей пиков G и D (I(D)/I(G)). Для графита из метеорита Маслянино соотношение I(D)/I(G) было определено как 0.2; позиция линии G = 1577 $см^{-1}$. В соответствии с «траекторией аморфизации углерода» [Ferrari, Robertson, 2000] подобный графит является кристаллическим, а наличие пиков D и D’ свидетельствует о микроразмерности его зерен.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Микроэлементный состав металлической части показывает, что метеорит Маслянино относится к подгруппе Pitts, которая занимает промежуточное положение между подгруппами sLL и sLM (рис.10). Близкое положение занимает, и подгруппа Udei Station, которую, в принципе, можно включить в подгруппу sLL.

В подгруппу Pitts входят три метеорита, собственно, Pitts, а также Woodbine и Colfax (все найдены на территории США). Два из этих метеоритов, Pitts и Woodbine, содержат силикатные включения. Доступные в базе “Meteoritical Bulletin Database” изображения метеоритов Pitts и Woodbine (см. также [Mason, 1967]) обнаруживают тесное сходство с метеоритом Маслянино.

В подгруппу Udei Station также входят метеориты, которые имеют текстурно-структурные сходства с метеоритом Маслянино. Большинство метеоритов этой подгруппы (5 из 6) содержат силикатные включения. В отличие от подгруппы Pitts эти метеориты найдены на разных континентах: в США (Four Corners, Caddo County, Harlowton), Марокко (Zagora), Нигерии (Udei Station), а также в Антарктиде (Thiel Mountains 91725). В других подгруппах IAB метеориты с силикатными включениями встречаются крайне редко (20 из 248).

Из упомянутых метеоритов с силикатными включениями детально исследованы только Udei Station [Ruzicka, Hutson, 2010] и Caddo County [Benedix et al., 2000]. Как и в метеорите Маслянино, в Udei Station наблюдаются большие скопления силикатов, окруженные металлической и сульфидной массой, часто силикатные скопления нарушены трещинами, выполненными металлом. На контакте силикатной и металлической части наблюдаются графит и шрейберзит.

Таким образом, на основании петрографических особенностей и состава металла метеорит Маслянино относится к подгруппе Pitts, а также имеет общие черты с метеоритами подгруппы Udei Station.

По составу силикаты метеорита Маслянино, как и в большинстве других метеоритов группы IAB, практически соответствуют хондритам. Тем не менее, полное отсутствие самих хондр свидетельствует о частичном плавлении или метаморфизме первоначального хондритового вещества. В метеорите Udei Station отмечены дифференцированные участки базальтоидного состава с повышенным содержанием клинопироксена и плагиоклаза [Ruzicka, 2014]. Мы не проводили детального анализа модального состава силикатных включений из-за их высокой неоднородности, но вполне очевидно, что клинопироксен и плагиоклаз встречаются в небольшом количестве и общий валовый состав включений близок к хондритовому или смещен в сторону обогащения ортопироксеном. Визуально соотношение ортопироксен/оливин выше, чем в обычных хондритах, что отмечалось для включений в метеоритах IAB ранее [Benedix et al., 2000]. Микроэлементный состав силикатов в метеоритах подгруппы Pitts не определялся. Однако большая часть исследованных метеоритов группы IAB, включая Udei Station, имеет близкий микроэлементный состав пироксенов и плагиоклаза.

Наличие силикатных включений позволяет определить температуры равновесия. Оценки для пар клинопироксен-ортопироксен в метеорите Маслянино дают T = 982 ± 17 ºC по геотермометру [Wells, 1977] и 909 ± 20 ºC по геотермометру [Taylor, 1998]. Оценки по Ca-ортопироксеновому термометру [Brey, Köhler, 1990] соответствуют 939 ± 40 ºC. Все оценки дают довольно близкие результаты и согласуются с данными для метеорита Udei Station (T = 958 ± 46 ºC) [Ruzicka, Hutson, 2010]. Интервал температур кристаллизации по двупироксеновым и оливин-хромитовому термометру для метеоритов группы IAB составляет 950–1200 ºC [Ruzicka, 2014]. Довольно низкие температуры для метеорита Маслянино означают медленное субсолидусное остывание и последнее переуравновешивание пироксенов при 900–980 ºC.

Оценки скорости остывания по металлографическим данным для метеорита Маслянино сделаны по содержанию никеля в центре тэнитовых балок и их толщине (рис.14). Для расчета необходимо знать валовое содержание P в металле. Учитывая модальное содержание шрейберзита можно оценить содержание P = 0.4–0.6 мас.%. Далее строится математическая модель зависимости скорости остывания, от концентрации никеля, толщины ламеллей тэнита и коэфициента диффузии Ni [Herpfer et al., 1994; Goldstein et al., 2009].

В работе [Herpfer et al., 1994] было проведено исследование скоростей остывания для ряда метеоритов группы IAB. Состав метеорита Маслянино и содержания Ni в тэнитовых ламеллях в точности соответствует метеориту Woodbine (который относится к подгруппе Pitts) поэтому мы использовали модель для этого метеорита, так как она имеет те же исходные данные, что и метеорит Маслянино. Таким образом, была получена скорость

остывания метеорита Маслянино в 30-60 °С/млн. лет, что соответствует медленному остыванию в условиях приповерхностных бассейнов металла или в ядре небольших (до 100 км) планетезималей, покрытых силикатной оболочкой.

Модели формирования железных метеоритов с силикатными включениями можно разделить на три группы: экзогенную, эндогенную и гибридную. Наиболее подходящими являются гибридные модели – когда частично расплавленное и частично дифференцированное родительское тело подвергается мощному столкновению, которое приводит к полному разрушению и ре-аккреции материала (рис. 14). Иначе сложно объяснить совместное нахождение металла и силикатов.

Для метеоритов группы IAB можно предположить, что в первоначальном астероиде до столкновения произошла частичная дифференциация с образованием металлического ядра и силикатной мантии (винонаиты) с довольно толстой хондритовой корой. При коллизионном событии была снесена хондритовая и винонаитовая оболочка при этом оставшаяся часть ядра и силикатов не были сильно повреждены. Метеориты группы IAB могли сформироваться из этого ядра. Так как столкновение не разрушило ядро астероида, метеориты группы IAB сохранили большое количество летучих компонентов – серы, фосфора, углерода [Ruzicka, 2014].

По другой модели после столкновения и разрушения родительского астероида метеориты с силикатными включениями образовались в результате частичной аккреции разрушенного тела, а железные метеориты без включений представляют собой остатки разрушенного ядра, которые не аккумулировались вместе с силикатными фрагментами [Benedix et al., 2000]. В той же работе авторы предложили интерпретацию образования метеоритов различных подгрупп IAB как результат медленной кристаллизации, закалки или локального метаморфизма остатков астероида после катастрофического события. В результате образовались фрагменты чисто металлической части, металл-сульфидные, металл-сульфид-силикатные (хондритовые и дифференцированные). Метеорит Маслянино вместе с метеоритами подгрупп Pitts и Udei Station попадает в группу металл-сульфид-силикатных обломков, с относительно быстрой кристаллизацией (соответствующей металлографическим скоростям остывания метеорита).

Пока мы не проводили изотопных исследований и определения возраста силикатных включений и металла метеорита Маслянино. Имеющаяся информация для некоторых метеоритов группы IAB свидетельствует о Re-Os датировках 4537±21 млн. лет [Horan et al., 1998] и Hf-Wдатировках 4564.7±3 для металла [Schulz et al., 2012] и 4528±63 млн. лет для силикатных включений. Датировки для силикатных включений получены Rb-Sr, Sm-Nd, Ar-Ar и I-Xe методами и суммированы в работе [Ruzicka, 2014]. Следует отметить, что Re-Os и

Hf-W данные получены в основном для метеоритов без силикатных включений. Лишь при определении Hf-W возрастов учтены данные для силикатсодержащих метеоритов группы IAB: Campo del Cielo, Canyon Dyablo, Landes, Lueders, Caddo County и Zagora. Очевидно, что силикатные включения дают более поздние датировки по отношению к металлу, что не согласуется со структурными особенностями. Это связано с температурами закрытия изотопных систем. То есть, возраста силикатов отражают процесс остывания после кристаллизации металла, что согласуется и с низкими скоростями остывания метеоритов группы IAB. Кроме того, ряд изотопных хронометров мог перезапускаться в результате ударных событий, при этом силикаты оставались, по большей части, в твердом виде. Сравнение с возрастами Ca-Al-включений (CAI) метеоритов, имеющих наибольшие возраста материала Солнечной системы, показывает, что метеориты группы IAB образовались через 3-6 млн лет после CAI [Ruzicka, 2014]. Напомним, что возраст CAI оценивается в 4567.2 ±0.5 [Amelin et al., 2010].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обобщая результаты, полученные в ходе исследования железного метеорита Маслянино, можно сформулировать следующие выводы:

1. По структуре металлической фазы метеорит относится к тонкоструктурным октаэдритам. Металлическая составляющая представлена камаситом, тэнитом и шрейберзитом. Сульфидная составляющая представлена троилитом и алтаитом. Силикатная составляющая представлена оливином, орто- и клинопироксеном, плагиоклазом, а также включает апатит, мерриллит, хромит и графит.

2. По химическому составу металла метеорит относится к составной группе IAB. Детальный микроэлементный анализ позволил отнести метеорит Маслянино к узкой подгруппе Pitts внутри группы IAB, а также отметить сходство с подгруппой Udei Station. Обе подгруппы включают метеориты с силикатными включениями и занимают промежуточное положение между подгруппами sLL (низкие содержания Au и Ni) и sLM (низкие содержания Au и средние Ni).

3. Скорость остывания метеорита Маслянино по металлографическим данным составляет 30-60 ^{o}C/млн. лет. Это согласуется с его образованием в результате ударного события, которое привело к удалению внешней хондритно-винонаитовой оболочки. Из оставшейся части родительского астероида в результате последующих более мелких ударных событий образовались метеориты группы IAB (включая метеориты с силикатными включениями) и винонаиты.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 17-17-01177).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Лаврентьев Ю., Карманов Н., Усова Л. Электронно-зондовое определение состава минералов: микроанализатор или сканирующий электронный микроскоп? // Геология и геофизика, 2015, т.56, с.1473-1482.

Литасов К.Д., Исикава А., Бажан И.С., Пономарев Д.С., Хирата Т., Подгорных Н.М., Похиленко Н.П. Микроэлементный состав и классификационные признаки железного метеорита Чинге // Доклады академии наук, 2018a, т.478, №1, с.81-85.

Литасов К.Д., Пономарев Д.С., Бажан И.С., Исикава А., Подгорных Н.М., Похиленко Н.П. Алтаит (PbTe) в железном метеорите с силикатными включениями Маслянино // Доклады академии наук, 2018b, т.478, №2, с.207-210.

Пляшкевич Л.Н., Сандомирская С.М., Заславская Н.И. Минералогия и структура метеорита Эгвекинот // Метеоритика, 1980, т.39, с.70-78.

Хотинок Р.Л. Новые метеориты 1992 года // Земля и Вселенная, 1993, т.2, с.37.

Amelin Y., Kaltenbach A., Iizuka T., Stirling C.H., Ireland T.R., Petaev M., Jacobsen S.B. U–Pb chronology of the Solar System's oldest solids with variable $^{238}U/^{235}U$ // Earth and Planetary Science Letters, 2010, v.300, p.343-350.

Benedix G., McCoy T., Keil K., Bogard D., Garrison D. A petrologic and isotopic study of winonaites: Evidence for early partial melting, brecciation, and metamorphism // Geochimica et Cosmochimica Acta, 1998, v.62, p.2535-2553.

Benedix G., McCoy T., Keil K., Love S. A petrologic study of the IAB iron meteorites: Constraints on the formation of the IAB-Winonaite parent body // Meteoritics & Planetary Science, 2000, v.35, p.1127-1141.

