

## Общая и региональная геология, петрология и вулканология

УДК 549.2:552.322

DOI 10.31242/2618-9712-2019-24-3-5

### Самородное железо в долеритах Айхальского силла (первая находка в Якутии)

М.Д. Томшин<sup>1</sup>, Р.Ф. Салихов<sup>2</sup>, А.И. Матушкин<sup>2</sup>, И.В. Маковчук<sup>2</sup>,  
А.Г. Копылова<sup>1</sup>, А.Е. Васильева<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, Якутск, Россия

<sup>2</sup>АК «АЛРОСА», п. Айхал, Россия

tmd@diamond.ysn.ru, SalikhovRV@alrosa.ru

**Аннотация.** В трапповом интрузиве, перекрывающем кимберлитовую тр. Заря, вблизи п. Айхал установлено массивное проявление самородного железа в виде желвакообразных сегрегаций весом до 400 кг. Кроме крупных сегрегаций самородное железо установлено и в виде капель в пороодообразующих минералах долеритов, окаймляющих желваки железа. По петрохимическим показателям долериты силла принадлежат типичным толеитам, выполняющим траппы Сибирской платформы, и соответствуют низкотитанистым базитам ( $TiO_2 \sim 1\%$ ) повышенной магнезиальности ( $Mg\# = 56-63$ ), прошедшим глубинный (докамерный) этап кристаллизации расплава.

Доминирующим минералом в желваках является самородное железо, в подчиненном количестве присутствуют когениит ( $Fe_3C$ ), троилит ( $FeS$ ) и магнетит ( $Fe_3O_4$ ). Рентгенофазовым анализом установлено, что самородное железо отвечает структуре  $\alpha-Fe$  с параметром элементарной ячейки  $a = 0,2860$  нм. Твердость, измеренная по Бринеллю, находится в пределах 110–117 единиц НВ. Рентгеноспектральный анализ показал, что самородное железо относится к высокоуглеродистой разновидности (содержание углерода находится в пределах 2,14–4,02 мас. %). Высокое содержание углерода предполагает, что в металлографическом аспекте железо представляет собой сплав Fe–C. Низкое содержание Ni (менее 1 %) в самородном железе дает основание относить его к минеральному виду – ферриту. Предполагается, что основным условием для возникновения самородного железа в макроколичествах в траппах является фракционирование базитового расплава в глубинной (около 40 км от палеоповерхности) промежуточной камере. В этой обстановке в ходе флюидно-магматического взаимодействия базальтового расплава с высокотемпературным интрателлурическим флюидом, обладающим восстановительными свойствами, происходит диспергирование первично однородной базальтовой жидкости на ликваты на силикатной и металлической основе. Именно тонкодисперсное состояние флюидно-магматической системы обусловило реализацию самородной фазы нахождения, прежде всего, железа.

**Ключевые слова:** Сибирская платформа, траппы, долериты, кимберлиты, самородное железо.

**Благодарности.** Работа выполнена по государственному заказу ИГАБМ СО РАН и при финансовой поддержке гранта РФФИ № 18-45-140043 р\_а.

Авторы благодарны А. В. Округину за высказанные конструктивные замечания, которые были учтены при доработке статьи.

DOI 10.31242/2618-9712-2019-24-3-5

### Native iron in the dolerites of the Aikhal sill (the first discovery in Yakutia)

M.D. Tomshin<sup>1</sup>, R.F. Salikhov<sup>2</sup>, A.I. Matushkin<sup>2</sup>, I.V. Makovchuk<sup>2</sup>,  
A.G. Kopylova<sup>1</sup> and A.E. Vasileva<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Diamond and Precious Metal Geology Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russia

<sup>2</sup>ALROSA Co, Aikhal, Russia

tmd@diamond.ysn.ru, SalikhovRV@alrosa.ru

**Abstract.** A massive manifestation of native iron nodules weighing up to four hundred kilograms was established in a trap intrusive near Aikhal settlement. In addition to large segregations, native iron occurs

*as the drops in the rock-forming minerals of dolerites rimming the iron nodules. In terms of petrochemical composition, the dolerites of the sill belong to typical tholeiites of the traps of the Siberian platform, and correspond to low-Ti basites ( $\text{TiO}_2 \sim 1\%$ ) with increased magnesium content ( $\text{Mg\#} = 56\text{--}63$ ) that have passed through the deep (pre-chamber) stage of melt crystallization.*

*The dominant mineral in the nodules is native iron, with subordinate cohenite ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ), troilite ( $\text{FeS}$ ) and magnetite ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ). X-ray phase analysis revealed that the native iron has the  $\alpha\text{-Fe}$  structure with the unit cell parameter  $a = 0.2860$  nm. The Brinell hardness is in the range of 110–117 HB units. X-ray spectral analysis showed that native iron belongs to a high-carbon variety (2.14–4.02 wt.% C). The high carbon content suggests that the iron is a Fe – C alloy. With regard to low Ni content ( $< 1\%$ ) the native iron corresponds to the mineral species ferrite. It is assumed that the main condition for the presence of macro amounts of native iron in traps is fractionation of basaltic melt in the deep-seated (about 40 km from the paleosurface) intermediate chamber. In this situation, the interaction of the basaltic melt with a high-temperature intratelluric fluid, characterized by highly reducing properties, led to the dispersion of initially homogeneous basaltic liquid into liquates of silicate and metal composition. It is the finely dispersed state of the fluid-magmatic system that favored the appearance of the native phase, above all of iron.*

**Key words:** Siberian platform, trap, dolerites, kimberlites, native iron.

**Acknowledgements.** *The work carried out within the framework of state assignment of DPMGI SB RAS and was financially supported by RFBR grant 18-45-140043 p\_ a. Authors express gratitude to A.V. Okrugin for his constructive comments to this article.*

## Введение

Вскрышными работами на кимберлитовой тр. «Заря» (район п. Айхал) в стенке карьера был обнажен силл траппов. Среди трапповых глыб в верхней части карьера в 2018 г. рабочими Айхальского ГОКа поднято несколько желваков самородного железа. По краям желваки имеют корочки мелкозернистых долеритов. Последнее однозначно свидетельствует о природном происхождении обособлений железа, а выполненное впоследствии изучение долеритов оторочки показало их идентичность с долеритами вскрытого силла. Нахождение самородного железа в породах основного состава в макроколичествах – достаточно редкое явление. В настоящее время его крупные скопления известны в Германии (местечко Бюль), Гренландии (о. Диско) [1–3], на севере Русской платформы [4], на севере Красноярского края (Сибирская платформа) [5–8]. Рассматриваемая – первая находка самородного железа в траппах на территории Якутии [9]. Трапповые интрузивы Красноярского края (Джалтул, Хининда, Хунгтугун и Маймеча) и само железо в них достаточно подробно изучены, в том числе и авторами настоящей работы [5, 6]. Поэтому новая находка проявления самородного железа расширит информацию об этом уникальном природном феномене и позволит уточнить взгляд на его генезис.

