

ПЕТРОЛОГИЯ, ГЕОХИМИЯ И МИНЕРАЛОГИЯ

УДК 549.623; 549.753.4; 550.4; 552.321.5

ФТОР И ХЛОР В АПАТИТАХ, СЛЮДАХ И АМФИБОЛАХ РАССЛОЕННЫХ  
ТРАПОВЫХ ИНТРУЗИЙ СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ

В.В. Рябов, О.Н. Симонов\*, С.Г. Снисар\*

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

\* Заполняемый филиал ПАО «Норильский никель», 663330, Красноярский край, Норильск, пл. Гвардейская, 2, Россия

Впервые на новом фактографическом и аналитическом материале (свыше 1000 ан.) изучена геохимия хлора и фтора в апатитах, слюдах и амфиболах в породах из восьми интрузивных комплексов региона. Основное внимание уделяется минералам из расслоенных интрузий. В подавляющей массе апатитов  $F > Cl$  максимальные содержания галогенов имеют хлорапатит —  $Cl = 6.97$  мас.% и фторапатит —  $F = 6.04$  мас.%. Общая железистость ( $f = Fe/(Fe + Mg)$ , ат.%) фемических минералов варьирует: в слюдах от 2 до 98 ат.%, в амфиболах от 22 до 95 ат.%. На графиках зависимости  $Cl-f$  и  $F-f$  в минералах при повышении  $f$  отмечается увеличение содержания  $Cl$ , а при понижении  $f$  — увеличение  $F$ .

Хлор проявляет ярко выраженную феррофильность, а фтор — магниофильность. Наиболее богатыми галогенами являются: фторфлогопит —  $F = 7.06$  мас.% ( $f = 7$  ат.%), хлораннит —  $Cl = 6.30$  мас.% ( $f = 89$  ат.%), хлорферригастингсит —  $Cl = 5.22$  мас.% ( $f = 90$  ат.%). Сосуществующие в породах слюды и амфиболы имеют близкую по величине  $f$ , а содержание  $Cl$  в слюдах выше, чем в амфиболах. Предполагается, что кристаллизация галогенсодержащих минералов происходила в условиях повышенного флюидного давления галоидоуглеводородных флюидов на уровнях MW-, IW- и QIF-буферов. Показателем восстановительных условий магматогенного процесса являются находки в породах графита и самородных металлов. Сходство геохимических трендов  $Cl-f$  и  $F-f$  в слюдах и амфиболах из различных интрузивных комплексов свидетельствует об идентичности в них механизма дифференциации расплава и кристаллизации минералов.

*Траппы, расслоенные интрузии, геохимия галогенов, апатит, слюда, амфибол, Сибирская платформа*

FLUORINE AND CHLORINE IN APATITES, MICAS, AND AMPHIBOLES  
OF LAYERED TRAP INTRUSIONS OF THE SIBERIAN PLATFORM

V.V. Ryabov, O.N. Simonov, and S.G. Snisar

Geochemistry of chlorine and fluorine in apatites, micas, and amphiboles in rocks from eight intrusive complexes of the Siberian Platform has been first studied on the basis of new factual and analytical data (more than 1000 analyses). The main attention is focused on minerals from layered intrusions. Most apatites show  $F > Cl$ ; the maximum contents of halogens are specific to chlorapatite (6.97 wt.% Cl) and fluorapatite (6.04 wt.% F). The total  $f$  value ( $f = Fe/(Fe + Mg)$ , at.%) of femic minerals varies from 2 to 98 at.% in micas and from 22 to 95 at.% in amphiboles. The  $Cl-f$  and  $F-f$  trends show an increase in the Cl content and a decrease in the F content in the minerals with increasing  $f$ .

Chlorine clearly exhibits ferrophilic properties, and fluorine has magnesiophilic properties. The halogen-rich minerals are fluorophlogopite ( $F = 7.06$  wt.%,  $f = 7$  at.%), chlorannite ( $Cl = 6.30$  wt.%,  $f = 89$  at.%), and chloroferrihastingsite ( $Cl = 5.22$  wt.%,  $f = 90$  at.%). Coexisting micas and amphiboles in the rocks are close in  $f$  value, but the micas are richer in Cl than the amphiboles. We assume that the halogen-containing minerals crystallized at the high pressure of halogen–hydrocarbon fluids at the levels of the MW, IW, and QIF buffers. The reducing conditions of the magmatism process are also evidenced by the presence of graphite and native metals in the rocks. The similarity of the  $Cl-f$  and  $F-f$  trends of micas and amphiboles from different intrusive complexes indicates the same mechanisms of the melt differentiation and mineral crystallization.

*Traps, layered intrusions, geochemistry of halogens, apatite, mica, amphibole, Siberian Platform*

## ВВЕДЕНИЕ

Галогены являются весьма активными химическими элементами с исключительно высокой реакционной способностью в широком диапазоне физико-химических условий. В магматогенных процессах фтор тесно связан с алюмосиликатными расплавами, а хлор является важнейшим комплексообразующим компонентом для большинства рудогенных металлов, и его поведение характеризует их миграцию из расплавов [Маракушев и др., 1997]. Считается, что это связано с высокой растворимостью хлора в водных растворах и слабыми его связями с алюмосиликатными расплавами по сравнению с фтором и фосфором.

Непосредственными свидетелями участия галогенов в магматогенном и рудообразующем процессах являются гидроксилсодержащие минералы, в кристаллическую структуру которых в переменных количествах входят фтор и хлор.