Benedix G.K., Lauretta D.S., McCoy T.J. Thermodynamic constraints on the formation conditions of winonaites and silicate-bearing IAB irons // Geochimica et Cosmochimica Acta, 2005, v.69, p.5123-5131.

Bunch T., Keil K., Olsen E. Mineralogy and petrology of silicate inclusions in iron meteorites // Contributions to Mineralogy and Petrology, 1970, v.25, p.297-340.

Choi B.-G., Ouyang X., Wasson J.T. Classification and origin of IAB and IIICD iron meteorites // Geochimica et Cosmochimica Acta, 1995, v.59, p.593-612.

Ferrari A.C., Robertson J. Interpretation of Raman spectra of disordered and amorphous carbon // Physical review B, 2000, v.61, p.14095.

Goldstein J., Scott E., Chabot N. Iron meteorites: Crystallization, thermal history, parent bodies, and origin // Chemie der Erde-Geochemistry, 2009, v.69, p.293-325.

Herpfer M.A., Larimer J.W., Goldstein J. A comparison of metallographic cooling rate methods used in meteorites // Geochimica et Cosmochimica Acta, 1994, v.58, p.1353-1365.

Horan M., Smoliar M., Walker R. ^{182}W and ^{187}Re-^{187}Os systematics of iron meteorites: Chronology for melting, differentiation, and crystallization in asteroids // Geochimica et Cosmochimica Acta, 1998, v.62, p.545-554.

Jochum K.P., Willbold M., Raczek I., Stoll B., Herwig K. Chemical Characterisation of the USGS Reference Glasses GSA-1G, GSC-1G, GSD-1G, GSE-1G, BCR-2G, BHVO-2G and BIR-1G Using EPMA, ID-TIMS, ID-ICP-MS and LA-ICP-MS // Geostandards and Geoanalytical Research, 2005, v.29, p.285-302.

Karwowski Ł., Muszyński A., Kryza R., Pilski A.S. Polimineral nodules in corase-grained Morasko meteorite // Acta Societatis Metheoriticae Polonorum, 2009, v.1, p.52-58.

Kracher A. The evolution of partially differentiated planetesimals: Evidence from iron meteorite groups IAB and IIICD // Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1985, v.90, p.C689-C698.

Mason B. The Woodbine meteorite, with notes on silicates in iron meteorites // Mineralogical Magazine, 1967, v.36, p.120-126.

Palme H., Lodders K., Jones A.,Solar System abundances of the elements. In: Treatise on Geochemistry (Second Edition). Holland H.D., Turekian K.K. (Eds.), Elsevier, Oxford, 2014. v. 2, pp. 15-36.

Ruzicka A. Silicate-bearing iron meteorites and their implications for the evolution of asteroidal parent bodies // Chemie der Erde-Geochemistry, 2014, v.74, p.3-48.

Ruzicka A., Hutson M. Comparative petrology of silicates in the Udei Station (IAB) and Miles (IIE) iron meteorites: Implications for the origin of silicate-bearing irons // Geochimica et Cosmochimica Acta, 2010, v.74, p.394-433.

Schulz T., Upadhyay D., Münker C., Mezger K. Formation and exposure history of non-magmatic iron meteorites and winonaites: Clues from Sm and W isotopes // Geochimica et Cosmochimica Acta, 2012, v.85, p.200-212.

Takeda H., Bogard D.D., Mittlefehldt D.W., Garrison D.H. Mineralogy, petrology, chemistry, and 39 Ar-40 Ar and exposure ages of the Caddo County IAB iron: evidence for early partial melt segregation of a gabbro area rich in plagioclase-diopside // Geochimica et Cosmochimica Acta, 2000, v.64, p.1311-1327.

Wasson, J.T. The chemical classification of iron meteorites - III. Hexahedrites and other irons with germanium concentrations between 80 and 200 ppm. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1969, v.33, p.859-876.

Wasson J.T., Kallemeyn G. The IAB iron-meteorite complex: A group, five subgroups, numerous grouplets, closely related, mainly formed by crystal segregation in rapidly cooling melts // Geochimica et Cosmochimica Acta, 2002, v.66, p.2445-2473.

Wasson J.T., Willis J., Wai C.M., Kracher A. Origin of iron meteorite groups IAB and IIICD // Zeitschrift für Naturforschung A, 1980, v.35, p.781-795.

Wells P.R. Pyroxene thermometry in simple and complex systems // Contributions to mineralogy and Petrology, 1977, v.62, p.129-139.

Wlotzka F. The Meteoritical Bulletin, No. 78, 1995 November // Meteoritics & Planetary Science, 1995, v.30, p.792-796.

Подписи к рисункам (Пономарев и др.)

Рис.1. Микрофотографии исследованных фрагментов метеорита Маслянино. Образцы Mas-1 – Mas-4 представляют срез образцов из шашек, залитых эпоксидной смолой диаметром 2.5 см. Фрагмент Mas-5 – отполированная пластина.

Рис.2. Видманштеттенова структура выделений камасита (Кам) и тэнита (Тэн) в образце Mas-4. Шкала 100 мкм.

Рис.3. Микроструктура силикатных включений: а) общий вид силикатного включения, обр. Mas-2; б) крупное выделение троилита (Тро), Mas-1; в) мерриллит (Мер) с включениями силикатов, обр. Mas-2; г) выделения графита (Гр) на контакте с металлом, обр. Mas-2; д) зона с включениями апатита (Ап), обр. Mas-2; е) алтаит (Алт) на границе силикатного включения, обр. Mas-5. Обозначения: Кам – камасит, Тэн – тэнит, Шр – шрейберзит, Ол – оливин, Оп – ортопироксен, Кп – клинопироксен, Пл – плагиоклаз, Хр – хромит, Гет – гетит.

Рис.4. а-д) Зоны округлые включений в оливине обр. Mas-1. е) Эмульсионная смесь троилита и хромита с оливином, обр. Mas-4. Обозначения: Ол – оливин, Ол-2 – оливин с повышенным содержанием фаялитового минала, Кам – камасит, Шр – шрейберзит, Тро – троилит, Доб – добреелит, Хр – хромит, Гет – гетит.

Рис.5. Два типа выделений графита. а) агрегат кристаллов клифтонита (Гр) в металлической матрице с включением плагиоклаза (Пл), обр. Mas-5; б) срастание графита и магнетита (Мт) с признаками деформаций на границе с силикатным включением, обр. Mas-1. Обозначения: Кам – камасит, Ол – оливин, Оп – ортопироксен, Кп – клинопироксен, Мер – мерриллит. Шкала – 100 мкм.

Рис.6. Гистограммы распределения фаялитового минала в оливине в различных железных метеоритах: а) метеорит Маслянино, б) другие группы железных метеоритов по данным работы [Ruzicka, 2014].

Рис.7. Состав пироксенов метеорита Маслянино в сравнении с другими группами железными метеоритами по данным работы [Ruzicka, 2014].

Рис.8. Состав плагиоклазов в метеорите Маслянино в сравнении с другими железными метеоритами по данным работы [Ruzicka, 2014].

Рис.9. Соотношение Ni, Ga и Ge в различных группах железных метеоритов, по данным работы [Goldstein et al., 2009]. Звездочкой показан состав метеорита Маслянино. Серым цветом выделены группы IAB и IIICD, входящие в комплекс IAB по [Wasson, Kallemeyn, 2009].

Рис.10. Соотношение Au и других элементов в метеоритах группы IAB. Обозначения подгрупп по [Wasson, Kallemeyn, 2002].

Рис.11. Микроэлементный состав силикатов и фосфатов метеорита Маслянино, нормированный по хондриту CI [Palme et al., 2014]. Для сравнения приведен состав этих минералов из метеорита Udei Station, по данным работы [Ruzicka, Hutson, 2010]. а) оливин и плагиоклаз; б) ортопироксен; в) клинопироксен; г) фосфаты.

Рис. 12. Рамановские спектры оливина и мерриллита из метеорита Маслянино. Пики 1344 и 1580 $см^{-1}$ соответствуют включениям графита.

Рис. 13. Рамановский спектр графита из метеорита Маслянино.

Рис. 14. Оценка скоростей остывания метеорита Маслянино по соотношению толщины балок тэнита и содержания Ni в центарльной части. Линии трендов взяты из работы [Herpfer et al., 1994] для метеорита Woodbine.

Рис. 15. Модель формирования метеоритов группы IAB (+IIICD) и винонаитов в результате ударного распада и ре-аккреции родительского тела по данными работы [Ruzicka, 2014] с изменениями.

Табл.1. Средний химический состав (мас.%) металла и рудных минералов железного метеорита Маслянино.

Минер.	Камасит	Тэнит	Троилит	Шр	Кам-2	Тэн-2	Шр-2	Доб	Алтаит*
N	>50	>50	36	17	4	4	5	4	8
Fe	91.57	83.08	63.00(37)	48.69(1.12)	93.97(41)	59.40(69)	30.60(56)	18.34(27)	1.66(18)
Ni	7.26 [6.2-7.9]	16.42 [12.3-39.9]	–	35.70(1.11)	5.15(41)	40.23(56)	53.12(81)	0.47(11)	–
Co	0.75 [0.41-0.92]	0.41 [0.32-0.61]	–	0.11(7)	1.07(9)	0.42(12)	0.17(4)	0.12(5)	–
P	0.12	0.03	–	15.29(13)	–	–	15.28(21)		–
Cr	–	–	0.41(8)	–	–	–	–	35.33(49)	0.50(10)
Mn								1.49(15)	
Pb	–	–	–	–	–	–	–		60.53(30)
Te	–	–	–	–	–	–	–		37.40(26)
S	–	–	36.66(35)	–	–	–	–	44.49(31)	–
Сумма	99.70	99.94	100.1(5)	99.78(54)	100.2(6)	100.1(7)	99.17(74)	100.2(3)	100.1(4)

Примечание: N – количество анализов. Кам-2, Тэн-2, Шр-2 и Доб – камасит, тэнит, шрейберзит и добреелит из микровключений в оливине (рис. 3). В квадратных скобках приведены пределы вариаций в разных зернах (для тэнита – в центральной части), в круглых скобках – стандартное отклонение для последних значащих цифр. *По данным работы [Литасов и др., 2017]. «–» - Ниже предела обнаружения.

Табл.2. Средний химический состав (мас.%) минералов силикатных включений в железном метеорите Маслянино.

Мин.	Ол	Ол-2	Оп	Кп	Плаг	Хр	Мер	Ап
N	48	9	46	30	27	16	17	10
SiO_2	41.62(71)	40.05(61)	58.27(68)	54.46(64)	66.13(74)	–	–	0.15(7)
TiO_2	–	–	0.23(7)	0.73(14)	–	0.20(5)	–	–
Al_2O_3	–	–	0.31(12)	0.75(11)	21.24(57)	0.17(5)	–	–
Cr_2O_3	–	–	0.10(7)	0.94(17)	–	68.18(1.02)	–	–
FeO	4.98(55)	10.94(61)	4.31(46)	1.68(24)	0.31(12)	17.89(74)	0.17(5)	0.18(7)
MnO	0.23(5)	0.24(4)	0.24(5)	0.19(5)	–	4.19(47)	–	–
MgO	53.12(86)	48.34(79)	35.84(76)	18.99(35)	–	6.23(45)	3.75(10)	–
CaO	0.06(2)	0.06(4)	0.92(12)	21.63(49)	2.14(24)	–	46.97(33)	53.94(56)
ZnO	–	–	–	–	–	2.08(19)	–	–
Na_2O	–	–	–	0.56(11	10.07(15)	–	2.88(11)	0.14(5)
K_2O	–	–	–		0.78(7)	–	–	–
P_2O_5	–	–	–	–	–	–	46.44(42)	42.01(84)
V_2O_5	–	–	–	–	–	0.33(6)	–	–
F	–	–	–	–	–	–	–	2.25(33)
Cl	–	–	–	–	–	–	–	2.83(17)
Сумма	100.0 (8)	99.63(76)	100.2(7)	99.93(63)	100.7(8)	99.27(76)	100.2(5)	99.91(56)
O^-	–	–	–	–	–	–	–	1.59(24)

Примечание: N – количество анализов. В скобках приведено стандартное отклонение для последних значащих цифр. Ол-2 – железистый оливин вокруг металлических включений (рис. 3). Оп – ортопироксен, Кп – клинопироксен, Плаг – плагиоклаз, Хр – хромит, Мер – мерриллит, Ап – апатит. «–» - Ниже предела обнаружения.