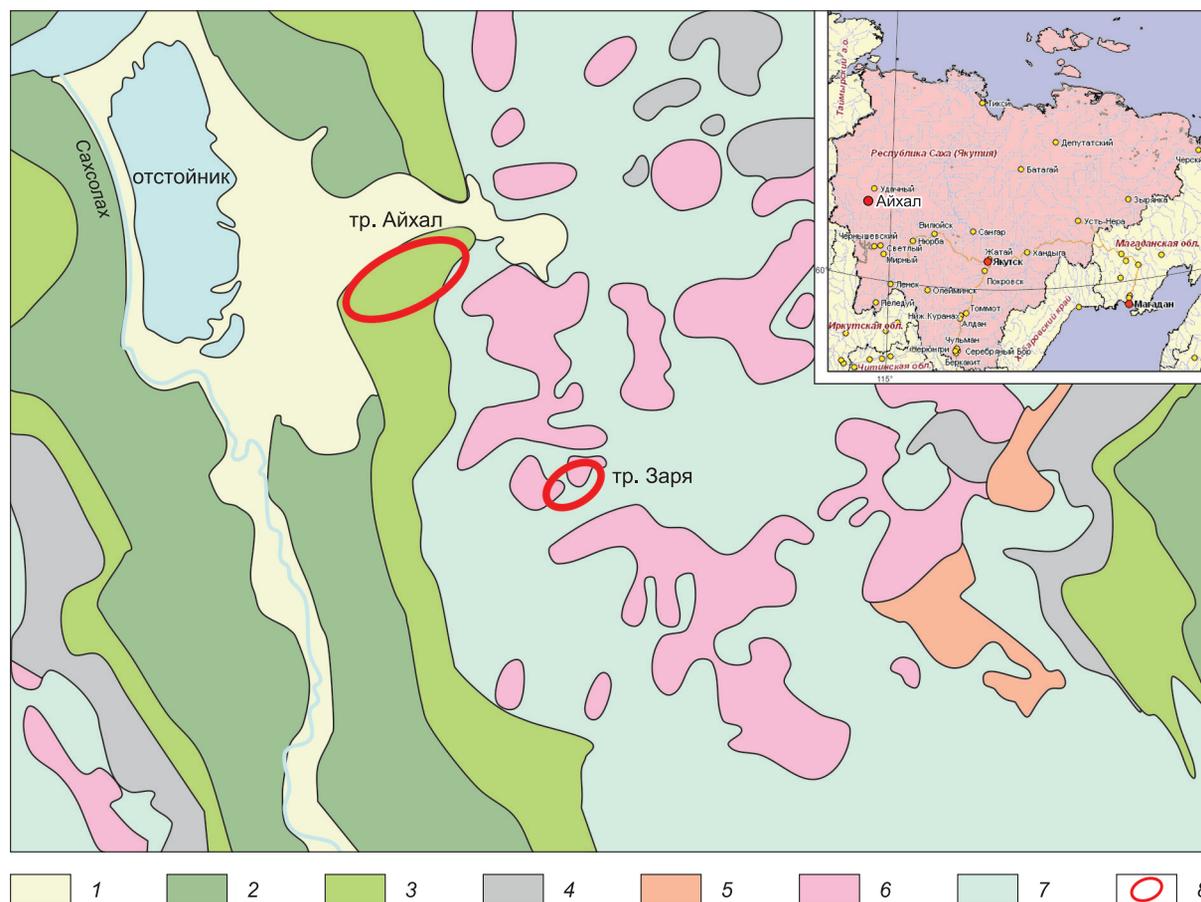
## Методика исследования

Химический состав породообразующих минералов долеритов и самородных металлических

фаз определялся на сканирующем электронном микроскопе JSM-6480LV с энергодисперсионным спектрометром INCA-Energy и волновой приставкой (WDS). Образцы исследовались в аншлифах с тонким напылением на них токопроводящего слоя углерода. Ускоряющее напряжение на катоде 20 кВ, ток пучка 1 нА. Определение химического состава пород проводилось классическим методом мокрой химии, редкие элементы в породах анализировались атомно-эмиссионным спектральным анализом на приборе PGS-2 с приставкой МАЭС в ОФХМА ИГАБМ СО РАН. Текстурно-структурные взаимоотношения породообразующих минералов и самородных фаз исследовались в аншлифах и в прозрачно-полированных шлифах. Рентгенофазовый анализ образцов самородного железа, подготовленных в виде стружки и в аншлифах, выполнен на дифрактометре D2 PHASER фирмы Bruker, при  $\text{CuK}\alpha$ -излучении, напряжении 30 кВ, силе тока 10 мА. Для расшифровки полученных данных использована база данных PDF 2. Замеры твердости самородного железа по Бринеллю проведены твердометром «Heckert» (ИФТПС СО РАН) по ГОСТ 9012-89. Индентор – стальной шарик диаметром 2,5 мм; нагрузка 1840 Н; время выдержки 10 с.

## Характеристика Айхальского силла

Айхальский силл, перекрывающий кимберлитовую тр. «Заря», находится на краю траппового плато (рис. 1) и относится к пермотриасовым трапповым образованиям Тунгусской синеклизы



**Рис. 1.** Схематическая геологическая карта района работ.

1 – четвертичные отложения; 2 – карбонатные породы ордовика,  $O_{1-3}$ ; 3 – терригенно-карбонатные породы нижнего силура,  $S_1$ ; 4 – верхнекарбонные песчаники айхальской свиты,  $C_{2,3}ah$ ; 5 – нижнепермские песчаники ахтарандинской свиты,  $P_1ah$ ; 6 – пермтриасовые туфогенные и туфогенно-осадочные породы алакитской свиты,  $P_2-T_1al$ ; 7 – траппы,  $\beta P_2-T_1$ ; 8 – контуры карьеров.

**Fig. 1.** Schematic geological map of the area of work.

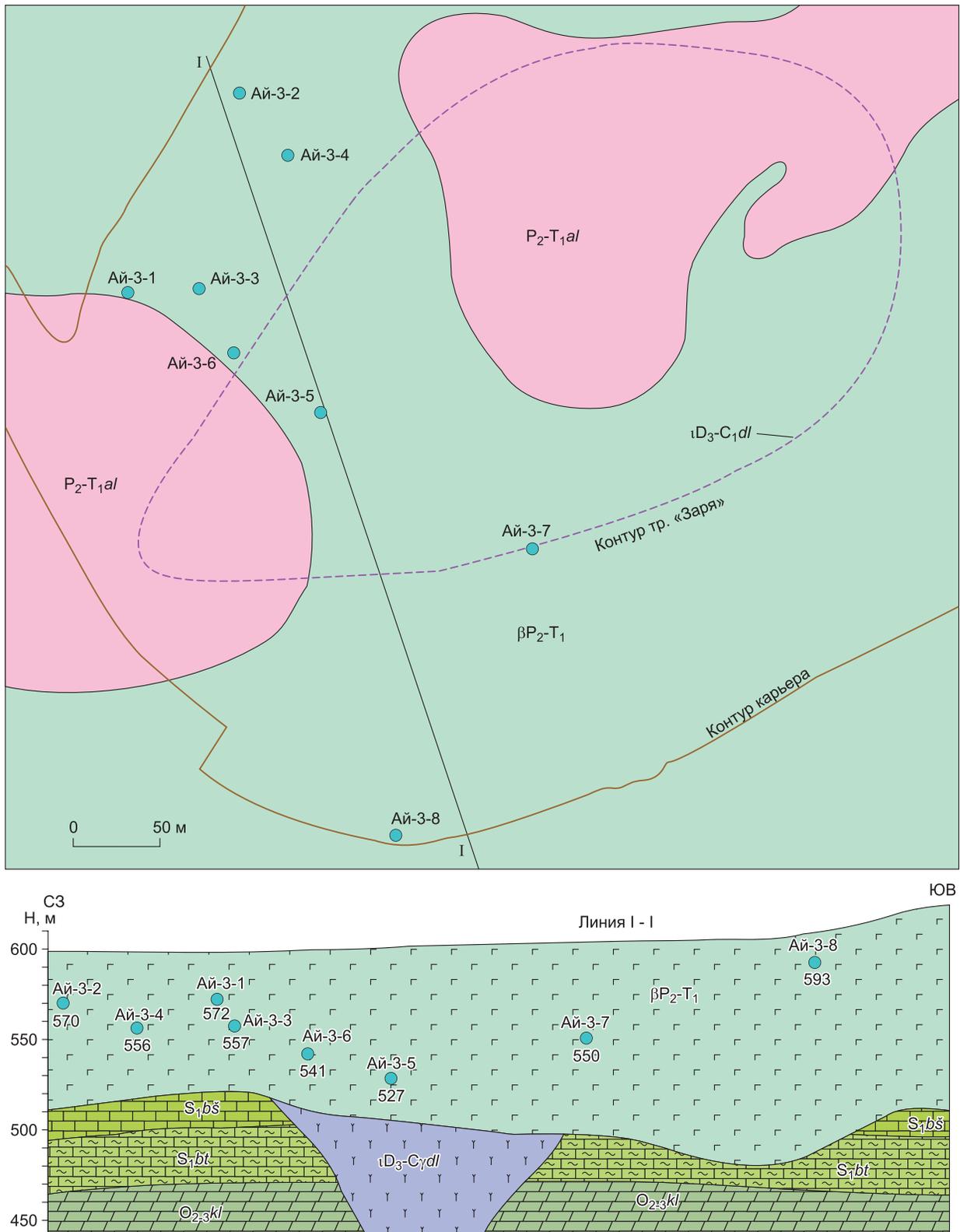
1 – Quaternary deposits; 2 – carbonate rocks of Ordovician  $O_{1-3}$ ; 3 – terrigenous-carbonate rocks of the lower Silurian,  $S_1$ ; 4 – upper Carboniferous sandstones of the Aikhala Suite,  $C_{2,3}ah$ ; 5 – lower Permian sandstones of the Akhtarandinsky suites,  $P_1ah$ ; 6 – the Permo-Triassic tuffaceous and tuffaceous-sedimentary rocks of the Alakit suites,  $P_2-T_1al$ ; 7 – traps,  $\beta P_2-T_1$ ; 8 – contours of quarries.