В процессе становления интрузий гидрофильность хлора приводит к переходу его в водосодержащий флюид, который отделяется от расплава. В результате этого происходит уменьшение содержания хлора в магматических расплавах, которое не позволяет судить о его первоначальном содержании в магмах и о потерях его в процессе эволюции магматической системы [Кравчук и др., 1998]. Эта ситуация создает неопределенность роли галогенов в рудно-магматическом процессе, поскольку наблюдаемое в породах и минералах содержание хлора и фтора отражает не первоначальную концентрацию галогенов в магмах, а состояние на момент их кристаллизации. Сравнительно достоверные первоначальные содержания хлора могут сохраняться только в водонасыщенных расплавах. Высокая гидрофильность хлора является причиной того, что его геохимия в восстановительных условиях в природных процессах мало изучена из-за крайне редких случаев их проявления. Этот пробел позволяют заполнить новые данные по геохимии галогенов в минералах расслоенных трапповых интрузий различных комплексов Курейского рудного района на северо-западе Сибирской платформы, формирование которых происходило в восстановительных условиях [Рябов, 2016]. Убедительным подтверждением этому являются находки в породах и рудах расслоенных интрузий различных структурированных форм углерода в виде микро- и нанотрубок графита, клифтонита, пластинчатого графита, углеродистого вещества, битумов, а также карбидов, интерметаллидов и самородных металлов [Никольский, 1987; Буслаева, Новгородова, 1989; Ryabov, Lapkovsky, 2010; Ryabov et al., 2014].

## СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ

Флюидный режим рудно-магматических систем в траппах Сибирской платформы является актуальной проблемой, с которой тесно связаны вопросы дифференциации базальтовых расплавов, происхождения расслоенных интрузий и рудных месторождений, в том числе сульфидных PGE-Cu-Ni месторождений-гигантов норильского типа. Эти вопросы на протяжении многих десятилетий обсуждаются в геологической литературе, но, несмотря на, казалось бы, хорошую изученность норильских объектов, среди геологов до сих пор не достигнуто единогласия ни по одной из основных генетических проблем, по которым высказываются самые различные представления. Успешное решение проблемы флюидного режима в траппах сдерживается недостаточной изученностью в них геохимии летучих компонентов, в том числе хлора и фтора.

Геохимия таких известных и важных в рудно-магматических процессах химических элементов, как хлор и фтор, на протяжении многих лет «ускользала» от внимания геологов и до сих пор не изучена. Уровень геохимических исследований галогенов в породах региона ограничивается рассеянными в различных публикациях фрагментарными данными по галогенсодержащим минералам. Единственным объектом, для которого имеется сравнительно полная информация по галогенам, является Верхнеталнахская интрузия [Ryabov et al., 2014]. Однако эти данные отражают только частный случай, который, к сожалению, не дает представления о геохимии галогенов в траппах в целом и, более того, не позволяет оценить своеобразие поведения галогенов в рудоносных интрузиях в сравнении с безрудными, данные по которым отсутствуют.

В связи с траппами Сибирской платформы рудообразующая роль хлора детально изучена в магнетитовых месторождениях ангаро-илимского типа [Павлов, 1961, 1975; и др.]. Для сульфидных месторождений норильского типа возможное участие хлора пока только декларативно предполагается. Основанием для такого предположения, в частности, являются присутствие в рудах галогенсодержащих апатитов и слюд, а также находки хлорсодержащих сульфидов и хлорида палладия [Рудашевский и др., 1979; Карпенков и др., 1981; Дистлер и др., 1999; Ryabov et al., 2014].

Оценивая состояние проблемы, можно отметить, что вопрос участия и роли галогенов в процессах дифференциации расплава и сульфидного рудообразования в настоящее время остается открытым. Этот вопрос невозможно решить без предварительного изучения геохимии галогенов в траппах в целом, поэтому его решение следует начинать с изучения поведения F и Cl в галогенсодержащих минералах.

Принимая это во внимание, цель настоящей работы заключается в выяснении минералого-геохимических особенностей поведения фтора и хлора в магматогенных апатитах, слюдах и амфиболах из пород интрузивных комплексов северо-запада Сибирской платформы.

## КАМЕННЫЙ МАТЕРИАЛ И АНАЛИТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

В настоящей статье обобщены результаты многолетних минералого-геохимических исследований поведения фтора и хлора в интрузивных траппах северо-запада Сибирской платформы, которые проводились в ИГМ СО РАН (г. Новосибирск). Основное внимание уделяется новому фактографическому и аналитическому материалу по интрузивным комплексам Курейского рудного района северо-запада Сибирской платформы. Полевые геологические исследования: документация обнажений и керн буровых скважин, отбор проб и камеральная обработка материалов проводились геологическим отрядом лаборатории 213 ИГМ СО РАН. Финансирование экспедиционных работ и аналитических исследований осуществлялось ООО «Норильскгеология» и ПАО «НГМК «Норильский никель». Рентгеноспектральный анализ минералов выполнялся на микроанализаторах Cameca Camebax-Micro и JEOL JXA8100 в ЦКП многоэлементных и изотопных исследований СО РАН. Для построения графиков использованы оригинальные данные по составу апатитов (200 ан.), слюд (570 ан.) и амфиболов (260 ан.) из интрузивных комплексов Курейского рудного района, для сравнения использовались ранее опубликованные материалы [Ryabov et al., 2014] и новые данные по интрузиям норильского комплекса.

## ГАЛОГЕНСОДЕРЖАЩИЕ МИНЕРАЛЫ В ТРАППАХ

По составу родоначальной магмы траппы Сибирской платформы представлены производными толеит-базальтовых, пикрит-базальтовых и трахибазальтовых расплавов. Траппы делятся на эффузивные и интрузивные, первые подразделяются на свиты, вторые — на интрузивные комплексы и типы интрузий [Лурье и др., 1962; Ryabov et al., 2014; Рябов, 2016].