Табл.3. Микроэлементный состав (ppm) камасита (Кам) и тэнита (Тэн) из метеорита Маслянино.

№ обр.	M1S6	M1S7	M2S10	M1S7	M1S8	M2S10	M1S8	M2S9	M1S6	M2S9	
Мин.	Кам	Кам	Кам	Кам	Кам	Кам	Тэн	Тэн	Тэн	Тэн	Сред.
P	1251	1459	1338	1239	1256	1314	351.6	314.0	192.6	207.5	1049
Cr	1.29	1.15	1.28	0.99	0.90	1.02	2.28	2.03	1.90	1.89	1.33
Mn	0.33	0.37	0.31	0.34	0.29	0.28	0.51	0.75	0.51	0.46	0.38
Co	5621	5597	5755	5735	5876	5717	4176	4282	4322	3992	5336
Ni	73259	72922	75099	77043	77813	78761	156591	164126	197878	167843	99764
Cu	193.7	202.6	183.7	194.3	178.7	195.2	706.6	757.5	901.4	765.2	339.2
Zn	10.48	10.04	8.48	0.44	0.49	0.45	16.21	17.21	3.40	3.72	6.33
Ga	32.79	34.20	32.42	32.17	33.72	30.97	29.86	28.42	30.99	28.90	31.92
Ge	125.7	128.1	123.3	136.1	144.2	125.3	75.58	71.97	93.29	85.67	118.2
As	28.30	26.67	26.75	26.78	26.34	26.16	8.61	8.46	9.56	9.55	22.39
Mo	3.93	3.63	3.79	3.71	3.97	4.00	5.80	5.60	6.53	6.04	4.38
Ru	1.66	1.63	1.71	1.88	1.89	2.17	2.61	2.51	3.88	3.13	2.13
Rh	0.58	0.58	0.56	0.63	0.59	0.64	0.78	0.80	0.90	0.92	0.66
Pd	3.23	3.16	3.08	3.85	3.77	3.90	6.53	6.53	10.73	7.75	4.59
Sn	5.82	5.97	5.72	5.98	6.40	5.76	4.92	4.85	5.73	4.91	5.73
Sb	0.62	0.68	0.58	0.68	0.75	0.63	0.63	0.59	0.73	0.58	0.65
W	0.45	0.54	0.36	0.33	0.37	0.31	0.51	0.42	0.56	0.33	0.41
Re	0.16	0.17	0.13	0.13	0.11	0.10	0.22	0.16	0.23	0.15	0.15
Os	1.18	1.15	1.24	1.45	1.52	1.75	1.61	1.62	1.85	2.24	1.49
Ir	1.30	1.23	1.32	1.40	1.41	1.57	1.48	1.36	1.70	1.64	1.42
Pt	2.06	2.05	2.19	2.37	2.48	2.47	2.52	2.47	3.00	2.72	2.37
Au	1.48	1.45	1.33	1.48	1.43	1.60	2.08	1.93	2.45	2.35	1.65

Примечание: Сред. – средний состав металла, рассчитанный из соотношения 75% камасита и 25% тэнита.

Табл.4. Микроэлементный состав (ppm) троилита (Тро) и шрейберзита (Шр) из метеорита Маслянино.

№ обр.	M2S11	M2S12	M2S13	M2S11	M2S16	M2S14	M2S15
Мин.	Тро	Тро	Тро	Тро	Тро	Шр	Шр
P	8.76	11.37	7.40	10.10	4.47	151923	154505
Ti	2.85	2.51	2.86	3.13	1.53	–	–
V	30.55	31.05	30.72	31.13	30.13	–	–
Cr	3630	3739	3689	3750	3769	0.33	0.47
Mn	97.76	120.10	113.89	97.84	100.73	6.47	6.06
Co	19.96	24.86	32.02	24.44	29.45	1121	1422
Ni	23.14	54.64	60.46	35.87	20.16	368739	393648
Cu	333.9	394.8	403.6	335.1	406.7	183.1	234.8
Zn	21.33	25.66	20.25	26.52	23.57	0.36	0.58
Ga	–	–	–	–	–	0.74	0.97
Ge	0.48	0.61	0.48	0.56	0.58	3.73	4.08
As	–	–	–	–	–	1.76	2.25
Se	35.97	38.06	39.77	37.83	38.79	–	–
Nb	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	–	–
Mo	3.39	3.16	3.40	3.22	3.26	19.27	28.83
Ru	–	–	–	–	–	1.52	2.43
Rh	–	–	–	–	–	0.32	0.43
Pd	–	–	–	–	–	3.86	5.69
Ag	0.18	0.18	0.22	0.19	0.21	–	–
Sn	–	–	–	–	–	0.13	0.13
Te	1.30	1.28	2.24	1.18	1.34	–	–
W	–	–	–	–	–	0.17	0.22
Os	0.09	0.10	0.11	0.09	0.10	0.40	0.51
Ir	–	–	–	–	–	0.02	0.03
Pt	–	–	–	–	–	0.06	0.07
Pb	0.31	0.34	0.30	0.36	0.30	–	–

Примечание: «–» - Ниже предела обнаружения.

Табл.5. Химический состав (ppm) клино- (Кп) и ортопироксенов (Оп) из метеорита Маслянино по результатам анализа методом LA-ICP-MS.

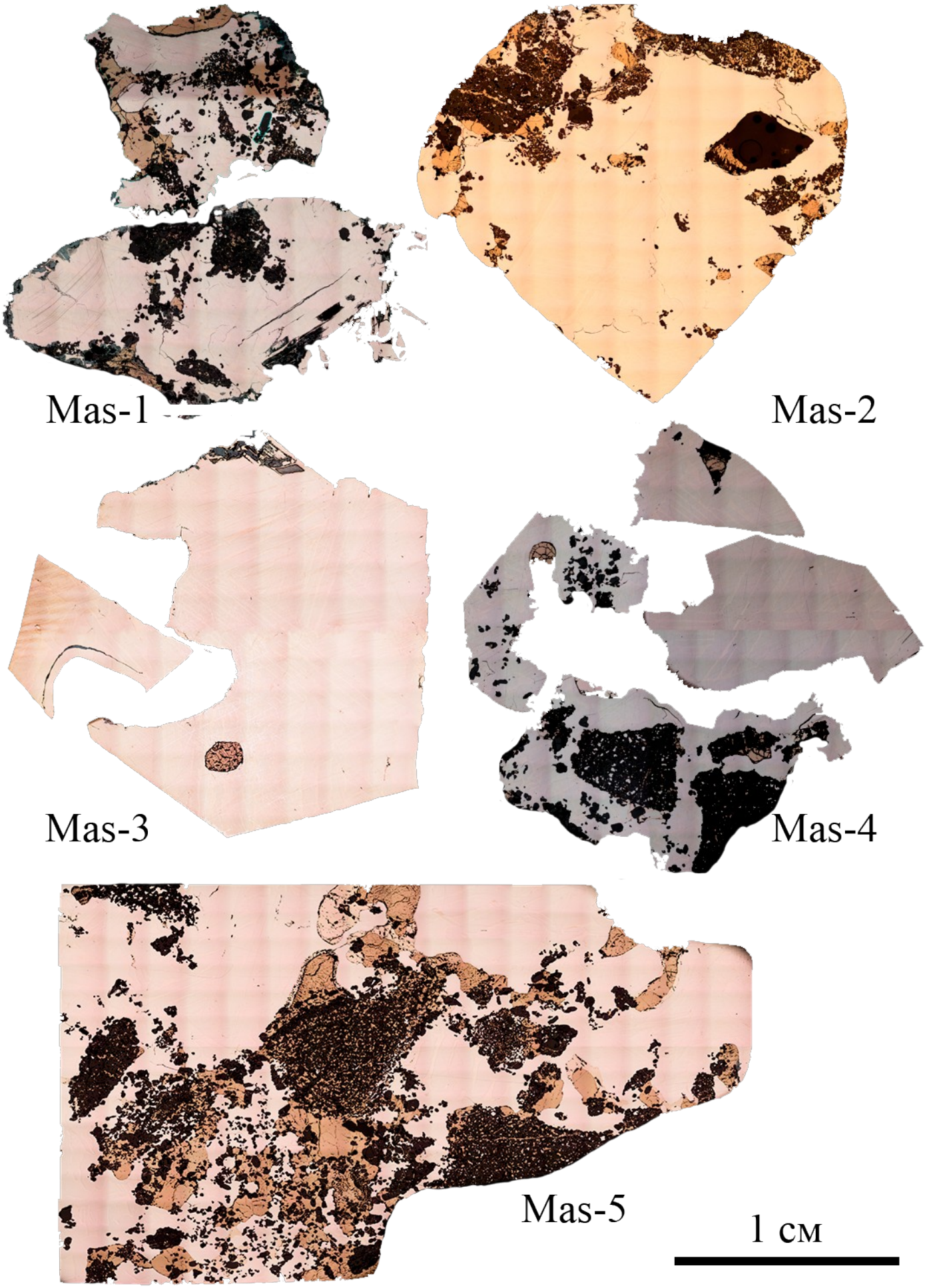
№ обр.	M2S6	M2S7	M1S23	M1S24	M1S25	M1S16	M2S9	M2S10	M2S14	M2S15	M1S20	M2S8
Мин.	Кп	Кп	Кп	Кп	Кп	Кп	Оп	Оп	Оп	Оп	Оп	Оп
Si	251426	251178	252046	253743	253704	253036	271172	270448	269536	270200	269394	270836
Ti	4370	4336	4490	4366	4202	4249	1174	1297	1207	1337	1352	1306
Al	4510	4611	4561	4402	4454	4523	1160	1113	1231	1183	1229	1122
Cr	9137	8602	9022	8965	9370	8983	830	841	818	919	1003	921
Fe	11442	11757	11222	11268	11199	11229	33041	33039	33180	32066	32149	32990
Mn	1409	1360	1517	1537	1502	1486	1781	1762	1708	1750	1860	1759
Mg	116441	116739	113460	113842	111969	113743	218615	218939	220375	220469	220058	218133
Ca	154027	154396	156807	154038	156259	155053	5777	6433	6008	5799	7241	6840
Na	5759	5624	5568	5651	5505	5887	230.69	235.04	218.98	194.36	215.76	215.86
K	12.64	10.67	12.99	13.33	11.75	12.66	2.09	2.58	2.73	4.29	3.79	4.57
P	12.27	17.04	12.56	13.46	12.84	12.37	3.82	2.94	3.22	2.76	3.44	3.09
Sc	88.06	82.42	77.95	84.15	87.86	82.63	10.45	10.30	10.70	12.28	11.71	11.54
V	313.60	319.27	315.91	302.95	324.76	333.71	10.64	10.58	11.21	11.92	12.22	11.85
Co	1.12	0.97	0.93	0.96	0.87	0.99	4.24	3.58	4.75	4.54	2.51	3.55
Ni	4.37	6.91	5.87	6.52	6.81	5.37	83.33	69.21	87.86	70.26	82.59	65.68
Cu	0.70	0.54	0.61	0.77	0.45	0.48	–	–	–	–	–	–
Zn	52.15	49.77	50.79	52.29	49.41	50.42	230.11	224.63	220.94	217.51	211.11	224.56
Ga	1.70	1.77	1.68	1.72	1.73	1.72	0.39	0.35	0.41	0.49	0.61	0.57
Rb	0.07	0.08	0.08	–	–	0.08	–	–	–	–	–	–
Sr	6.06	6.61	5.77	5.60	5.55	5.80	0.34	0.34	0.19	0.23	0.28	0.17
Y	31.24	30.33	31.30	34.56	32.54	32.57	1.07	1.17	1.25	1.29	1.31	1.34
Zr	102.58	80.34	89.15	93.02	92.41	91.56	1.94	1.70	1.83	2.11	2.40	2.19
Nb	0.08	0.09	0.10	0.09	0.10	0.12	0.029	0.026	0.024	0.018	0.027	0.025
Ba	0.04	0.03	0.05	–	–	0.04	–	–	–	–	–	–
La	2.51	2.56	2.90	2.69	2.66	2.71	–	–	–	–	–	–
Ce	9.58	9.91	11.87	11.39	11.07	11.55	0.054	0.036	0.045	0.044	0.045	0.054
Pr	1.83	1.87	2.15	2.05	1.99	2.11	0.019	0.014	–	–	–	–
Nd	10.67	10.95	12.69	12.05	11.73	12.42	–	0.056	–	0.070	–	–
Sm	3.63	3.55	4.28	4.18	3.98	4.22	0.053	0.041	0.024	0.045	0.051	0.042
Eu	0.08	0.05	0.05	0.04	0.05	0.05	–	–	–	0.005	0.008	0.005
Gd	5.19	4.92	5.43	5.62	5.38	5.44	–	0.067	–	0.062	–	–
Tb	0.92	0.86	0.96	0.99	0.95	0.97	0.022	0.021	0.012	0.012	0.015	0.016
Dy	5.94	5.45	6.03	6.31	6.16	6.14	0.172	0.151	0.128	0.118	0.121	0.126
Ho	1.22	1.08	1.17	1.26	1.20	1.21	0.055	0.060	0.047	0.055	0.052	0.056
Er	3.02	2.82	3.00	3.16	3.15	3.12	0.254	0.247	0.218	0.243	0.307	0.315
Tm	0.43	0.40	0.40	0.44	0.44	0.44	0.046	0.057	0.047	0.042	0.050	0.046
Yb	2.53	2.29	2.21	2.57	2.60	2.55	0.319	0.355	0.382	0.355	0.379	0.394
Lu	0.33	0.33	0.31	0.37	0.35	0.36	0.057	0.068	0.052	0.053	0.054	0.054
Hf	2.78	1.97	2.31	2.47	2.42	2.38	0.102	0.076	0.066	0.070	0.083	0.076
Ta	0.08	0.13	0.10	0.13	0.10	0.13	–	–	–	–	–	–
Pb	0.11	0.07	0.04	0.05	0.09	0.06	–	–	–	–	–	–
Th	0.10	0.09	0.16	0.14	0.13	0.14	–	–	–	–	–	–
U	0.05	0.05	0.04	0.05	0.04	0.05	–	–	–	–	–	–