( $\beta P_2-T_1$ ). Внедрялся силл по межформационной границе терригенно-карбонатных пород нижнего палеозоя с терригенными образованиями верхнего палеозоя. Первые в карьере тр. «Заря» представлены монотонной толщей светло-серых и кремовых глинистых криптозернистых известняков с прослоями серых комковатых глинистых известняков башенной свиты ( $S_1bs$ ) и зеленовато-серыми глинистыми известняками, в меньшей степени мергелями, с тонкими прослоями светло-серых и серых глинистых известняков байтахской свиты ( $S_1bt$ ) (рис. 2).

Верхнепалеозойские терригенные образования представлены разрозненными слабо сцементированными кварц-полевошпатовыми (полимикто-

выми) песчаниками с редкими прослоями алевролитов и аргиллитов ахтарандинской свиты ( $P_1ah$ ). По обрамлению тр. «Заря», возраст которой среднепалеозойский ( $D_3-C_1$ ), верхнепалеозойские терригенные образования в основном денудированы и сохранились фрагментарно лишь в кровле силла. Так же локально в западинах кровли интрузива, в частности в районе карьера, отмечаются туфогенные и туфогенно-осадочные породы алакитской свиты ( $P_2-T_1al$ ) (рис. 2). Таким образом, по геологическим данным, Айхальский силл имеет граничный пермтриасовый возраст. Полученный по обр. Ай-1-5 К-Аг изотопный возраст долеритов силла ( $249 \pm 3$  млн лет) подтверждает это.

САМОРОДНОЕ ЖЕЛЕЗО В ДОЛЕРИТАХ АЙХАЛЬСКОГО СИЛЛА (ПЕРВАЯ НАХОДКА В ЯКУТИИ)



**Рис. 2.** Район расположения карьера на Айхальском силле и тр. Заря. Точками (Ай-3-2) отмечены места отбора проб и их гипсометрическая отметка (570). Усл. обозн. см в тексте.

**Fig. 2.** Location of a quarry on Aikhal sill and Zarya pipe. Points (Ай-3-2) indicate sampling sites and their hypsometric mark (570). See text for symbols.



**Рис. 3.** Вид обнажения траппового силла в карьере тр. «Заря».

**Fig. 3.** A view of the Aikhal trap sill exposed in the quarry of Zarya pipe.

Вскрытая в карьере мощность интрузива – около 60 м (рис. 2, 3). Сложен силл мелко- и среднезернистыми офитовыми и таксито-офитовыми долеритами. В прикровлевых частях интрузива мелкозернистые долериты приобретают пойкилоофитовый облик. В подножии обнажения находятся среднезернистые долериты с пироксенофитовым типом структуры. Последняя обусловлена нахождением крупных округлых ойоккри-

сталлов клинопироксена в окружении более мелких призматических зерен плагиоклаза. Следует подчеркнуть повышенное, относительно типичных долеритов, содержание в породах Айхальского силла оливина, доля которого колеблется от 10 до 16 %. В долеритах силла постоянны минералы I генерации докамерной кристаллизации. К ним относятся битовнит и наиболее магнезиальный авгит (табл. 1) и, по-видимому, идио-

**Средние составы породообразующих минералов долеритов**

Таблица 1

Table 1

**Composition of rock-forming minerals in dolerites**

Минерал	Долериты силла Dolerites of sill	Долериты оторочки Dolerites of rim	Долериты в железе Dolerites in iron
Плагиоклаз Plagioclase	An <sub>37-76; 77-87</sub>	An <sub>59-70; 77-87</sub>	An <sub>46-70</sub>
Пироксен Pyroxene	En <sub>39-48</sub> Fs <sub>12-25</sub> Wo <sub>30-44</sub>	En <sub>41-47</sub> Fs <sub>21-24</sub> Wo <sub>32-35</sub>	En <sub>37-39</sub> Fs <sub>33-43</sub> Wo <sub>30-41</sub>
Оливин Olivine	Fa <sub>42-48; 58-79</sub>	Fa <sub>42-49</sub>	Fa <sub>62-66; 78-92</sub>

## Химический состав долеритов Айхальского силла, мас. %

Table 2

## Chemical composition of dolerites of the Aikhal sill, wt. %

Компонент Component	Ай-0	Ай-3-1	Ай-3-3	Ай-3-4	Ай-3-5	Ай-3-6	Ай-3-7	Ай-3-8	Среднее Average	
									Силл* Sill*	Траппы** Traps**
SiO <sub>2</sub>	41,26	48,77	47,73	47,24	49,69	47,8	48,51	49,3	48,43	48,88
TiO <sub>2</sub>	0,93	1,06	1,12	1,23	1,08	1,14	1,2	1,35	1,17	1,51
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12,85	16,15	15,9	16,37	15,93	16,27	16,66	15,03	16,04	14,38
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9,62	3	2,05	2,88	2,01	2,59	4,04	3,62	2,88	3,96
FeO	13,84	7,47	8,93	8,29	7,31	8,44	6,88	7,8	7,87	9,21
MnO	0,22	0,15	0,22	0,19	0,22	0,21	0,21	0,21	0,20	0,16
MgO	11,25	8,96	9,86	9,5	8,69	9,44	8,32	7,76	8,93	6,60
CaO	7,32	11,62	10,78	10,81	12,03	10,71	11,24	11,63	11,26	10,69
Na <sub>2</sub> O	1,16	1,74	1,83	1,83	1,9	1,89	1,95	2,01	1,88	2,36
K <sub>2</sub> O	0,22	0,33	0,36	0,33	0,35	0,5	0,37	0,42	0,38	0,65
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,08	0,09	0,08	0,09	0,08	0,11	0,1	0,11	0,09	0,21
H <sub>2</sub> O+	0,54	0,8	0,54	0,82	0,53	0,3	0	0,79	0,54	1,07
CO <sub>2</sub>	1,0	0,40	0,80	0,65	0,46	0,94	0,82	0,20	0,61	
S	0,18	0,07	0,07	0,04	0,03	0,04	0,06	0,13	0,06	
F	0,03	0,03	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	
Сумма	100,5	100,6	100,3	100,3	100,3	100,4	100,4	100,4	100,39	99,66
Mg#	47	61	62	61	63	61	58	56	60	50

\* Среднее по силлу без Ай-0 (долерит из оторочки).

\*\* Среднее по траппам востока Тунгусской синеклизы (435 ан.) – данные авторов.

\* Average for the sill without Ai-0 (dolerite from the rim).

\*\* Average for the traps in the east of the Tunguska syncline (435 an.) – data of the authors.