Для предлагаемого в настоящей статье исследования были выбраны интрузии, которые представляют курейский (kr), кузьмовский (kz), катангский (kt), агатский (ag), норильский (nr) интрузивные комплексы пород нормального ряда, и ергалахский (er), пясинский (ps) и тымерский (tm) комплексы пород умеренно щелочного ряда. В интрузиях перечисленных комплексов из галогенсодержащих минералов отмечаются апатит, слюда и амфибол, поэтому исследования геохимии F и Cl в траппах проводились на примере этих трех минералов. В вулканогенных свитах изучался только апатит из трахибазальтов и трахиандезитобазальтов, поскольку он является единственным галогенсодержащим минералом в эффузивах и встречается только в производных субщелочных расплавов.

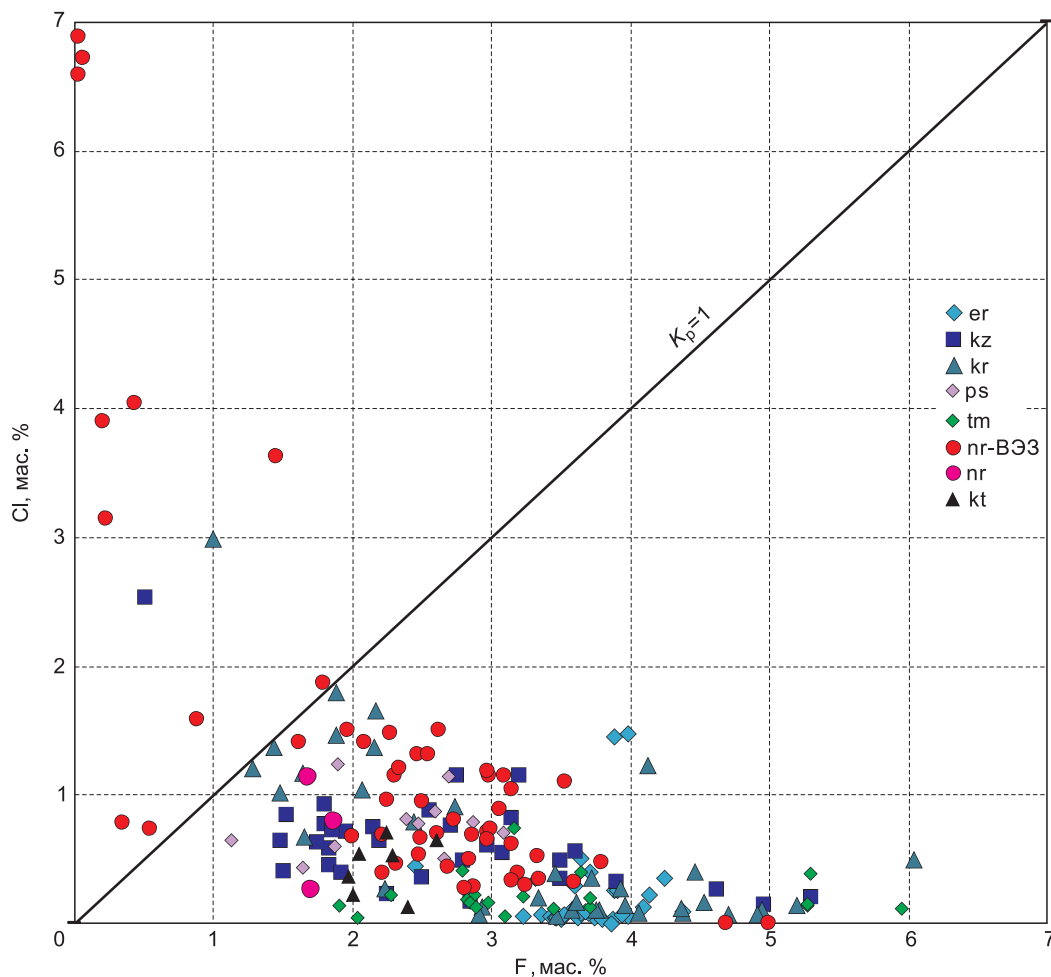
### Апатит

В магматических породах трапповой формации распределение апатита контролируется содержанием  $P_2O_5$  в родоначальной магме. В обогащенных фосфором ( $P_2O_5 = 0.42—1.5$  мас.%) производных субщелочных расплавов апатит отмечается в эффузивной и в интрузивной фациях пород. В бедных фосфором вулканогенных породах производных толеит-базальтовых (среднее содержание  $P_2O_5 = 0.18$  мас.%) и пикрит-базальтовых ( $P_2O_5 = 0.14$  мас.%) расплавов апатит практически не встречается, а в интрузивных производных этих расплавов наблюдается в пегматитах и пегматоидах.

В вулканогенной толще субщелочные расплавы проявились в ивакинской ( $P_2iv$ ) и юряхской ( $T_1jr$ ) свитах. Ивакинская свита представляет пачку покровов различного состава. Содержание  $P_2O_5$  в трахибазальтах этой свиты варьирует в диапазоне 1.24—1.36 мас.%, в трахиандезитобазальтах — в диапазоне 0.75—0.87 мас. % [Золотухин и др., 1986]. В трахибазальтах юряхской свиты содержание  $P_2O_5 = 0.52—0.56$  мас.% [Ryabov et al., 2014].