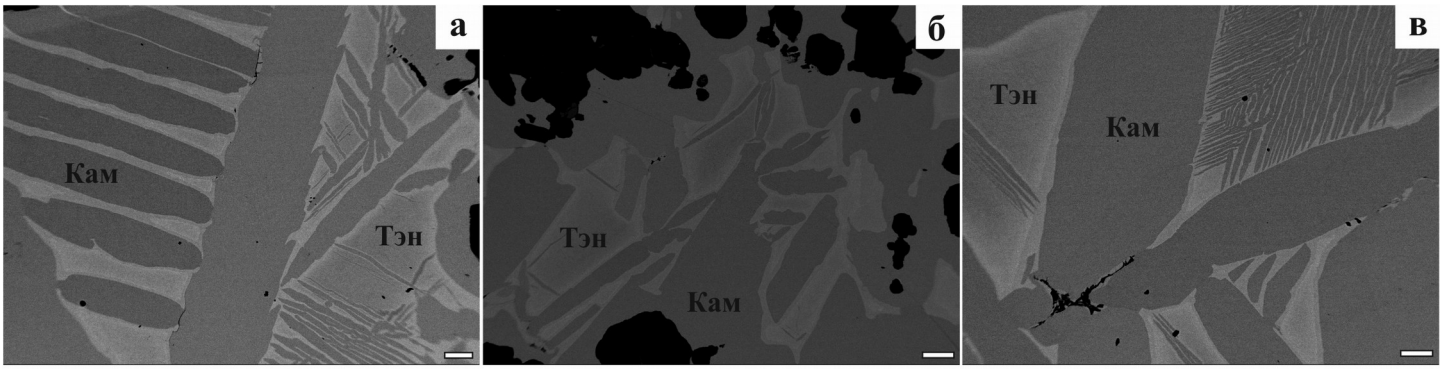
Примечание: «–» - Ниже предела обнаружения.

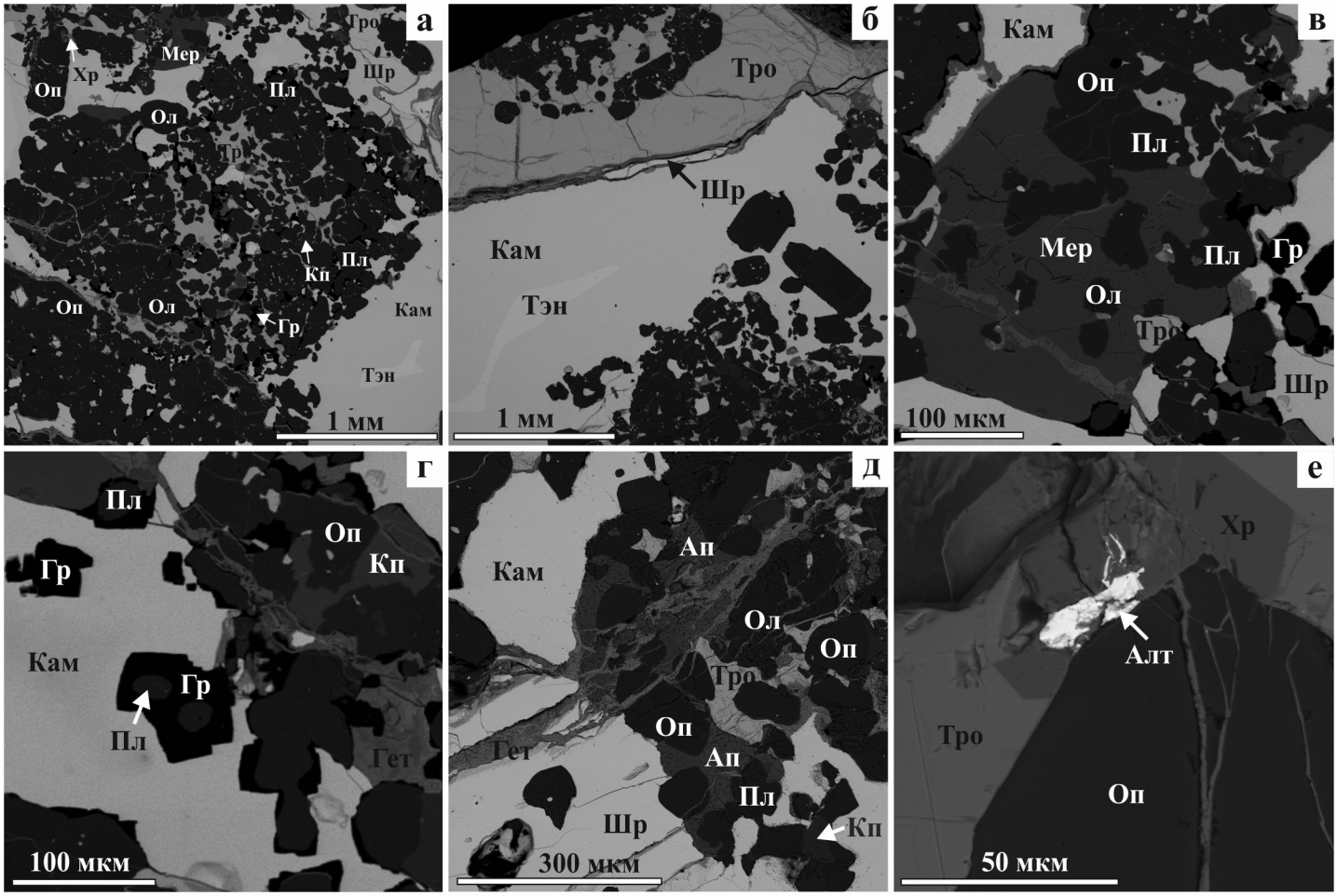
Табл.6. Химический состав (ppm) оливина (Ол), плагиоклаза (Плаг), мерриллита (Мер) и апатита (Ап) из метеорита Маслянино по результатам анализа методом LA-ICP-MS.