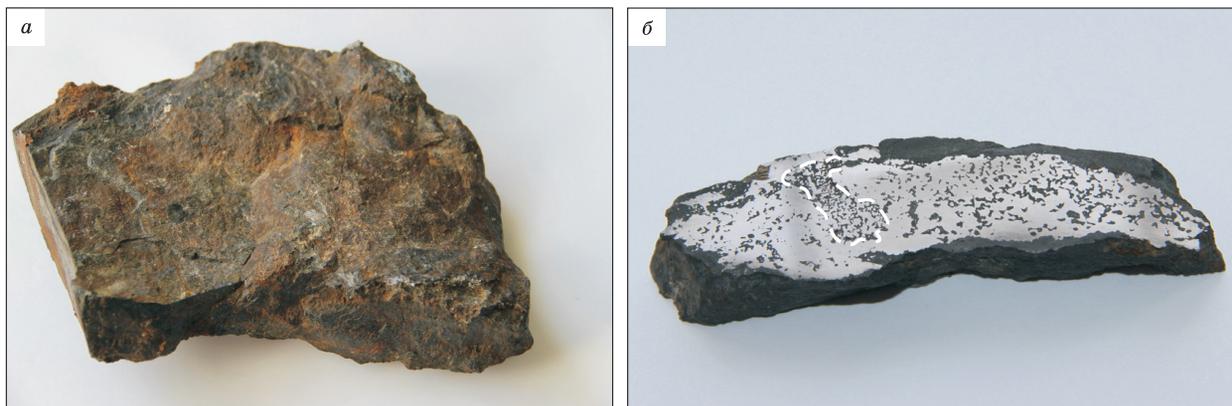
морфные кристаллы и мелкие округлые зерна оливина, полностью замещенные тальк-серпентиновым агрегатом. Долериты характеризуются минимальным количеством мезостазисных участков (до 2 %). Вблизи последних по плагиоклазу развивается ортоклаз. Составы основных породообразующих минералов приведены в табл. 1.

По петрохимическим показателям долериты силла принадлежат типичным толеитам, выполняющим траппы Сибирской платформы, и соответствуют, согласно [10, 11], трапповым интрузивам II петрохимического типа (табл. 2). Это низкотитанистые базиты (TiO<sub>2</sub> ~ 1 %) повышенной магнезиальности (Mg # = 56-63), прошедшие глубинный (докамерный) этап кристаллизации расплава.

### Проявление самородного железа

Один из поднятых в карьере желваков железа (обр. Ай-1) представляет собой валунообразную

сегрегацию эллипсоидной уплощенной формы (рис. 4, а) размером 21×13×3 см и весом 3,95 кг. Еще от одного желвака имеется лишь небольшой срез (обр. Ай-2). По краям желвака наблюдается оторочка мелкозернистого долерита толщиной до 2 см. Поверхность сегрегации неровная, имеет заливообразную форму. Железо в желваках несет следы смятия, деформации и выдавливания силикатного (базальтового) расплава из металлического (железного) матрикса. Особенно хорошо это видно на срезе (рис. 4, б). Внутреннее строение желвака неоднородное. Центральная часть сегрегации имеет массивную сливную форму, состоящую на 95 % из железа. К краю обособления доля силикатной составляющей увеличивается до 25–30 %. Форма выделения железа приобретает губчатую текстуру, обусловленную слипанием отдельных капель железа и их сегрегаций в единый металлический каркас, внутри которого располагается остаточное сили-



**Рис. 4.** Образец Ай-1: *a* – общий вид; *б* – срез желвака. Пунктиром подчеркнута область выдавливания силикатов из металла.

**Fig. 4.** Sample Ai-1: *a* – general view; *b* – a nodule in section. The dashed line shows the area of extrusion of silicates from the metal.

катное вещество. Когда захваченного расплава было достаточно, оно раскристаллизовалось до микродолеритов. В противном случае между каплями железа наблюдаются отдельные разрозненные минералы, в основном пироксен и оливин. Последние имеют более железистый состав, чем эти минералы в долеритах силла и в

долеритах оторочки (см. табл. 1). Здесь, а также в долеритах из оторочки желвака капли самородного железа установлены как включениями в породообразующих минералах, так и в межзерновом пространстве. Составы породообразующих минералов околосиллаковых долеритов аналогичны таковым долеритов силла (см. табл. 1).

Таблица 3

**Химический состав феррита, когенита, троилита, мас. %**

Table 3

**The chemical composition of ferrite, cohenite, troilite, wt %**

Образец	Fe	Ni	Co	Cu	C	Сумма Total
<b>Феррит Ferrite</b>						
Ай-1	97,68	0,74	1,12	0,97	Не обн.	100,51
Ай-1	93,92	0,42	1,22	Не обн.	4,02	99,57
Ай-1	96,77	Не обн.	Не обн.	Не обн.	2,82	99,59
Ай-2	97,81	Не обн.	Не обн.	Не обн.	2,37	100,18
Ай-2	96,55	0,40	0,72	Не обн.	2,14	99,81
<b>Когенит Cohenite</b>						
Ай-1	91,83	0,09	0,18	0,00	8,27	100,31
Ай-2	92,35	0,53	0,37	0,37	6,73	100,35
<b>Троилит Troilite</b>						
Ай-1	61,65	Не обн.	Не обн.	Не обн.	37,49	99,14
Ай-2	62,64	Не обн.	Не обн.	Не обн.	37,00	99,64

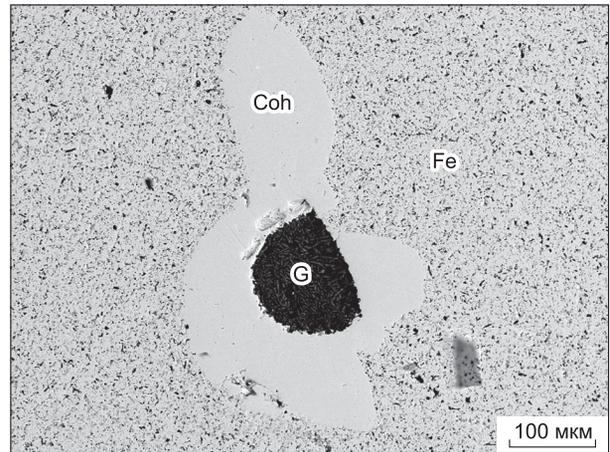
*Примечание.* Определение элементов проводилось на электронном анализаторе Jeol JSM-6480LMV с энергодисперсионным спектрометром (EDS) и волновой приставкой (WDS) в ИГАБМ СО РАН. Аналитик Христофорова Н.В.

*Note.* Elements were determined using a Jeol JSM-6480LMV electronic analyzer equipped with an energy dispersive spectrometer (EDS) and a wave dispersion spectrometer (WDS) at the IGABM SB RAS. Analyst N.V. Khristoforova.

Несмотря на близость составов минералов сравнимых пород по химическому составу они различаются (см. табл. 2). Менее заметно это различие по содержанию  $Al_2O_3$ ,  $MgO$  и  $CaO$  (на 2–3 %), существенно – по  $SiO_2$  (на 7 %), а по сумме железа оно двукратное, что объясняется наличием в долеритах из оторочки капель самородного железа.

Рентгенофазовым анализом установлено, что самородное железо отвечает структуре  $\alpha$ -Fe с параметром элементарной ячейки  $a = 0,2860$  нм. Твердость, измеренная по Бринеллю твердометром «Heckert», находится в пределах 110–117 НВ. Рентгеноспектральный анализ показал, что самородное железо относится к высокоуглеродистой разновидности, содержание углерода находится в пределах 2,14–4,02 мас. % (табл. 3). Кроме углерода в железе установлены Ni, Co, Cu, Ge. По содержанию Ni (менее 1 %) самородное железо относится к минеральному виду – ферриту. Спектральным полуколичественным анализом в нем дополнительно определена примесь Al, Si, Ca, Ti, Mg, Ga в количестве менее 1 %. Предполагается, что основная масса примесей этих последних элементов обусловлена микровключениями силикатных и окисных минералов.