В апатитах ивакинской свиты содержание галогенов составляет (мас. %): в трахиандезитобазальтах F = 3.43—4.16, в трахибазальтах F = 2.36—3.55, Cl = 0.04—0.06, в трахибазальтах юряхской свиты — F = 1.96—2.41; Cl = 0.12—0.17. В пределах одного шлифа заключенные в кристаллах плагиоклаза иголки апатита I генерации имеют более высокое содержание F, чем апатиты II генерации из основной массы породы [Ryabov et al., 2014]. Единственная находка апатита в производных пикрит-базальтовых расплавов была обнаружена в метадiorите из Талнахского дифференцированного покрова пикритовых базальтов, в составе минерала установлено F = 3.41, Cl = 0.09 мас.% [Ryabov et al., 2014].

В субщелочных интрузиях **ергалахского, тымерского и пясинского комплексов** содержание  $P_2O_5$  варьирует в диапазоне 0.33—1.52 мас. % [Ryabov et al., 2014]. Во всех породах присутствуют мелкие кристаллы аксессуарного апатита, а в шлирах, линзах и горизонтах пегматоидов отмечаются скопления сравнительно крупных его кристаллов. Состав апатита в породах разных интрузивных комплексов широко варьирует. Апатиты трахидолеритов ергалахского и тымерского комплексов характеризуются



**Рис. 1.** Диаграмма содержания хлора и фтора в апатитах из пород интрузивных комплексов северо-запада Сибирской платформы.

Интрузивные комплексы: er — ергалахский; kz — кузьмовский; kr — курейский; ps — пясинский; tm — тымерский; nr-BЭЗ — норильский, верхние эндоконтактные зоны интрузий; nr — норильский; kt — катангский.  $K_p$  — коэффициент распределения.

высокими концентрациями F и резким преобладанием его над Cl. В пределах одной интрузии состав апатита из мезостазиса в трахидолеритах отличается от состава апатита пегматоидных щелочных габбро. В ергалахском комплексе апатит в трахидолеритах содержит  $F = 2.4\text{—}4.4$ ,  $Cl = 0.05\text{—}0.5$ , в пегматоидах —  $F = 3.9\text{—}4.0$ ,  $Cl = 1.4\text{—}1.5$  мас. %. В трахидолеритах тымерского комплекса концентрация F в апатитах составляют  $1.8\text{—}3.8$ ,  $Cl = 0.1\text{—}0.4$  мас.%, а в обогащенном ильменитом пегматоидном щелочном габбро —  $F = 5.2\text{—}6.0$ ,  $Cl = 0.1\text{—}0.4$  мас.%. В гидроксильных апатитах пясинского комплекса в сравнении с другими комплексами умеренно щелочных пород доля хлора возрастает. Содержание галогенов в апатитах этого комплекса составляет (мас.%): в трахидолеритах  $F = 0.4\text{—}1.1$ ,  $Cl = 1.1\text{—}3.1$ , в пегматоидах  $F = 1.9$ ,  $Cl = 1.0$  (рис. 1).

Представителем **кузьмовского интрузивного комплекса** в регионе является Верхнегорбиачинская интрузия. Предполагается, что ее формирование происходило в две фазы внедрения магматического расплава [Виленский и др., 1964]. Первая фаза представлена такситовыми габбро-долеритами с гомогенными включениями микродолерита с сульфидной вкрапленностью. Вторая фаза представляет комплекс трахитоидных габбро-долеритов, дифференцированных от троктолитовых до безоливиновых габбро-долеритов с гнездами и линзами габбро-, диорит- и гранодиорит-пегматитов и магнетитовых феррогаббро-долеритов. Исследования показали, что апатиты из пород первой фазы внедрения расплава были обогащены хлором ( $F = 0.51$ ,  $Cl = 2.53$  мас.%), а второй фазы — фтором ( $F = 1.81\text{—}5.30$ ,  $Cl = 0.14\text{—}1.15$  мас.%). Содержание галогенов в минерале отчетливо изменяется в различных по составу породах и в разных его генерациях. Некоторое представление о распределении галогенов в апатитах из пород кузьмовского интрузивного комплекса дает рис. 1. В апатитах из феррогаббро-долеритов и

кварцсодержащих габбро-долеритов концентрации галогенов составляют (мас.%): F = 0.5—3.6, Cl = 0.3—1.4; в диоритах F = 3.9—5.3, Cl = 0.2—0.3 мас.%. В диоритах выделяются три генерации апатита: I — включения в порфирированных выделениях кварца (F = 4.6—5.1, Cl = 0.2 мас.%), II — включения в амфиболе (F = 3.9, Cl = 0.3 мас.%) и III — иголки в мезостазисе (F = 1.6—3.5, Cl = 0.3—1.0 мас.%).

**Курейский комплекс** представляют интрузии Среднегорбиачинская и Джалтул-Южный. В Среднегорбиачинской интрузии апатиты из габбро-долеритов и в гнездах габбро-пегматитов имеют близкий состав: F = 1.28—2.73, Cl = 0.68—1.79 мас.%. В апатитах диоритов, монзонитов и гранитов этой интрузии происходит увеличение содержания F от 2.91 до 5.20 мас.% и уменьшение хлора Cl до 0.41—0.07 мас.% (см. рис. 1).

В интрузии Джалтул-Южный апатиты из габбро-долеритов, содержащих Pt-Fe-металльные руды, обогащены фтором: F = 2.35—6.04, Cl = 0.35—1.23 мас.%.