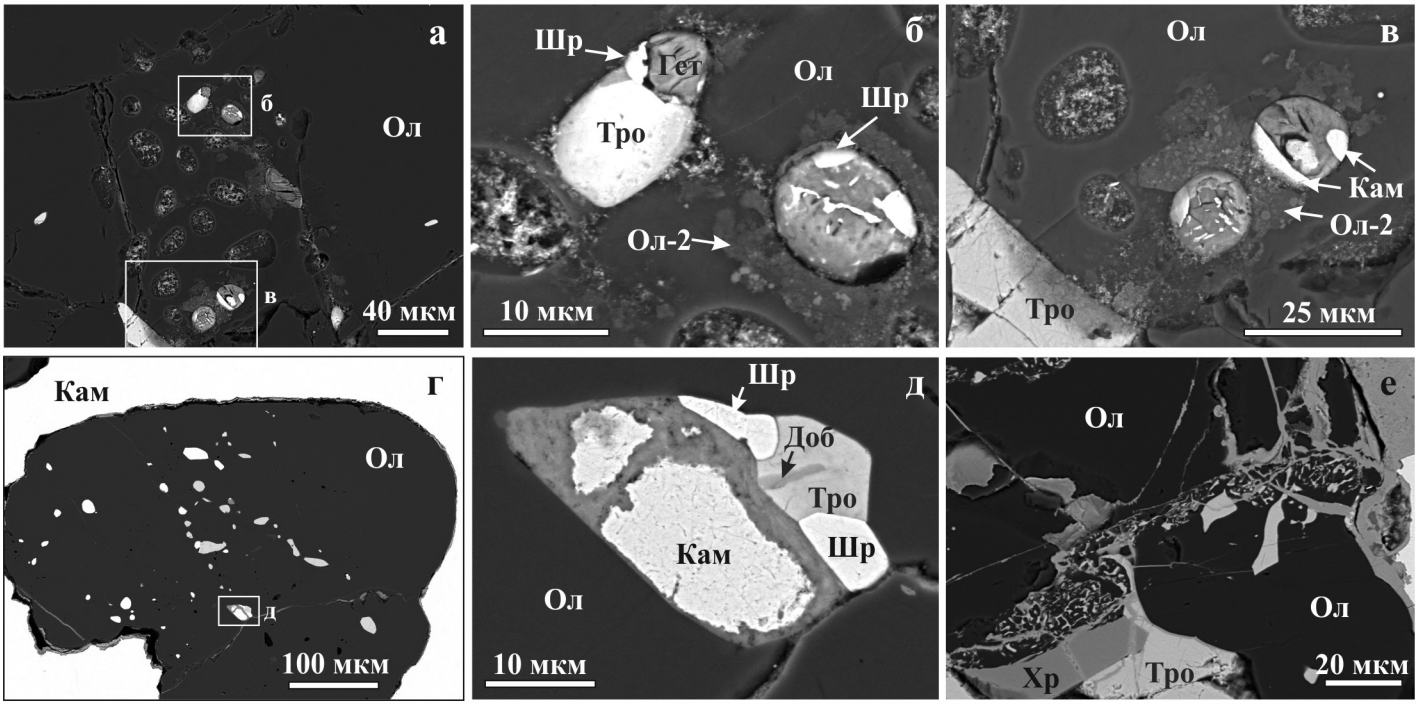
№ обр.	M2S1	M2S2	M2S11	M2S21	M2S17	M2S5	M2S15	M1S26	M2S3	M2S4	M1S22	M2S12	M1S18	M1S19
Мин.	Ол	Ол	Ол	Ол	Ол	Плаг	Плаг	Плаг	Мер	Мер	Мер	Мер	Ап	Ап
Si	194253	194351	195030	194969	195274	300215	300620	299643	822.36	763.75	855.03	834.84	853.38	1032
Ti	21.02	15.95	12.67	15.43	14.89	259.22	248.85	274.02	139.89	144.92	127.33	135.82	84.35	81.76
Al	80.08	74.93	87.37	94.82	61.39	115670	115375	115881	11.61	7.59	8.53	9.84	–	–
Cr	117.52	108.37	118.47	112.67	114.71	–	–	–	15.17	19.69	28.80	24.25	–	–
Fe	35765	37312	37601	35090	35415	1869	2055	1983	515.84	502.02	598.47	461.88	265.78	296.02
Mn	1698	1634	1679	1629	1646	1.33	1.97	1.98	92.31	93.09	89.63	91.93	288.21	292.98
Mg	322822	321654	320538	322596	321989	53.39	37.65	39.74	20568	20994	20160	20200	618.88	593.58
Ca	405.78	310.34	294.46	278.93	275.80	16470	16474	16512	335117	337217	338558	336070	403910	403789
Na	64.97	61.19	64.21	66.50	58.67	77926	77668	78302	20837	20078	20418	20383	1195	1285
K	1.19	0.90	1.90	3.86	2.92	6680	6578	6744	314.12	256.84	334.11	303.23	14.37	13.16
P	10.04	8.70	12.17	11.47	9.51	54.07	44.32	45.82	203251	202186	201622	203217	187469	187292
Sc	2.67	2.82	2.67	2.43	2.52	–	–	–	10.99	10.34	9.47	10.13	–	–
V	3.42	3.69	4.70	4.30	4.25	–	–	–	0.21	0.23	0.16	0.17	–	–
Co	2.10	4.04	4.49	2.08	3.37	6.43	5.46	5.79	0.19	0.15	0.43	0.24	0.16	0.20
Ni	15.34	19.57	16.50	12.46	13.55	160.19	119.16	124.58	0.59	0.59	0.57	0.50	2.83	2.24
Cu	–	–	–	–	–	1.55	0.96	1.12	2.18	2.25	2.35	2.18	0.94	0.81
Zn	270.00	303.08	275.09	278.35	288.62	1.40	1.28	1.30	1.69	1.43	2.12	2.01	1.21	1.23
Ga	0.15	0.17	0.15	0.17	0.17	6.95	6.51	6.56	2.68	2.25	2.17	2.27	3.08	3.41
Rb	–	–	–	–	–	10.45	9.55	10.01	0.47	0.58	0.52	0.56	0.08	0.07
Sr	0.31	0.29	0.21	0.26	0.12	113.11	108.37	112.13	38.98	36.12	37.00	38.91	105.83	105.69
Y	0.010	0.008	0.014	0.025	0.015	–	–	–	84.42	80.49	67.92	71.21	157.44	186.36
Zr	0.182	0.084	0.224	0.077	0.081	–	–	–	0.34	0.24	0.55	0.46	34.25	28.91
Ba	–	–	–	–	–	39.15	37.38	37.91	0.43	0.49	2.63	1.26	1.57	1.64
La	0.012	0.009	0.021	0.009	0.008	0.46	0.27	0.34	19.25	11.69	23.49	23.01	26.27	42.88
Ce	0.017	0.021	0.022	0.012	0.024	0.29	0.20	0.25	48.76	35.19	56.74	57.03	57.01	88.77
Pr	–	–	–	–	–	0.03	0.02	0.02	7.03	4.56	7.55	8.13	7.81	12.15
Nd	–	–	–	–	–	0.12	0.12	0.11	33.68	23.76	35.12	37.39	40.25	62.37
Sm	–	–	–	–	–	0.04	–	–	10.16	5.89	10.61	11.04	12.64	19.55
Eu	–	–	–	–	–	0.88	0.89	0.89	1.66	1.13	1.60	1.54	0.94	1.08
Gd	–	–	–	–	–	0.11	0.11	0.12	12.94	7.03	11.21	12.54	17.17	26.95
Tb	–	–	–	–	–	–	–	–	2.44	1.33	2.19	2.37	2.83	4.62
Dy	–	–	–	–	–	0.08	0.06	0.07	16.42	9.71	14.80	15.89	18.17	30.14
Ho	–	–	–	–	–	0.02	0.00	0.03	3.51	1.78	3.34	3.56	4.04	6.31
Er	0.013	0.009	0.009	0.009	0.011	0.05	0.05	0.04	9.95	5.62	9.84	10.36	11.56	17.20
Tm	–	–	–	–	–	0.01	0.01	0.01	1.51	0.78	1.67	1.66	1.46	2.04
Yb	0.023	0.022	0.027	0.038	0.021	0.04	0.04	0.04	10.20	7.42	11.96	11.45	8.79	11.27
Lu	–	–	–	–	–	0.01	0.01	–	1.41	0.94	1.70	1.65	1.33	1.57
–	–	–	–	–	–	–	–	–	0.04	0.07	0.04	0.05	0.13	0.16
Pb	–	–	–	–	–	6.09	8.24	7.34	2.21	2.67	2.55	2.52	12.90	19.03
Th	–	–	–	–	–	–	–	–	1.14	1.15	0.99	1.13	11.45	16.18
U	–	–	–	–	–	–	–	–	0.06	0.04	0.03	0.04	4.81	5.34

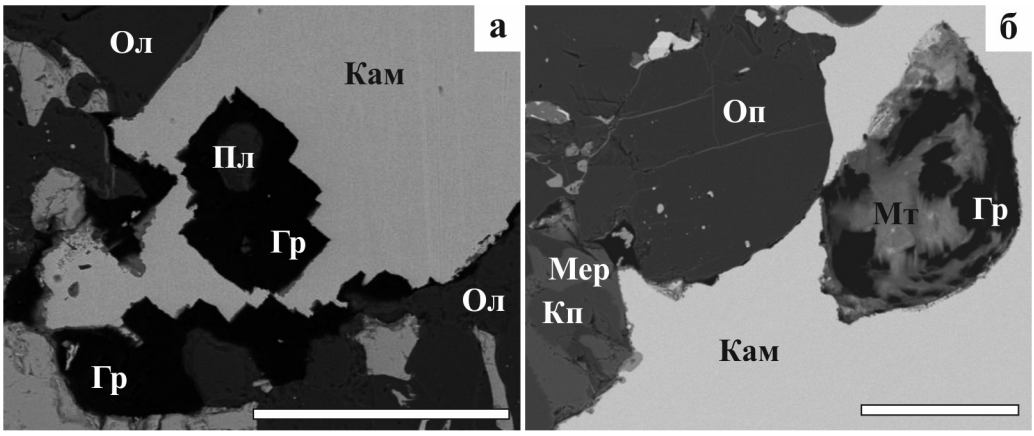
Примечание: «–» - Ниже предела обнаружения.