Установлено, что вместе с железом образуются когени́т, троилит и магнетит. **Когени́т** ( $Fe_3C$ ) – второй по степени распространенности минерал в желваке железа. Предельное количество растворения C в Fe – 2,14 %, а избыток углерода выпадает в форме когени́та [12]. Являясь продуктом



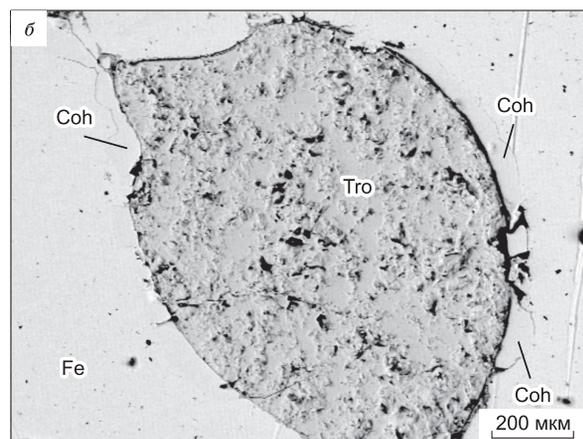
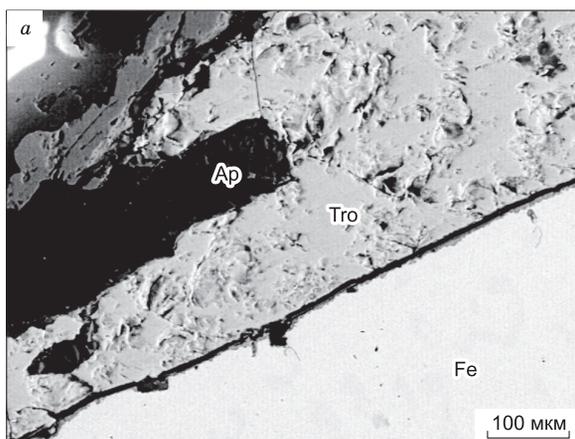
20 kV ×250

**Рис. 5.** Выделение когени́та вокруг силикатной капли в самородном железе. Fe – самородное железо, Coh – когени́т, G – силикатный расплав.

**Fig. 5.** Cohenite segregation around silicate drop in native iron. Fe – native iron, Coh – cohenite, G – silicate melt.

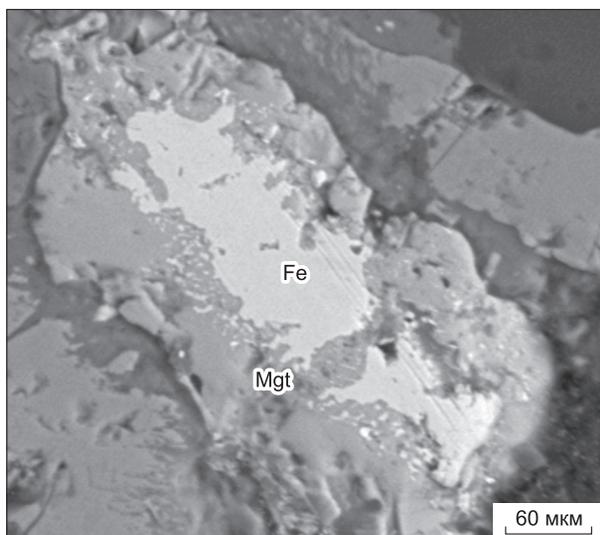
распада железо-углеродного расплава, он образует в железе пламенивидные или причудливо изогнутые червеобразные обособления. Иногда встречаются участки размером 2,5×3,0 мм, выполненные перлитом. Перлит, смесь феррита и когени́та, – продукт эвтектического распада расплава Fe–C при его медленном охлаждении ниже 723 °C (данные металлургии). Содержание когени́та в железе в этом случае может достигать 40 об. %.

Когени́т также образуется на границе капель силикатного расплава в феррите (рис. 5). Рентге-



**Рис. 6.** Троилит: *a* – на контакте железа с долеритом; *б* – каплевидные выделения троилита. Fe – самородное железо, Tro – троилит, Coh – когени́т, Ap – апатит.

**Fig. 6.** Troilite: *a* – at the contact of iron with dolerite; *б* – drop-shaped troilite segregations. Fe – native iron, Tro – troilite, Coh – cohenite, Ap – apatite.



**Рис. 7.** Реакционная кайма магнетита вокруг самородного железа. Fe – самородное железо, Mgt – магнетит.

**Fig. 7.** A reaction rim of magnetite around iron. Fe – native iron, Mgt – magnetite.

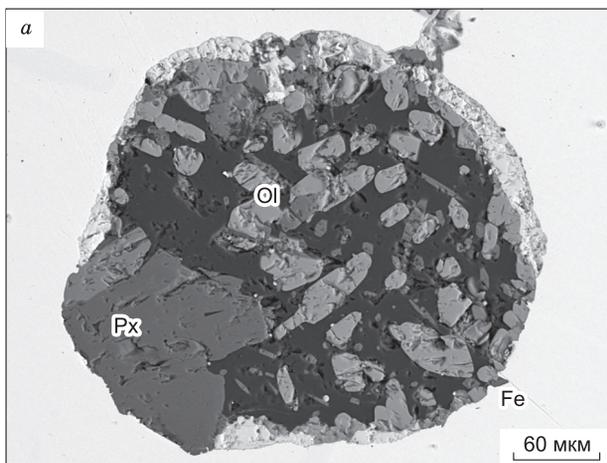
носпектральным анализом в когените установлена невысокая, но стабильная примесь Ni, Co и Cu (табл. 3). Содержание углерода в нем, в пределах погрешности анализа, соответствует стехиометрическому значению в когените, составляющему 6,7 % [13].

**Троилит** ( $\text{FeS}$ ) в парагенезисе с ферритом встречается в двух морфологических разновидно-

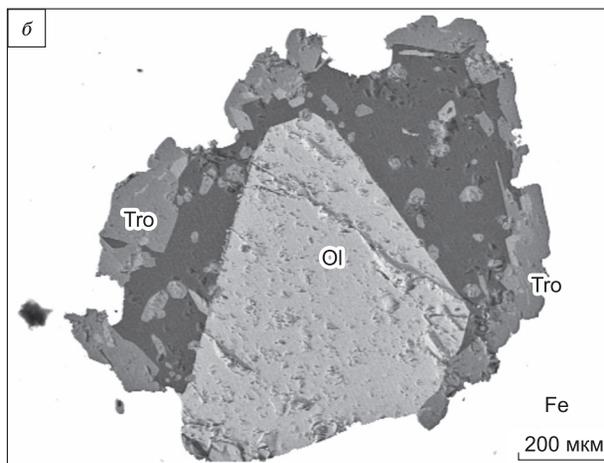
стях. Чаще всего троилит располагается в оторочке по периферии железа на границе его с силикатной породой (рис. 6, а). Вторая его форма выделений – каплевидные обособления в железе, нередко имеющие прерывистую когенитовую кайму (рис. 6, б). Химический состав троилита приведен в табл. 3. По данным рентгеноспектрального анализа, в пределах точности метода троилит практически не содержит примеси других элементов.

**Магнетит** ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) менее распространен и встречается обычно на контакте с железом как реакция на его окисление (рис. 7). Микронзондовым анализом установлено, что содержание железа в минерале достигает 71,82 %, что практически соответствует составу  $\text{Fe}^{2+}\text{Fe}^{3+}_2\text{O}_4$ .

Кроме минеральных включений в самородном железе установлены округлые включения силикатного расплава размером 70–160 мкм. Вещество включений имеет разную степень раскристаллизации – от стекловатых и частично раскристаллизованных образований до включений, в которых четко просматривается микродолеритовая структура, обусловленная породообразующими минералами с уверенно читаемыми кристаллографическими формами. Наблюдаются расплавные включения, в которых фиксируются идиоморфные кристаллы оливина и пироксена, как бы «плавающие» в однородном силикатном матриксе по составу близком к ортоклазу (рис. 8). По периферии такие раскристал-



20 kV ×270



**Рис. 8.** Включения силикатного расплава в железе: а – раскристаллизованное расплавное включение; б – кристалл оливина в раскристаллизованном включении с каймой из троилита. Fe – самородное железо, Tro – троилит, Ol – оливин, Px – клинопироксен.