В апатитах из пород **норильского интрузивного комплекса** содержание галогенов широко варьирует: F составляет 1.65—5.00, Cl = 0.03—1.50 мас.% [Ryabov et al., 2014]. В апатитах интрузий нижнеталнахского типа содержание F = 1.68—3.00, Cl = 0.26—1.31 мас.%, в интрузии Норильск-1 — F = 0.55—3.10, Cl = 0.34—2.02 мас.%. В Верхнеталнахской интрузии максимальное содержание фтора (5 мас.%) установлено в апатите из горизонта верхних такситовых габбро-долеритов (пг-ВЭЗ) (см. рис.1). Наиболее высокие концентрации хлора (Cl = 6.59—6.88, F = 0.03—0.07 мас. %) были обнаружены в апатите оливин-биотитовых, пикритовых и нижних такситовых габбро-долеритов интрузии Норильск-1 [Кривенко, Толстых, 1989].

### Слюда

Распределение и состав слюд в трапах имеет ряд особенностей. В вулканогенных образованиях слюда отсутствует, в недифференцированных интрузиях она представляет случайные находки, в слабодифференцированных интрузиях листочки слюды отмечаются спорадически, но, как правило, присутствуют в габбро-пегматитах и основных пегматоидах, а в породах полнотифференцированных интрузий отмечаются постоянно [Ryabov et al., 2014].

Слюда обычно располагается в базисе породы, нередко имеет зональное строение и находится в сростаниях с ильменитом и/или титаномагнетитом и сульфидами. По составу слюды представляют ряд флогопит—аннит с широкими вариациями величины общей железистости минерала ( $f = \text{FeO} / (\text{FeO} + \text{MgO})$ , ат. %) и содержания галогенов (рис. 2).

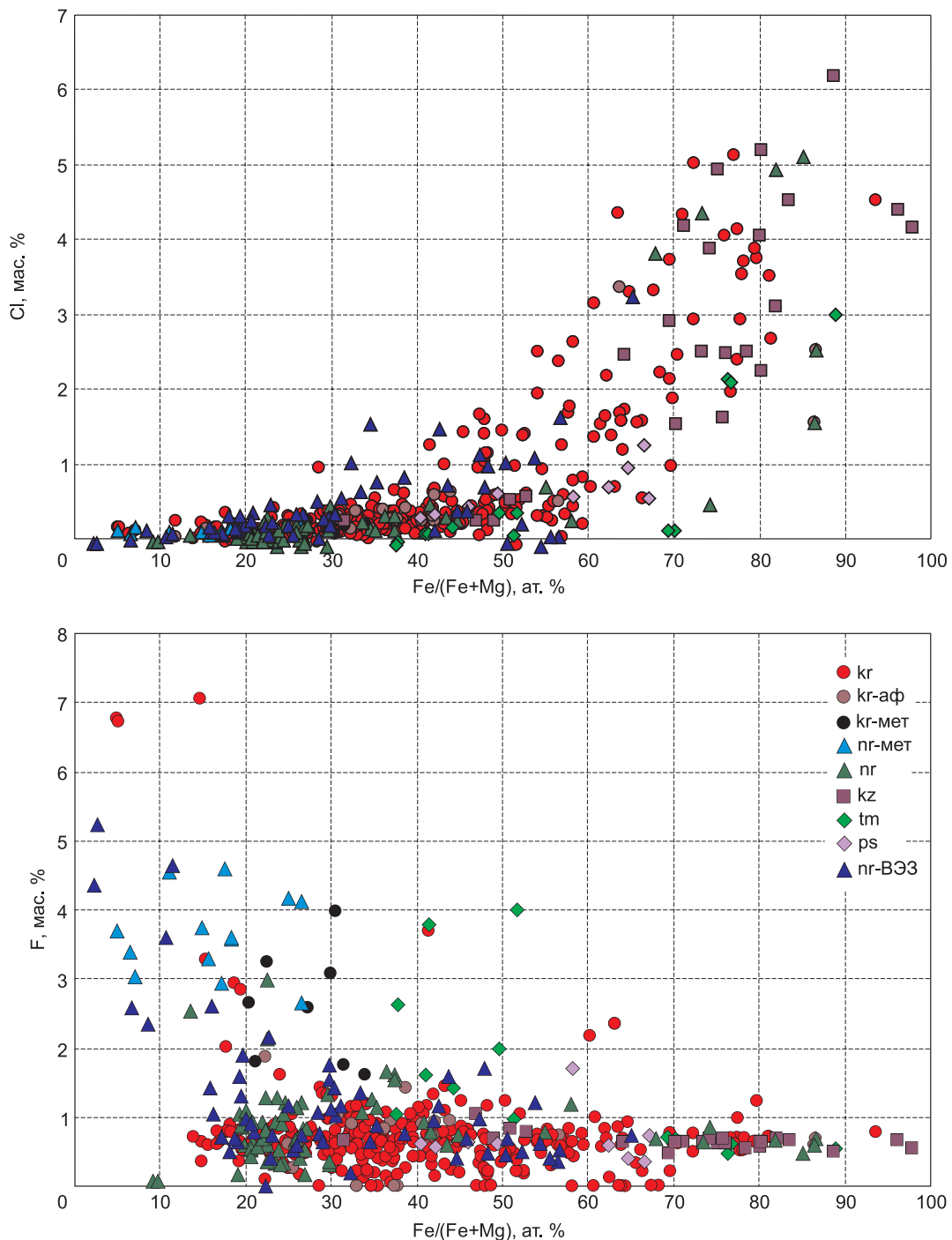
В трахидолеритах интрузий **тымерского комплекса**  $f$  слюд изменяется от 38 до 89 ат.%, содержание Cl варьирует от 0.05 до 0.45 мас.%, а содержание F по мере роста  $f$  уменьшается от 1.8 до 0.5 мас.%. В обогащенных титаномагнетитом пегматоидах выделяются два типа слюд: 1 — с повышенным содержанием фтора (F = 2.6—4.0, Cl = 0.05—0.45 мас.%,  $f = 38—52$  ат.%), 2 — с повышенным содержанием хлора (F = 0.50—0.60, Cl = 2.20—3.10 мас.%,  $f = 76—89$  ат.%) (см. рис. 2). В пегматоидном щелочном габбро обнаружен гизингерит  $\text{Fe}_4^{3+}(\text{OH}, \text{F}, \text{Cl})_8\text{Si}_4\text{O}_{10} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ , который содержит F = 0.7, Cl = 5.37 мас.%.