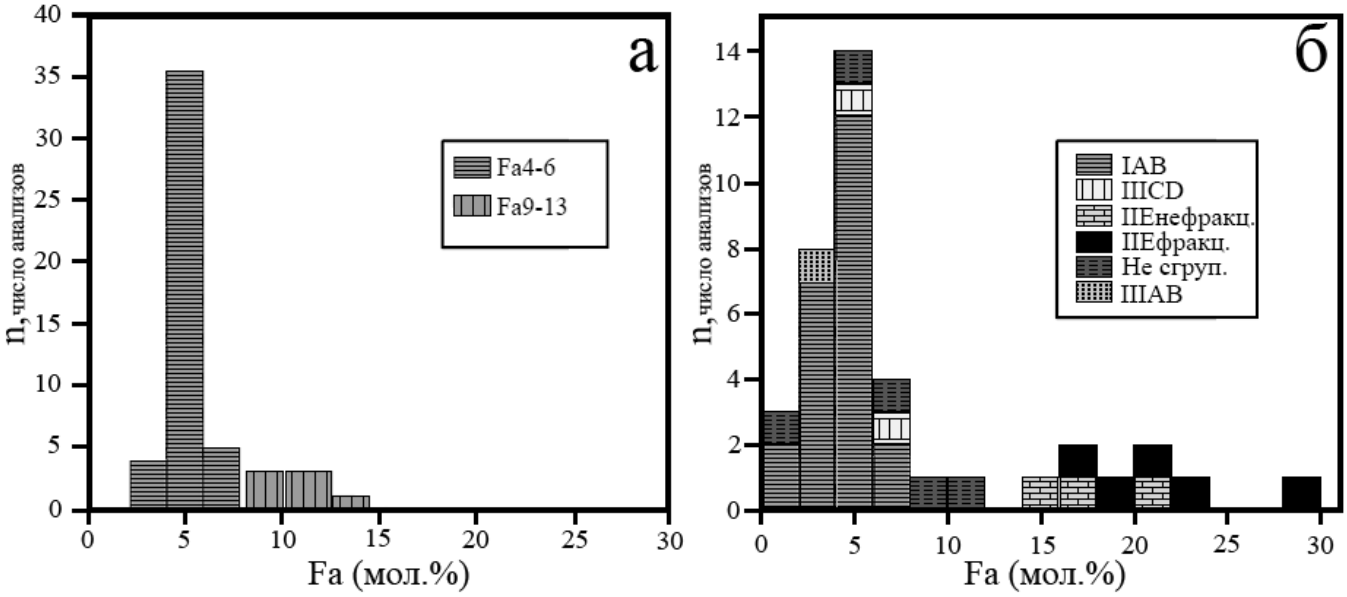

Mas-1
Mas-2
Mas-3
Mas-4
Mas-5
1 см

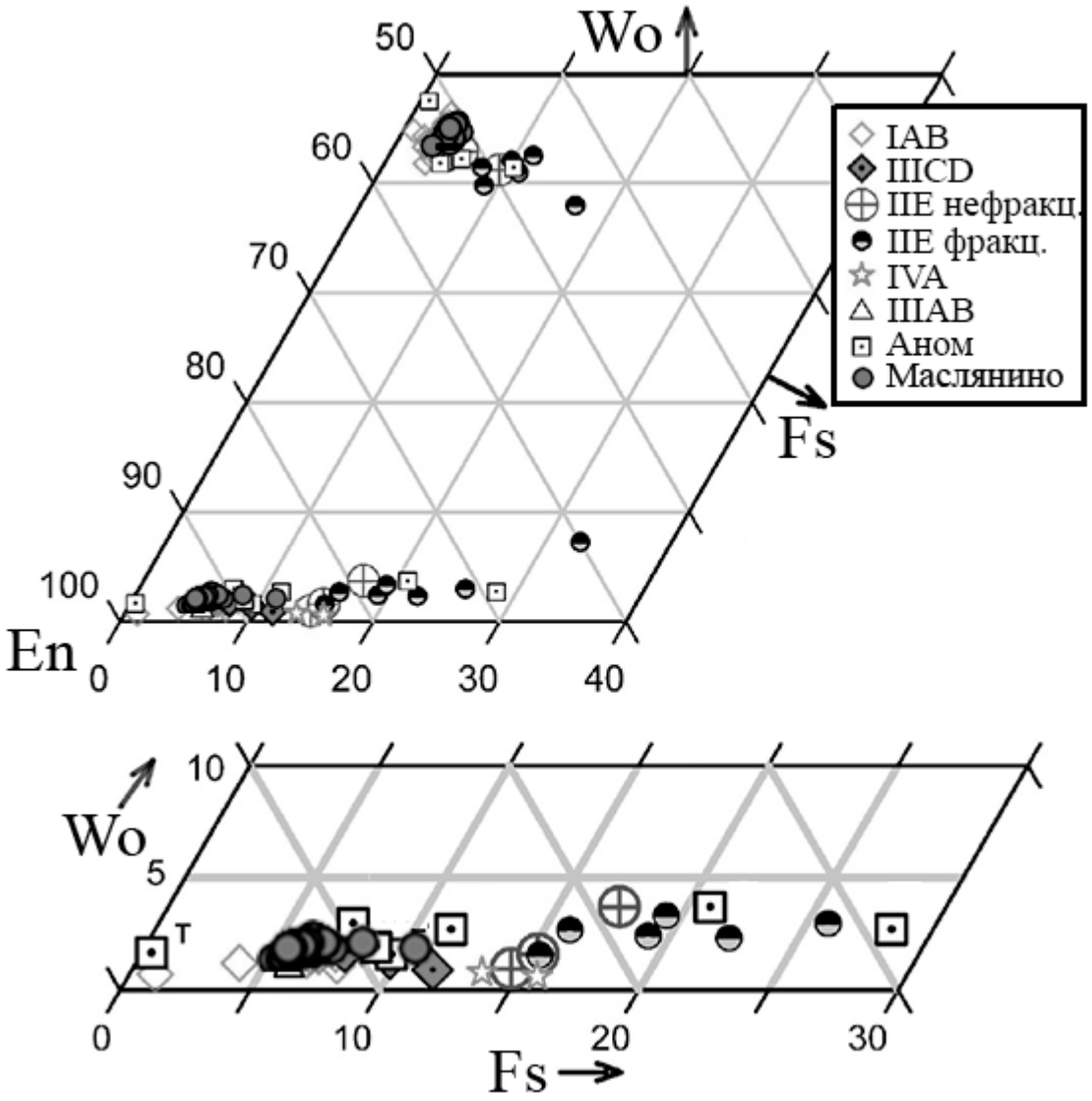

а
Кам
Тэн
б
Тэн
Кам
в
Тэн
Кам

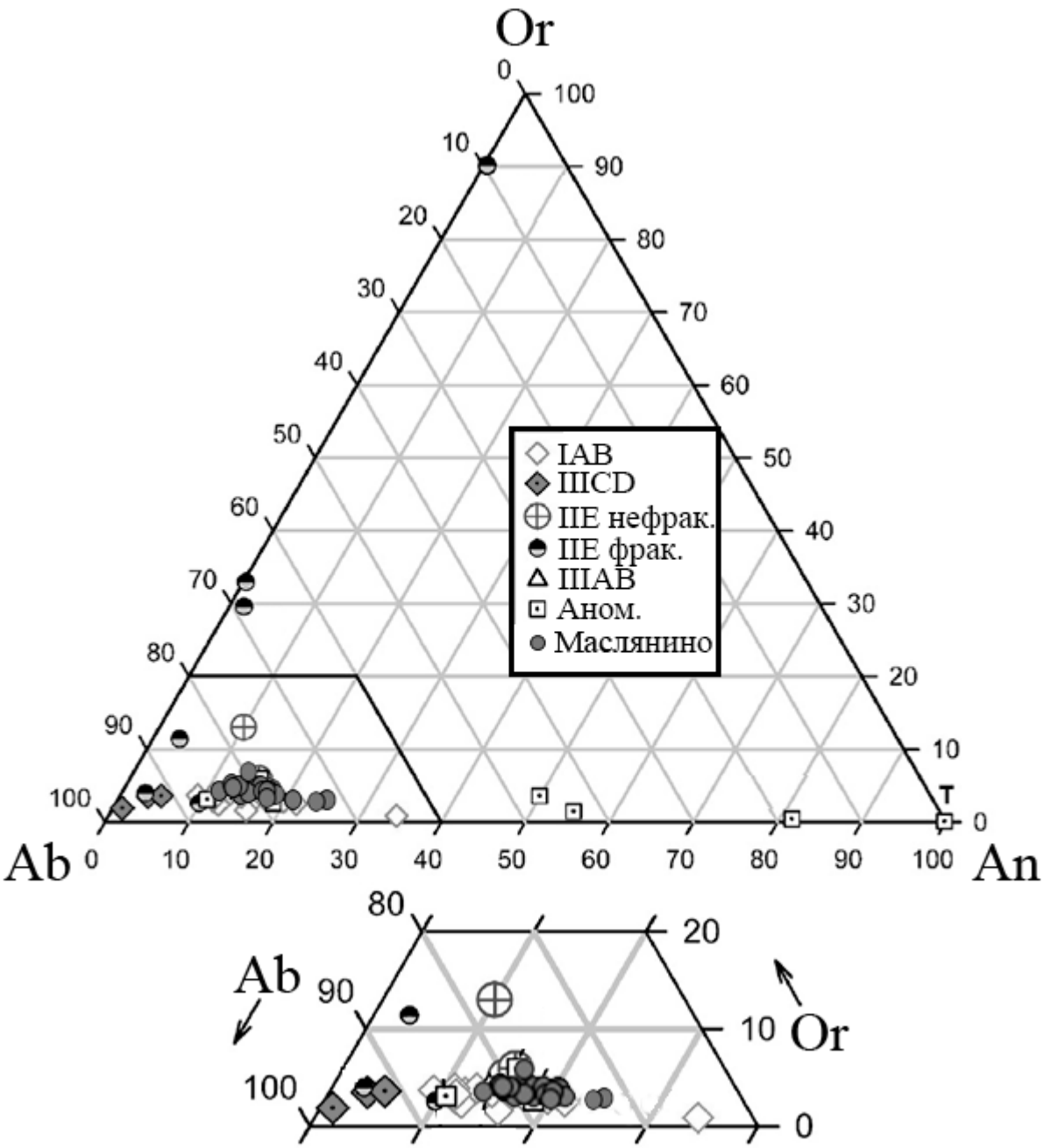

а
Тро
Мер
Хр
Шр
Оп
Пл
Ол
Тр
Кп
Пл
Оп
Ол
Гр
Кам
Тэн
1 мм
б
Тро
Шр
Кам
Тэн
1 мм
в
Кам
Оп
Пл
Мер
Пл
Гр
Ол
Тро
Шр
100 мкм
г
Пл
Оп
Гр
Кп
Кам
Гр
Пл
Гет
100 мкм
д
Кам
Ап
Ол
Оп
Тро
Оп
Гет
Ап
Пл
Шр
Кп
300 мкм
е
Хр
Алт
Тро
Оп
50 мкм

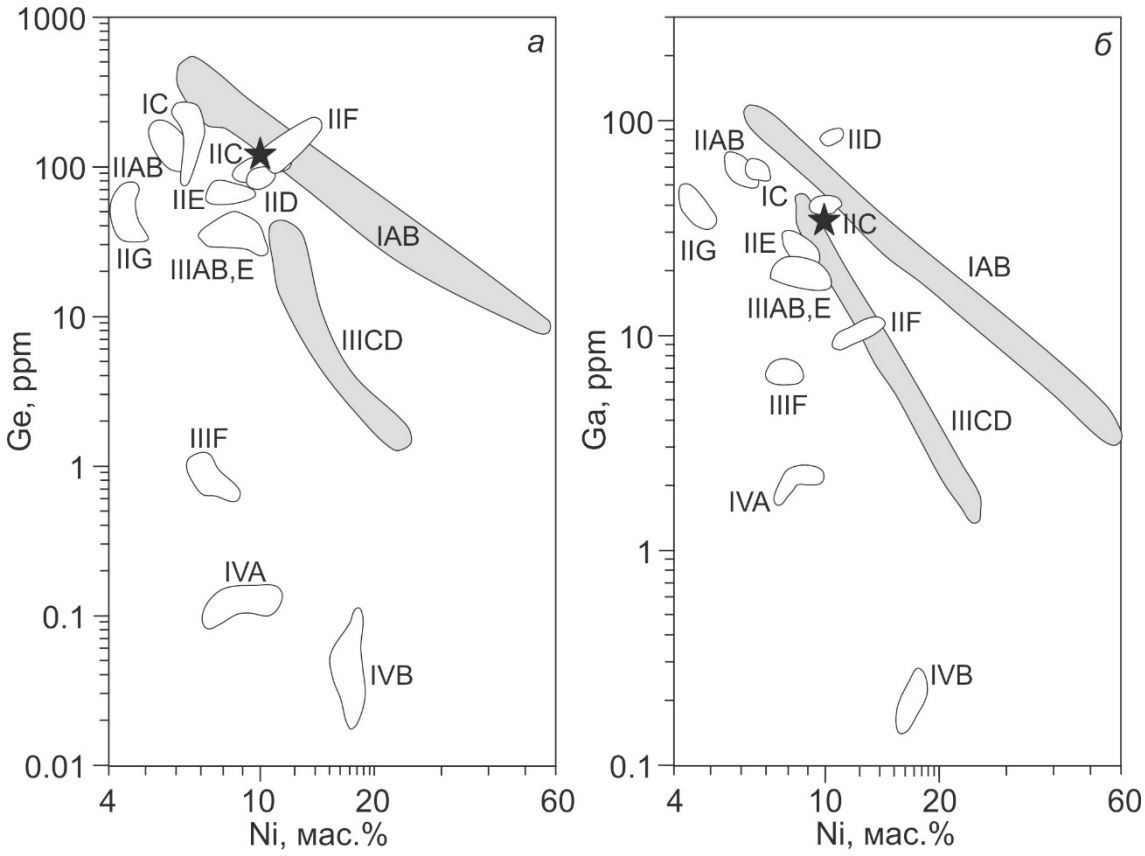

а
б
Ол
в
40 мкм
б
Шр
Гет
Ол
Шр
Тро
Ол-2
10 мкм
Ол
в
Кам
Ол-2
Тро
25 мкм
Кам
г
Ол
д
100 мкм
Шр
д
Доб
Тро
Кам
Шр
Ол
10 мкм
Ол
е
Ол
Хр
Тро
20 мкм