**Fig. 8.** Inclusions of a silicate melt in iron: а – crystallized melt inclusion; б – an olivine crystal in crystallized inclusion with a rim of troilite grains. Symbols: Fe – native iron, Tro – troilite, Ol – olivine, Px – pyroxene.

лизированные включения оконтурены мелкозернистым агрегатом троилита, образующим сплошную оторочку. В нераскристаллизованных расплавленных включениях лишь просматриваются микронные недиагностируемые удлиненные кристаллиты. Выполненный микрозондом точечный анализ стекловатых включений показал непостоянность его состава. Основные компоненты здесь представлены FeO (до 26 %) и SiO<sub>2</sub> (42 %), в меньших количествах присутствуют MgO (4 %), CaO (8 %) и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (12 %). В пределах первых процентов определены окислы фосфора (3 %), натрия (2 %) и титана (1 %). Доля окиси железа на границе с ферритом резко возрастает.

### Взгляд на генезис самородного железа

Наиболее распространенное мнение о происхождении самородного железа – его восстановление из базитового расплава углистым веществом осадочных пород [14–16; и др.]. В.В. Рябов с соавторами [7], изучая Хунгтугунский интрузив, пришли к выводу, что восстановление железа до нульвалентного состояния произошло в близповерхностных условиях под воздействием восстановительных газов, возникших в результате термального воздействия траппов на битуминозные сланцы. В.В. Золотухин и Ю.Р. Васильев [17] предполагают его образование аутометасоматическим путем в постмагматическую стадию. То есть во всех рассмотренных случаях предполагается восстановление железа в пост- или позднемагматическую стадию эволюции базитового расплава в близповерхностных условиях. Поскольку самородное железо Айхальского силла подобно ферриту Хунгтугунского, Хининдинского и Маймечинского интрузивов, которыми авторы статьи достаточно подробно занимались [5, 6, 18, 19], здесь, с учетом вновь полученного материала, будет предложен наш взгляд на его происхождение.

В свое время [20] было обосновано предположение о метаматической металлизации базальтовой магмы на довнутрикамерный этап ее эволюции. Сущность данного процесса заключается в частичном восстановлении до нульвалентного состояния ряда петрогенных элементов за счет флюидно-магматического взаимодействия вещества магмы с восстановительными компонентами сквозьмагматического по [21] или интрателлурического (в понимании [22]) флюида. Предполагается [23], что в подобных сквозьмагматических флюидах важную роль играли гид-

ридные соединения. Последние обеспечивали инфильтрацию водорода вместе с другими восстановительными соединениями в глубинную промежуточную камеру, что способствовало процессу диспергирования первично однородной базальтовой жидкости на ликваты различного состава как на силикатной, так и на металлической основе [24]. Именно тонкодисперсное состояние флюидно-магматической системы на ранних стадиях ее эволюции обусловило реализацию самородной формы нахождения ряда элементов и, прежде всего, железа. Данное заключение подтверждено находками мельчайших выделений железа в породообразующих минералах габбро-долеритов, образованных из базальтовых магм, прошедших глубинную докамерную эволюцию [25]. Проведенные ранее исследования газовой составляющей в самородном железе и во вмещающих габбро-долеритах [26] показали, что преобладающим летучим компонентом как в металле, так и в силикатной части является водород (до 75 %). Кроме водорода постоянны CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>, CO и CO<sub>2</sub>. Таким образом, ранняя докамерная стадия эволюции базальтовых флюидно-магматических систем характеризуется сильно восстановительной обстановкой, что приводит к металл-силикатной ликвации и, как следствие этого, – к появлению в расплаве самородных форм образования ряда петрогенных элементов.

Можно предположить, что тонкодисперсные фазы железа, перемещаясь вместе с расплавом в ходе броуновской, турбулентной и гравитационной коалесценций, формируют капельно-жидкие сегрегации размером от нескольких микрометров до 2–3 мм. Их сохранность предопределяется, прежде всего, процессами физического взаимодействия металла с компонентами восстановительного флюида, при котором на поверхности металла образуется мономолекулярный слой газа [6, 27]. Наибольшими поверхностно-активными свойствами обладают газы, содержащие углеводородные радикалы [28]. Выше подчеркивалось, что углеводороды – постоянные компоненты газовой фазы как в железе, так и в габбро-долеритах. Мономолекулярная пленка на поверхности капель железа с одной стороны препятствует процессу их дальнейшей коалесценции, ведущей к образованию более крупных капель и сегрегаций, с другой – обеспечивает взвешенное положение мельчайших капель в силикатном расплаве, что вместе взятое препятствует процессу их оседания под действием силы

тяжести в придонные зоны магматической колонны. Наконец, при подъеме флюидно-магматической системы по магмопроводнику в перемещающемся расплаве усиливается отделение растворенной в магме газовой фазы, что приводит к повышению концентрации поверхностно-активных веществ (в основном  $\text{CH}_4$ ) на поверхности сферул железа, образования на них пузырьков газа и повышению флотационного эффекта [29].

При поступлении полифазной базальтовой магмы в гипабиссальную камеру и при дальнейшем ее горизонтальном движении в частично раскристаллизованном расплаве усиливается дегазация магмы, в том числе и от металлических сферул. В данной ситуации уже ничто не мешает процессу слипания и слияния капель железа, образование крупных его сегрегаций вплоть до формирования желвакообразных обособлений. Во время горизонтального движения последние сминаются, деформируются, из них выдавливается силикатное вещество. В центральной части желваки приобретают массивное сложение, а в периферийных участках сохраняются условия для формирования губчатой текстуры. Часть желваков успевает осесть, располагаясь в верхней трети трапповой залежи.

### Заключение

В Айхальском трапповом силле впервые на северо-востоке Сибирской платформы обнаружено масштабное проявление самородного железа в виде сегрегационных обособлений. Установлено, что в ассоциации с ним встречаются когениит, троилит, ранний магнетит и расплавленные силикатные включения. Предполагается, что фракционирование базитового расплава в глубинной (около 40 км от палеоповерхности) промежуточной камере является одним из основных факторов, приводящих к такому явлению как самородное металлообразование в базитах. В обстановке промежуточной камеры в ходе флюидно-магматического взаимодействия базальтового расплава с высокотемпературным интрателлурическим флюидом, обладающим восстановительными свойствами, происходит диспергирование первично однородной базальтовой жидкости на ликваты на силикатной и металлической основе. Именно тонкодисперсное состояние флюидно-магматической системы обусловило реализацию самородной фазы нахождения, прежде всего, железа. Новая находка не только расширяет географию находок, но и дает возможность на новых

объектах рассмотреть возможные генетические вопросы, связанные с металл-силикатной ликвацией.