Слюды трахидолеритов интрузий **пясинского комплекса** представлены биотитами,  $f$  которых изменяется от 40 до 67 ат.%, а содержание F = 0.40—0.9, Cl = 0.4—1.35 мас.%. Биотит из пегматоидов этих интрузий отличается более высоким содержанием фтора (F = 1.7, Cl = 0.7 мас.%;  $f = 58$  ат.%).

В интрузиях **катангского комплекса**  $f$  слюд изменяется от 29 до 89 ат.%. По мере увеличения  $f$  в составе минерала отмечается плавное уменьшение содержания F от 0.9—1.4 до 0.3—0.6 мас. %, а содержание Cl сначала плавно увеличивается от 0.4 до 1.4 мас.%, а при  $f$  около 65 ат.% происходит его резкий рост до 4.4 мас.% (см. рис. 2).

В интрузиях **кузьмовского комплекса** (Верхнегорбиачинская и оз. Пеляжьего)  $f$  слюд изменяется от 47 до 98 ат.%, содержание F от 1.0 до 0.4 мас.% с тенденцией уменьшения по мере роста  $f$ , а содержание хлора, напротив, при повышении  $f$  резко увеличивается от 0.35 до 6.30 мас.% (см. рис. 2). В пределах одного шлифа можно проследить повышение  $f$  и содержания хлора от центра к краю зональных кристаллов слюды и далее в мелких листочках из мезостазиса. Наиболее высокие значения  $f$  и содержания Cl определены в гранитах, диоритах и магнетитовых феррогаббро-долеритах. Повышенные содержания F (1.0—1.5 мас.%) отмечаются в слюдах из габбро-долеритов с сульфидной вкрапленностью и в гомогенных включениях (kz-аф).

В интрузиях **курейского комплекса** на диаграмме Cl— $f$  можно видеть, что при изменении в слюдах величины  $f$  от 5 до 60—65 ат. % происходит плавное увеличение содержания Cl от 0.1—0.2 до 0.5—0.6 мас.% (см. рис. 2). Наряду с этим трендом при  $f$  около 40 ат.% обособляется другое направление — с более резким ростом содержания Cl при повышении  $f$ . Наиболее высокие концентрации хлора в слюдах установлены: в пегматоидном габбро-долерите интрузии Центральная-Шилки ( $f = 72$  ат.%, Cl = 5.02 мас.%), в диоритах Среднегорбиачинской интрузии ( $f = 94$  ат.%, Cl = 4.53 мас.%) и в такситовых габбро-долеритах интрузии г. Озерной ( $f = 70$  ат.%, Cl = 4.3 мас.%).



**Рис. 2.** Диаграммы зависимости  $Cl$ — $Fe/(Fe+Mg)$  и  $F$ — $Fe/(Fe+Mg)$  в слюдах из пород интрузивных комплексов северо-запада Сибирской платформы.

Интрузивные комплексы: kr — курейский; kr-af — курейский, афаниты гомогенных включений; kr-мет — курейский, метасоматиты; nr-мет — норильский, метасоматиты; nr — норильский; kz — кузьмовский; tm — тымерский; ps — пясинский; nr-ВЭЗ — норильский, верхние эндоконтактные зоны интрузий.

Содержание  $F$  в основной массе слюд курейского комплекса составляет 0.6—0.8 мас.%. В области маложелезистых слюд с величиной  $f = 5$ —42 ат.% наблюдается разброс точек с повышенным содержанием  $F = 1.50$ —7.06 мас.%. Эти точки представляют два типа слюд: 1 — из микропидеритов гомогенных включений в габбро-долеритах (kr-af) и 2 — из реакционных амфибол-флогопитовых каемок на контакте гранита с ксенолитами роговиков (kr-мет). Максимальные содержания  $F = 6.72$ —7.06 мас.% уста-

новлены во фторфлогопитах ( $f = 5—15$  ат. %), которые находятся в ассоциации с камаситом, армалколитом, графитом и сульфидами в микродолеритах гомогенных включений интрузии Джалтул-Южный.

В интрузиях Рудничный Камень, Центральная-Пелядка и руч. Лазурного в пикритовых и троктолитовых габбро-долеритах с сульфидной вкрапленностью отмечается флогопит ( $f = 24—30$  ат.%,  $F = 1.30—1.60$  мас.%,  $Cl = 0.1—0.2$  мас.%), а в интрузии Джалтул-Южный в сходной ситуации — биотит ( $f = 62$  ат.%,  $F = 0.75$  мас.%,  $Cl = 2.30$  мас.%).

Своеобразие пород Среднегорбиачинской интрузии создают находки галогенсодержащего сфена, а в гранитах — магматогенного скаполита. Содержание F в сфене из различных пород варьирует и составляет в габбро-долеритах и габбро-пегматитах  $0.26—0.50$  мас.%, в микродолеритах  $0.27—0.80$  мас.%, в монцонитах  $1.80—2.59$  мас.%. Магматогенный скаполит обнаружен в глобулярном граните, в котором образует округлые глобулы диаметром  $1—2$  см с вростками кварца. В составе скаполита установлено  $Cl = 3.42—4.12$  мас.%. В матрице гранита между глобулами находятся калишпат ( $Ab_{2-20}Or_{98-80}$ ), кварц, амфибол и сфен ( $F = 1.8—2.91$  мас.%).