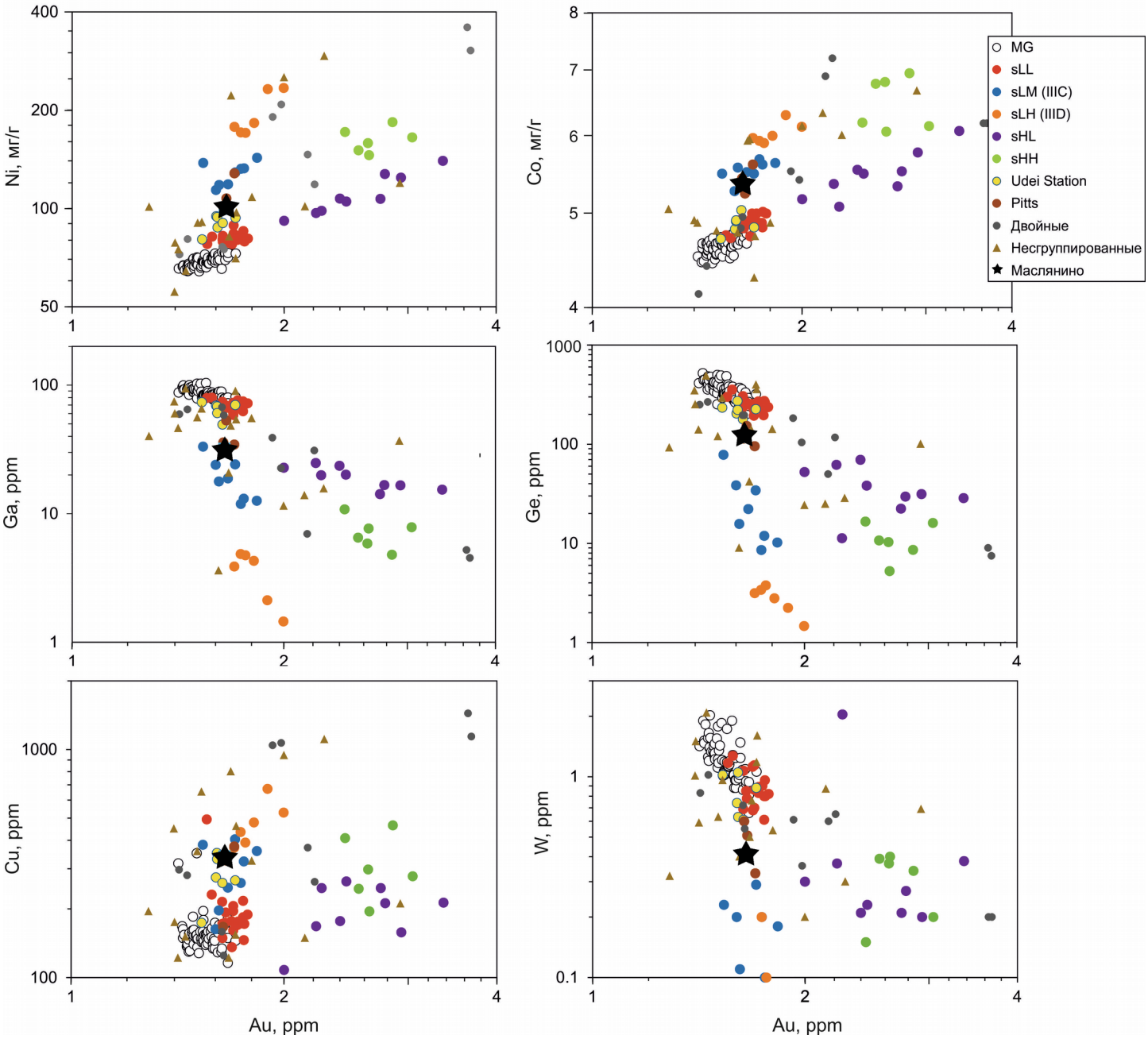

а
Ол
Кам
Пл
Гр
Ол
Гр
б
Оп
Мт
Гр
Мер
Кп
Кам

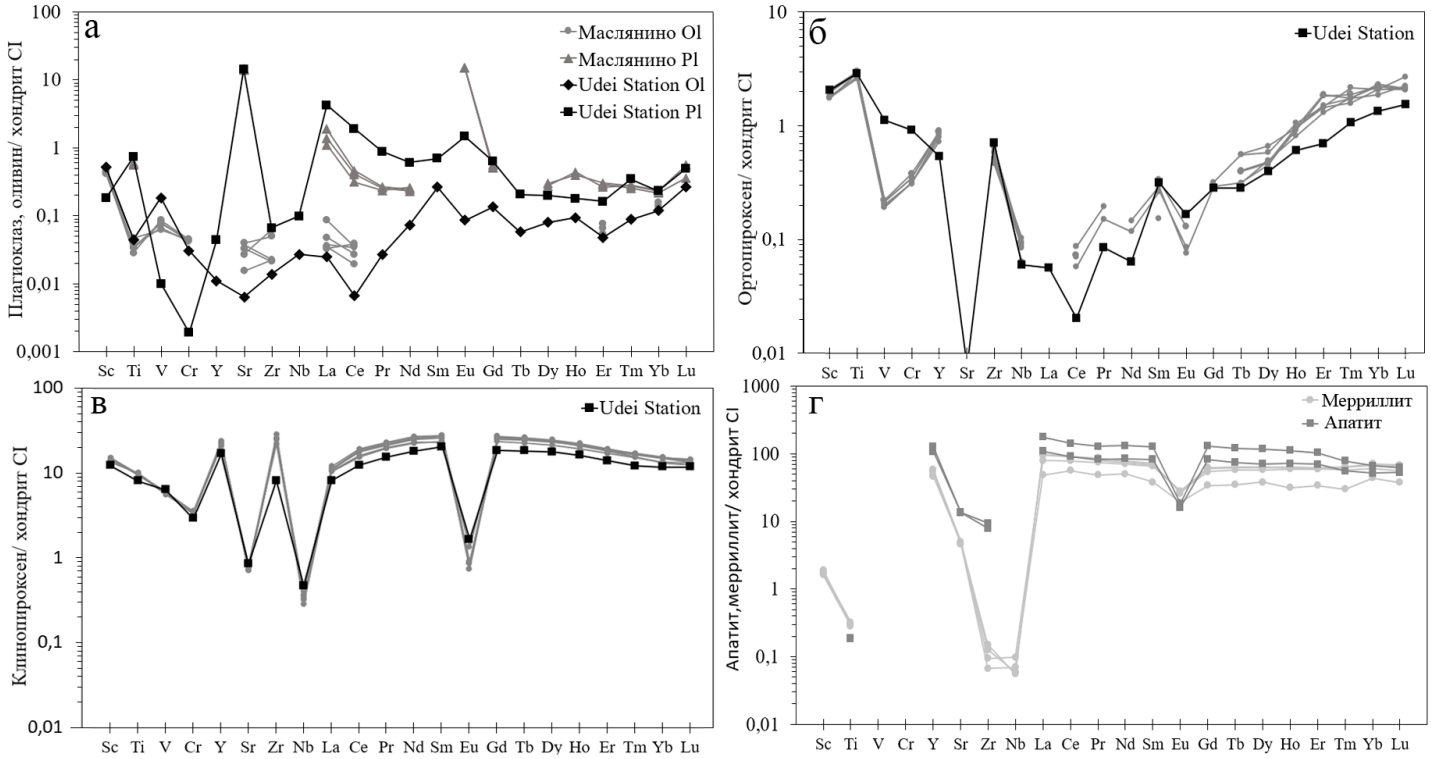

а
Fa4-6
Fa9-13
n, число анализов
Fa (мол.%)
б
IAB
IIICD
IIEнефракц.
IIEфракц.
Не сгруп.
IIIAB
n, число анализов
Fa (мол.%)

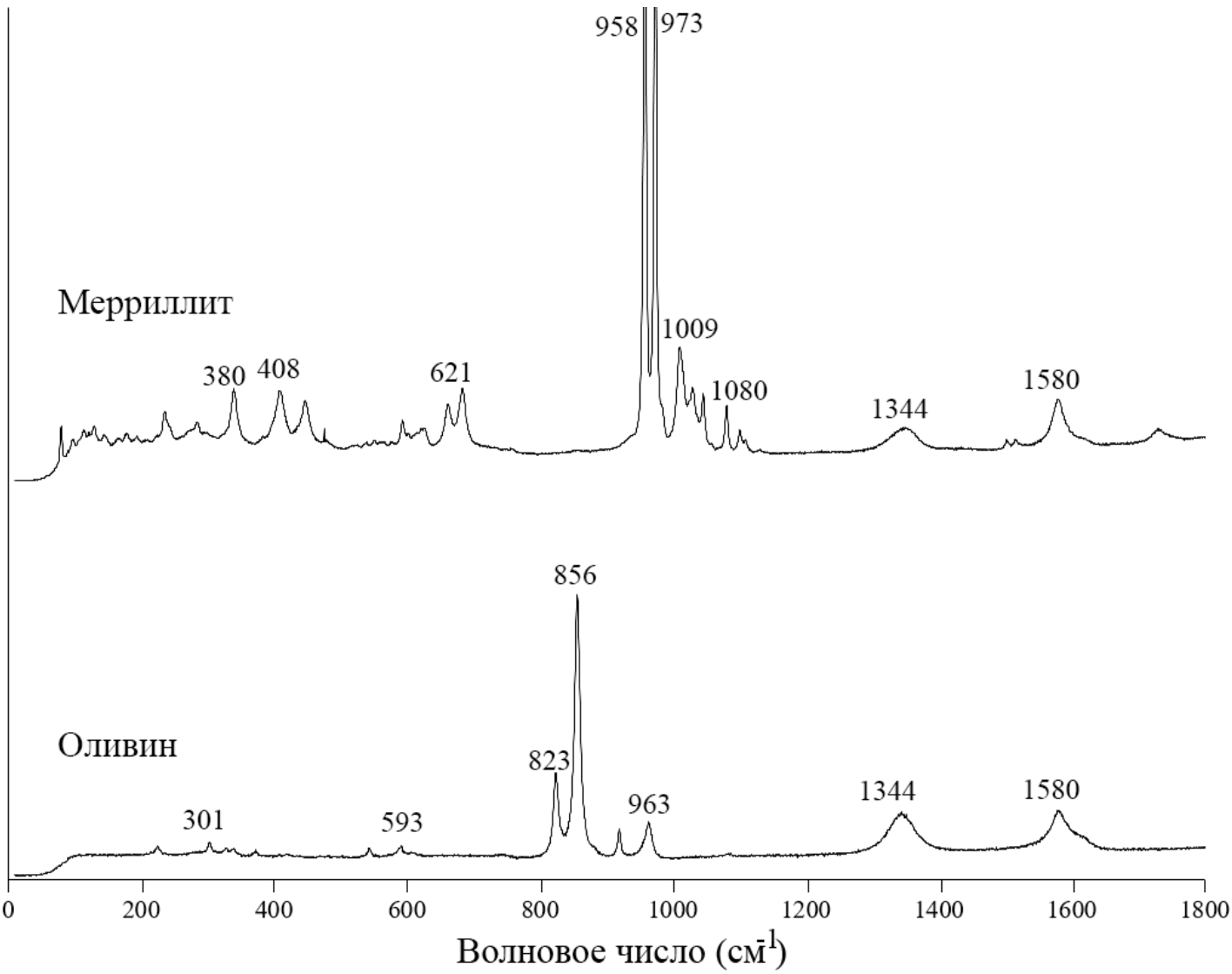

Wo
50
60
70
80
90
100
En
0
10
20
30
40
Fs
IAB
IICD
IIE нефракц.
IIE фракц.
IVA
IIAB
Аном
Маслянино
Wo5
10
T
0
10
20
30
Fs