### Литература

1. *Medenbach O., El Goresy A.* Ulvöspinel in native iron-bearing assemblages and the origin of these assemblages in basalts from Ovifak, Greenland, and Bühl, Federal Republic of Germany // *Contrib. Miner. and Petrol.* 1982. V. 80, N 4. P. 358-366. <https://link.springer.com/article/10.1007/BF00378008#Bib1>
2. *Bird T.M., Goodrich C.A., Weathers M.S.* Petrogenesis of Vivhag iron, Disko Island, Greenland // *J. Geophys. Res.* 1981. V. 86, N 12. P. 11787-11805. <https://doi.org/10.1029/JB086iB12p11787>
3. *Ulf-Møller F.* Solidification History of the Kidlit lens: immiscible metal and sulphide liquids from a basaltic dyke on Disko, Central West Greenland // *J. of Petrology.* 1985. V. 26, N 1. P. 64-91.
4. *Данилов М.А., Юшкин Н.П.* Первая находка олигоценовой лавы с самородным железом на севере Русской платформы // *Докл. АН СССР.* 1979. Т. 249, № 6. С. 1430-1432.
5. *Округин А.В., Томшин М.Д., Левашов В.К., Панков В.Ю.* Проявления самородного железа в траппах Сибирской платформы // *Трапповый магматизм Сибирской платформы в связи с тектоникой и поисками полезных ископаемых* // Тез. докл. 4-й краевой трапповой конференции. Красноярск, 1983. С.110-112.
6. *Самородное металлообразование в платформенных базитах* // Олейников Б.В., Округин А.В., Томшин М.Д., Левашов В.К., Варганов А.С., Копылова А.Г., Панков В.Ю. Якутск, 1985. 188 с.
7. *Рябов В.В., Павлов А.Л., Лопатин Г.Г.* Самородное железо сибирских траппов. Новосибирск: Наука, 1985. 168 с.
8. *Копылова А.Г., Томшин М.Д.* Самородное железо в земных горных породах // *Наука и техника в Якутии.* 2018. № 1. С. 52-55.
9. *Копылова А.Г., Томшин М.Д., Васильева А.Е., Салихов Р.Ф., Матушкин А.И.* Первая находка самородного железа в траппах Якутии // *Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России* // Матер. IX Всеросс. науч.-практ. конф-ции. Т. II. Якутск: Изд-во Ин-та Мерзлотоведения СО РАН, 2019. С. 69-72.
10. *Томшин М.Д., Копылова А.Г., Тянь О.А.* Петрохимическое разнообразие траппов восточной периферии Тунгусской синеклизы // *Геология и геофизика.* 2005. Т. 46, № 1. С. 72-82.
11. *Копылова А.Г., Томшин М.Д.* Геохимия траппов восточной окраины Тунгусской синеклизы // *Отечественная геология.* 2011. № 5. С. 80-88.
12. *Вегман Е.Ф., Жеребин Б.Н., Похвиснев А.Н., Юсфин Ю.С.* Производство черных металлов и сплавов. М.: Академкнига, 2004. 774 с.
13. *Минералы.* Справочник. Т. 1. М.: Изд-во АН СССР, 1960. 617 с.

14. *Старицкий Ю.Г.* Самородное железо и медь с реки Курейки // Зап. ВМО. 1965. Т. 94, вып. 5. С. 580–582.
15. *Vaasjoki O.* On basalt rocks with native iron in Disko, west Greenland // Bull. Commiss. Geol. Finlande. 1965. N 218. P. 85–97.
16. *Pedersen A.K.* Non-stoichiometric magnesian spinels in shale xenoliths from a native iron-bearing andesite of Asuk, Dicko, Central West Greenland // Contrib. Mineral. and Petrol. 1978. V. 67, N 3. P. 397–407.
17. *Золотухин В.В., Васильев Ю.П.* Особенности механизма формирования некоторых трапповых интрузий Сибирской платформы // Самородное минералообразование в магматическом процессе. М.: Наука, 1967. 232 с.
18. *Левашиов В.К., Томишин М.Д., Глушков В.М.* Новое местонахождение самородного железа на Сибирской платформе // Самородное металлообразование в магматическом процессе. Якутск, 1991. С. 4–9.
19. *Kopylova A.G.* Native iron from basites and its geochemistry // Magmatism of the Earth and related strategic metal deposits Proceeding of XXXIV International Conference. 2017. P. 112–115.
20. *Олейников Б.В., Округин А.В.* Ферритизация базальтовых расплавов и ее петрохимическое значение // Минералогия и геохимия ультраосновных и базитовых пород Якутии. Якутск, 1981. С. 5–19.
21. *Коржинский Д.С.* Проблемы петрографии магматических пород, связанных сквозьмагматическими растворами и гранитизацией // Магматизм и связь с ними полезных ископаемых. М.: Изд-во АН СССР, 1955. С. 220–234.
22. *Кузнецов Ю.А., Изох Э.П.* Геологические свидетельства интрателлурических потоков тепла и вещества как агентов метаморфизма и магнообразования // Проблемы петрологии и генетической минералогии. Т. 1. М.: Наука, 1969. С. 7–20.
23. *Ларин В.Н.* Гипотеза изначально гидридной Земли (новая глобальная концепция). М.: Недра, 1980. 216 с.
24. *Панков В.Ю.* Особенности эволюции базальтовой магмы в восстановительных условиях // Самородное металлообразование в магматическом процессе: Сборник научных трудов. Якутск, 1991. С. 48–61.
25. *Олейников Б.В., Томишин М.Д., Округин А.В.* Петрологические черты докамерной эволюции магмы платформенных базитов // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1980. № 1. С. 52–71.
26. *Шуколюков Ю.А., Верховский А.Б., Друбецкий Е.Р. и др.* Поиски изотопных признаков мантийного происхождения вещества самородных металлов в трапповых породах // Геохимия. 1981. № 10. С. 1442–1452.
27. *Олейников Б.В., Округин А.В., Томишин М.Д., Левашиов В.К.* Самородное металлообразование в платформенных базитах // Самородные металлы в изверженных породах. Ч. 1. Якутск, 1985. С. 3–6.
28. *Фролов Ю.Г.* Курс коллоидной химии. Поверхностные явления и дисперсные системы. М.: Химия, 1982. 400 с.
29. *Левашиов В.К., Округин А.В.* Оценка физических условий формирования сегрегаций самородного железа в базальтовом расплаве // Геохимия и минералогия базитов и ультрабазитов Сибирской платформы. Якутск, 1984. С. 54–62.

## References

1. *Medenbach O., El Goresy A.* Ulvöspinel in native iron-bearing assemblages and the origin of these assemblages in basalts from Oviqak, Greenland, and Bühl, Federal Republic of Germany // Contrib. Miner. and Petrol., 1982. V. 80, N 4. P. 358–366. <https://link.springer.com/article/10.1007/BF00378008#Bib1>
2. *Bird T.M., Goodrich C.A., Weathers M.S.* Petrogenesis of Vivhag iron, Disko Island, Greenland // J. Geophys. Res. 1981. V. 86, N 12. P. 11787–11805. <https://doi.org/10.1029/JB086iB12p11787>
3. *Ulf-Møller F.* Solidification History of the Kidlit lens: immiscible metal and sulphide liquids from a basaltic dyke on Disko, Central West Greenland // J. of Petrology. 1985. V. 26, N 1. P. 64–91.
4. *Danilov M. A., Yushkin N. P.* First find of Oligocene lava with native iron in the northern Russian platform // Dokl. AN SSSR. 1979. V. 249, N 6. P. 1430–1432.
5. *Okrugin A.V., Tomshin M.D., Levashov V.K., Pankov V.Yu.* Native iron occurrences in the traps of the Siberian platform // Trap magmatism of the Siberian platform in relation to tectonics and search for mineral deposits. Abstracts of papers submitted to the 4<sup>th</sup> regional trap conference. Krasnoyarsk, 1983. P.110–112.
6. *Oleinikov B.V., Okrugin A.V., Tomshin M.D. et al.* Native metal formation in platformal bazites. Yakutsk, 1985. 188 p.
7. *Ryabov V.V., Pavlov A.L., Lopatin G.G.* Native iron of Siberian traps. Novosibirsk: Nauka, 1985. 168 p.
8. *Kopylova A. G., Tomshin M. D.* Native iron in earth rocks // Science and technology in Yakutia. 2018. N 1. P. 52–55.
9. *Kopylova A.G., Tomshin M.D., Vasilyeva A.E., Salkikhov R.F. Matushkin A.I.* The First finding of native iron in the traps of Yakutia // Geology and mineral resources of the North-East of Russia. Proceedings of the IX all-Russian scientific-practical conference. V. II. Yakutsk: Publishing house of the Institute of Permafrost SB RAS, 2019. P. 69–72.
10. *Tomshin M.D., Kopylova A.G., Tyan O.A.* Petrochemical diversity of traps of the eastern periphery of the Tunguska sineclise // Geology and geophysics. 2005. V. 46, N 1. P. 72–82.
11. *Kopylova A.G., Tomshin M.D.* Geochemistry of traps in the eastern margin of the Tunguska sineclise // Otechestvennaya Geologiya. 2011. N 5. P. 80–88.
12. *Vegman E.F., Zherebin B.N., Pokhvisnev A.N., Yushfin Yu.S.* The manufacture of ferrous metals and alloys. Moscow: Akademkniga, 2004. 774 p.