В **норильском комплексе** выделяются четыре типа интрузий, общая минералого-геохимическая характеристика слюд в которых дана в работах [Золотарев, Аплонов, 2006; Ryabov et al., 2014]. Поэтому отметим только некоторые особенности нахождения и состава слюд в этих интрузиях.

По нахождению в различных породах и рудах **интрузий Верхнеталнахская и Норильск-I** слюды можно разделить на три группы: 1 — в пикритовых и нижних такситовых габбро-долеритах, с которыми связаны Pt-Cu-Ni сульфидные руды (nr); 2 — в верхних такситовых габбро-долеритах и лейкогаббро, с которыми связаны Pt- малосульфидные руды (nr-BЭЗ); 3 — в обогащенных пирротинном метасоматитах из верхнего экзоконтакта интрузий (nr-мет) (см. рис. 2).

В большинстве случаев слюды из 1-й группы имеют сравнительно устойчивый состав с небольшими вариациями  $f$  от 12 до 37 ат.% и сравнительно невысоким содержанием галогенов:  $F = 0.35—0.45$ , реже до 1.3,  $Cl = 0.05—0.40$  мас.%. Богатые галогенами слюды в этих породах встречаются редко.

Во 2-й группе состав слюд изменяется в диапазоне:  $f = 2—65$  ат.%;  $F = 0.05—5.23$ ,  $Cl = 0.50—3.35$  мас.%. На диаграмме  $F—f$  (см. рис. 2) эти слюды создают облако точек маложелезистых слюд с повышенным содержанием фтора ( $F > 1$  мас.%). По мере повышения  $f$  слюд в них понижается содержание F и увеличивается — Cl. Слюды имеют зональное строение, так что в пределах одного шлифа можно встретить колебания их состава:  $f = 33—65$  ат.%;  $F = 0.55—1.60$ ,  $Cl = 0.35—3.35$  мас.% [Ryabov et al., 2014].

Состав слюд 3-й группы характеризуется повышенным содержанием F и практически идентичен минералам из 2-й группы.

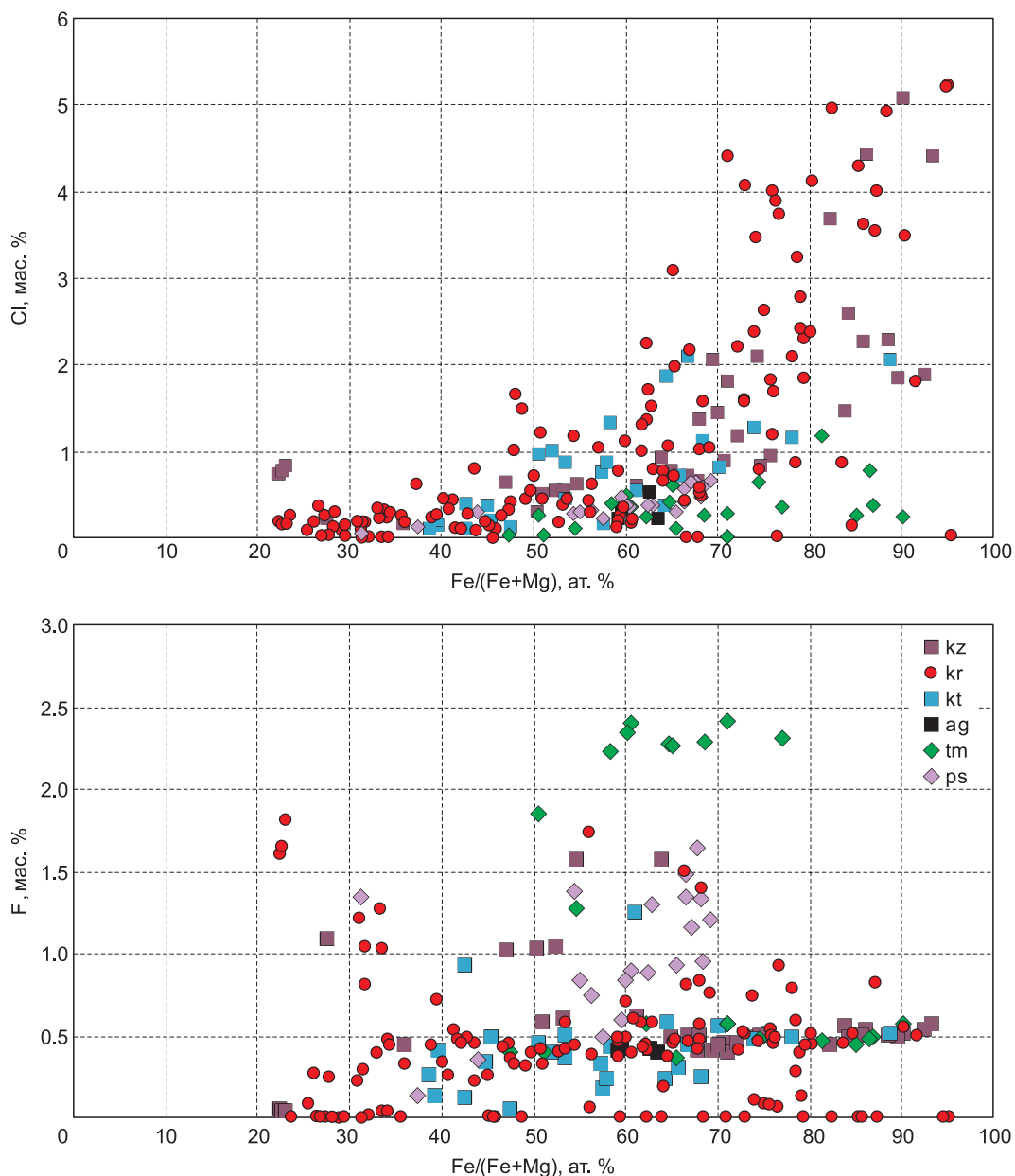
В высокомагнезиальной **Нижнеталнахской интрузии** (одноименного типа)  $f$  слюд изменяется от 18 до 31, редко до 51 ат.%. По мере роста  $f$  в них плавно уменьшается содержание F от 0.8 до 0.4 мас.% и увеличивается — Cl от 0.03 до 0.8 мас.%. В такситовых габбро-долеритах зональные кристаллы флогопита имеют (центр—край):  $f = 27$  и  $24$  ат. %;  $F = 2.91$  и  $2.80$ ;  $Cl = 0.52$  и  $0.34$  мас.%.