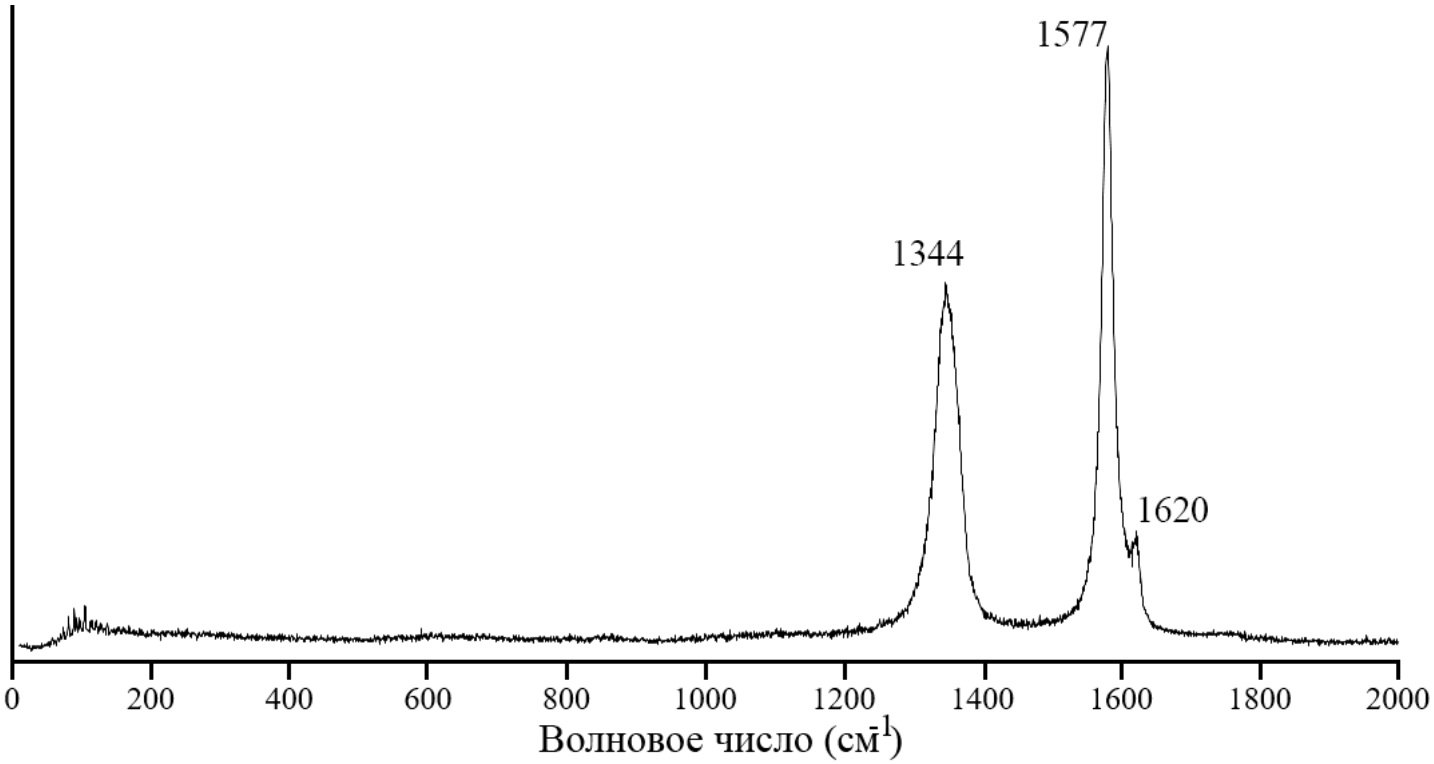

Or
Ab
An
IAB
IICD
IIE нефрак.
IIE фрак.
IIIAB
Аном.
Маслянино
T
Ab
Or

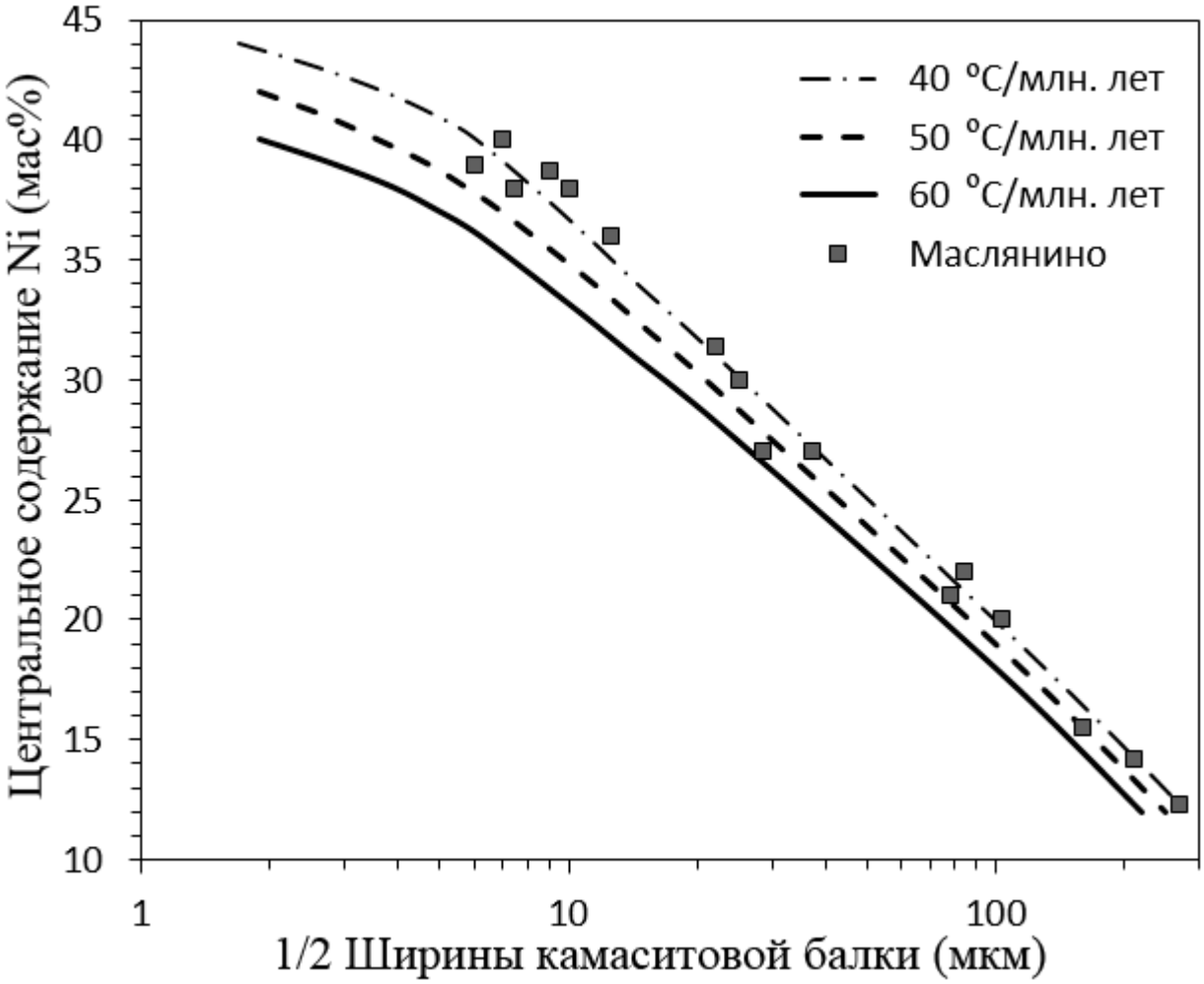

а
б
Ge, ppm
Ga, ppm
Ni, мас.%
1000
100
10
1
0.1
0.01
4
10
20
60
IC
IIF
IIC
IIAB
IIE
IID
IAB
IIG
IIIAB,E
IIICD
IIIF
IVA
IVB
IIAB
IID
IC
IIC
IIG
IIE
IAB
IIIAB,E
IIF
IIIF
IIICD
IVA
IVB

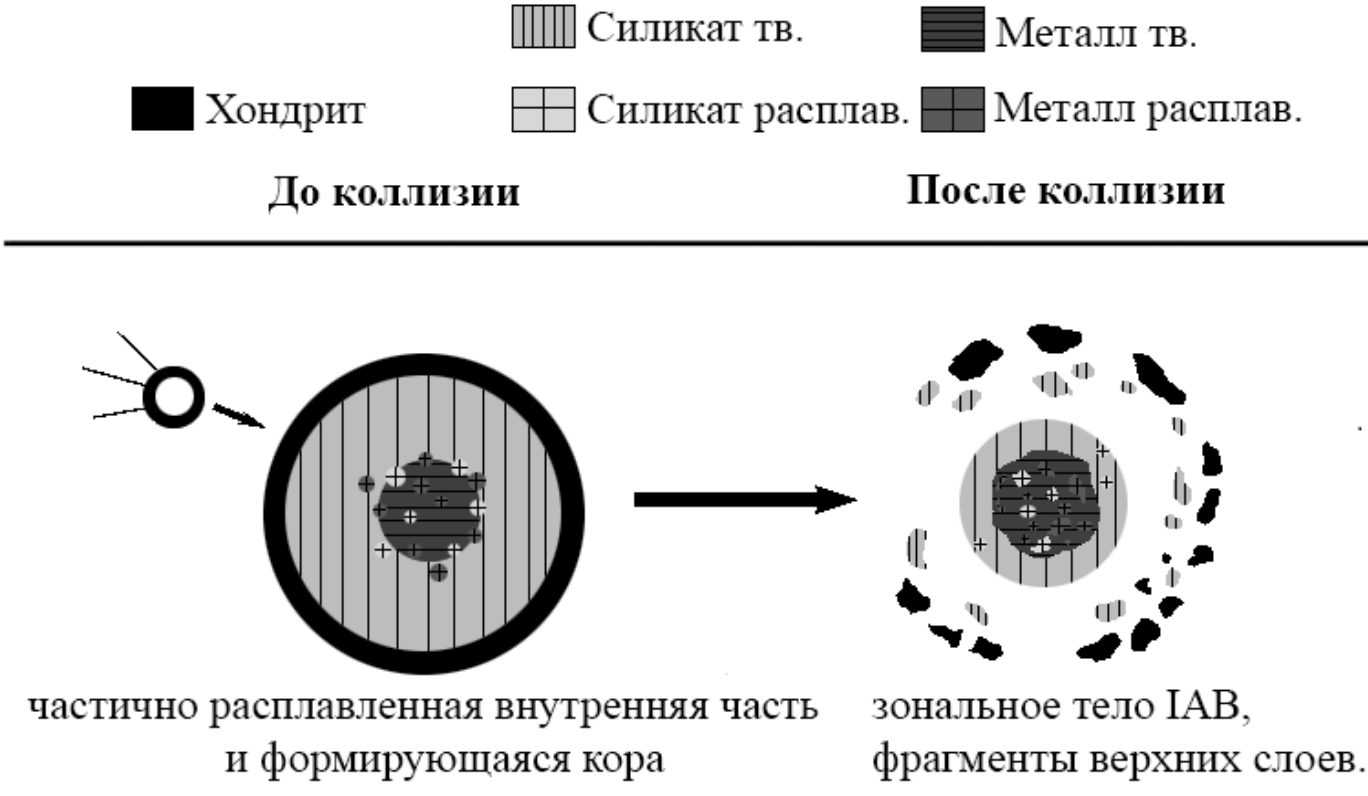

Ni, мг/г
Co, мг/г
Ga, ppm
Ge, ppm
Cu, ppm
W, ppm
Au, ppm
Au, ppm
MG
sLL
sLM (IIIC)
sLH (IIID)
sHL
sHH
Udei Station
Pitts
Двойные
Несгруппированные
Маслянино


а
Маслянино Ol
Маслянино Pl
Udei Station Ol
Udei Station Pl
Плагиоклаз, оливин/ хондрит CI
100
10
1
0,1
0,01
0,001
Sc Ti V Cr Y Sr Zr Nb La Ce Pr Nd Sm Eu Gd Tb Dy Ho Er Tm Yb Lu
б
Udei Station
Ортопироксен/ хондрит CI
10
1
0,1
0,01
Sc Ti V Cr Y Sr Zr Nb La Ce Pr Nd Sm Eu Gd Tb Dy Ho Er Tm Yb Lu
в
Udei Station
Клинопироксен/ хондрит CI
100
10
1
0,1
0,01
Sc Ti V Cr Y Sr Zr Nb La Ce Pr Nd Sm Eu Gd Tb Dy Ho Er Tm Yb Lu
г
Мерриллит
Апатит
Апатит,мерриллит/ хондрит CI
1000
100
10
1
0,1
0,01
Sc Ti V Cr Y Sr Zr Nb La Ce Pr Nd Sm Eu Gd Tb Dy Ho Er Tm Yb Lu


Мерриллит
958
973
1009
380
408
621
1080
1344
1580
Оливин
856
823
963
301
593
1344
1580
0
200
400
600
800
1000
1200
1400
1600
1800
Волновое число (см-1)


1577
1344
1620
0
200
400
600
800
1000
1200
1400
1600
1800
2000
Волновое число (см-1)


45
40
35
30
25
20
15
10
1
10
100
Центральное содержание Ni (мас%)
1/2 Ширины камаситовой балки (мкм)
40 °С/млн. лет
50 °С/млн. лет
60 °С/млн. лет
Маслянино


Силикат тв.
Металл тв.
Хондрит
Силикат расплав.
Металл расплав.
До коллизии
После коллизии
частично расплавленная внутренняя часть
и формирующаяся кора
зональное тело IAB,
фрагменты верхних слоев.