13. *Minerals*. Reference book. V. 1. Moscow: AN SSSR Publisher, 1960, 617 p.
14. *Staritsky Yu.G.* Native iron and cooper on the Kureyka River // *Zap. VMO*, 1965. p. 94, iss. 5. P. 580–582.
15. *Vaasjoki O.* On basalt rocks with native iron in Disko, west Greenland // *Bull. Commiss. Geol. Finlande*. 1965. N 218. P. 85–97.
16. *Pedersen A.K.* Non-stoichiometric magnesian spinels in shale xenoliths from a native iron-bearing andesite of Asuk, Dicko, Central West Greenland // *Contrib. Mineral. and Petrol.* 1978. V. 67, N 3. P. 397–407.
17. *Zolotukhin V.V., Vasilyev Yu.R.* Specific mechanism for the formation of some trap intrusions of the Siberian platform // *Native mineral formation in a magmatic process*. Moscow: Nauka, 1967. 232 p.
18. *Levashov V.K., Tomshin M.D., Glushkov V.M.* A new find of native iron in the Siberian platform // *Native mineral formation in a magmatic process*. Yakutsk, 1991. P. 4–9.
19. *Kopylova A.G.* Native iron from basites and its geochemistry // *Magmatism of the Earth and related strategic metal deposits* Proceeding of XXXIV International Conference. 2017. P. 112–115.
20. *Oleinikov B.V., Okrugin A.V.* Ferritization of basaltic melts and its petrochemical significance // *Mineralogy and geochemistry of ultrabasics and basic rocks of Yakutia*. Yakutsk, 1981, P. 5–19.
21. *Korzhinsky D.S.* Problems of petrography of igneous rocks associated with transmagmatic solutions and graniticola // *Magmatism and related mineral deposits*. Moscow, AN SSSR Publisher, 1955. P. 220–234.
22. *Kuznetsov Yu.A., Izokh E.P.* Geological evidence of intratelluric heat and material fluxes as agents of metamorphism and magmf formation // *Problems of petrology and genetic mineralogy*. V. 1. Moscow: Nauka, 1969. P. 7–20.
23. *Larin V.N.* A hypothesis for the initially hydrous Earth (new global concept). Moscow: Nedra, 1980. 216 p.
24. *Pankov V.Yu.* Specific evolution of basaltic magma under reduced conditions // *Native metal formation in magmatic process: Collection of scientific works*. Yakutsk, 1991. P. 48–61.
25. *Oleinikov B.V., Tomshin M.D., Okrugin A.V.* Petrological characteristics of pre-chamber evolution of magma for platform basites // *Izv. AN SSSR. Geol. Ser.* 1980. N 1. P. 52–71.
26. *Shukolyukov Yu.A., Verkhovskii A.B., Drubetskii E.R. et al.* Search of isotope evidence for the mantle origin of the matter of native metals in trap rocks // *Geochemistry*. 1981. N 10. P. 1442–1452.
27. *Oleinikov B.V., Okrugin A.V., Tomshin M.D., Levashov V.K.* Native metal formation in platform basic rocks // *Native metals in igneous rocks*. Yakutsk, 1985. P. 3–6.
28. *Frolov Yu.G.* A course in colloid chemistry. Surfaces phenomena and dispersed systems. Moscow: Khimiya, 1982. 400 P.
29. *Levashov V.K., Okrugin A.V.* Estimation of physical conditions of formation native iron in basalt melt // *Geochemistry and mineralogy basic and ultrabasic rocks in the Siberian platform*. Yakutsk, 1984. P. 54–62.

Поступила в редакцию 05.06.2019

Принята к публикации 07.08.2019

#### About the authors

TOMSHIN Mikhail Dmitrievich, leading researcher, head of laboratory, Diamond and Precious Metal Geology Institute, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences (DPMGI SB RAS), 39 Lenina pr., Yakutsk, 677000, Russia, [tmd@diamond.ysn.ru](mailto:tmd@diamond.ysn.ru);

SALIKHOV Ravil Fanisovich, honored geologist of the Republic of Sakha (Yakutia), chief specialist, geological department of the Vilyui exploration expedition; ALROSA Co. (PJSC), Vilyui exploration expedition, Aikhal, 678190, Russia;

MATUSHKIN Alexander Ivanovich, geologist of the 1st category of the geological department of the Vilyui exploration expedition; ALROSA Co. (PJSC), Vilyui exploration expedition, Aikhal, 678190, Russia;

MAKOVCHUK Igor Valentinovich, honored geologist of the Sakha Republic (Yakutia), Chief Geologist, Head of the Department of the Aikhal mining and processing plant ALROSA Co (PJSC), 3 Kornilova str., Aikhal, 678190, Russia;

KOPYLOVA Albina Georgievna, researcher, Diamond and Precious Metal Geology Institute, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences (DPMGI SB RAS), 39 Lenina pr., Yakutsk, 677000, Russia, [kopylova@diamond.ysn.ru](mailto:kopylova@diamond.ysn.ru);

VASILYEVA Alexandra Efimovna, junior researcher, Diamond and Precious Metal Geology Institute, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences (DPMGI SB RAS), 39 Lenina pr., Yakutsk, 677000, Russia, <https://orcid.org/0000-0003-1158-0293>, [lexy\\_v@rambler.ru](mailto:lexy_v@rambler.ru).

*Citation*

Tomshin M.D., Salikhov R.F., Matushkin A.I., Makovchuk I.V., Kopylova A.G., Vasileva A.E. Native iron in the dolerites of the Aikhal sill (the first discovery in Yakutia) // Arctic and Subarctic natural resources. 2019; V. 24, N 3, pp. 50–63. (in Russ). <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2019-24-3-5>

*Об авторах*

ТОМШИН Михаил Дмитриевич, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией, Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, 677980, г. Якутск, просп. Ленина, д. 39, Россия, <https://orcid.org/0000-0001-5865-7521>, [tmd@diamond.ysn.ru](mailto:tmd@diamond.ysn.ru);

САЛИХОВ Равиль Фанисович, заслуженный геолог Республики Саха (Якутия), главный специалист геологического отдела, Вилюйская геологоразведочная экспедиция АК «АЛРОСА» (ПАО), 678190, п. Айхал, Россия, [SalikhovRF@alrosa.ru](mailto:SalikhovRF@alrosa.ru), [Salikhovrf2018@yandex.ru](mailto:Salikhovrf2018@yandex.ru);

МАТУШКИН Александр Иванович, геолог 1 категории геологического отдела, Вилюйская геологоразведочная экспедиция АК «АЛРОСА» (ПАО), 678190, п. Айхал, Россия;

МАКОВЧУК Игорь Валентинович, заслуженный геолог Республики Саха (Якутия), главный геолог, Айхальский горно-обогатительный комбинат АК «АЛРОСА» (ПАО), 678191, п. Айхал, ул. Корнилова, 3, Россия;

КОПЫЛОВА Альбина Георгиевна, научный сотрудник, Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, 677000, г. Якутск, просп. Ленина, 39, Россия, <https://orcid.org/0000-0001-6577-9615>, [kopylova@diamond.ysn.ru](mailto:kopylova@diamond.ysn.ru);

ВАСИЛЬЕВА Александра Ефимовна, младший научный сотрудник, Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, 677000, г. Якутск, просп. Ленина, 39, Россия, <https://orcid.org/0000-0003-1158-0293>, [lexu\\_v@rambler.ru](mailto:lexu_v@rambler.ru).

*Информация для цитирования*

Томшин М.Д., Салихов Р.Ф., Матушкин А.И., Маковчук И.В., Копылова А.Г., Васильева А.Е. Самородное железо в долеритах Айхальского силла (первая находка в Якутии) // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. – 2019. Т. 24. № 3. – С. 50–63. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2019-24-3-5>