**Интрузия руч. Олор** (круглогорский тип) дифференцирована от оливиновых до безоливиновых габбро-долеритов с линзами и гнездами сиенитов и горизонтом такситовых габбро-долеритов. В расслоенной серии пород от сиенитов до оливиновых габбро-долеритов  $f$  слюд возрастает от  $22—28$  до  $41—55$  ат.%, соответственно содержание F понижается от  $2.00—2.95$  до  $0.60—0.95$  мас.%, а Cl растет от  $0.30—0.35$  до  $0.80$  мас.%. Характерной особенностью слюд из горизонта такситовых габбро-долеритов, к которому приурочена Pt-малосульфидная минерализация, является повышенная железистость и обогащенность хлором ( $f = 68—87$  ат.%,  $F = 0.6—0.7$ ,  $Cl = 1.85—4.25$  мас.%).

## Амфибол

В вулканогенных породах и недифференцированных силлах долеритов амфиболы отсутствуют, а в слабо- и полнодифференцированных интрузиях они в переменных количествах встречаются в различных по составу породах. Информация об особенностях нахождения и состава амфиболов в магматических и метаморфических породах Норильского рудного района приводится в работах [Аплонов, Золотарев, 2005; Ryabov et al., 2014].

Как пороодообразующие, амфиболы отмечаются в пегматоидах интрузий пясинского и тымерско-го комплексов, а также в кремнекислых дериватах расслоенных интрузий кузьмовского, курейского, катангского и норильского комплексов. В остальных породах амфиболы наблюдаются как второстепенные. В трапхах отмечаются практически все минеральные разновидности группы кальциевых амфиболов. В расслоенных интрузиях Курейского рудного района наиболее широко распространены: паргасит—ферропаргасит, эденит—ферроэденит, гастингсит—феррогастингсит, реже встречаются роговая обманка и актинолит. В породах нередко отмечаются 2—3 генерации амфиболов, которые различаются по размеру, цвету, составу и по взаимоотношениям с сопутствующими минералами. Крупные



**Рис. 3. Диаграммы зависимости Cl—Fe/(Fe+Mg) и F—Fe/(Fe+Mg) в амфиболах из пород интрузивных комплексов северо-запада Сибирской платформы.**

Интрузивные комплексы: kz — кузьмовский; kr — курейский; kt — катангский; ag — агатский, tm — тымерский; ps — пясинский.

кристаллы обычно имеют зональное строение с отчетливым изменением цвета и состава от центра к краю. Для амфиболов характерны широкие вариации  $f$  и содержания F и Cl.

В трахидолеритах слабодифференцированных интрузий **тымерского комплекса**  $f$  амфибола варьирует от 47 до 90 ат. % ( $F = 0.3—0.6$ ,  $Cl = 0.05—0.75$  мас. %). В пегматоидном щелочном габбро этого комплекса  $f$  амфибола изменяется в диапазоне 50—77 ат. % и резко возрастает содержание фтора (1.20—2.40 мас. %), а концентрация хлора (0.1—0.6 мас. %) остается на прежнем уровне, как в трахидолеритах (рис. 3). На диаграмме F— $f$  можно видеть, что амфиболы пегматоидных щелочных габбро имеют более высокие содержания F по сравнению с трахидолеритами, но в рамках этих породных групп отчетливая зависимость содержания фтора от величины  $f$  отсутствует. Содержание Cl в амфиболах указанных пород невысокое, но в целом намечается слабовыраженная тенденция к его увеличению по мере роста  $f$ .

В трахидолеритах интрузий **пясинского комплекса**  $f$  амфиболов изменяется от 31 до 69 ат. %. Рост  $f$  сопровождается повышением содержания F от 0.35 до 1.65 мас. %, Cl от 0.05 до 0.7 мас. %.



В интрузиях **катангского комплекса** амфиболы встречаются в пегматоидных габбро-долеритах и реже в мезостазисе долеритов. В разрезе интрузии Первого порога реки Курейки  $f$  амфиболов изменяется от 39 до 92 ат. % (см. рис. 3). При повышении  $f$  содержание Cl увеличивается от 0.05 до 2.08 мас. %. Несмотря на широкие вариации  $f$ , содержание F в основной массе его зерен изменяется в сравнительно небольшом диапазоне от 0.05 до 0.60 мас. %. Исключение составляет амфибол из пегматоидных шпиров, у которого  $f$  — 61 ат. %, F — 1.2 мас. %.

В **кузьмовском комплексе** состав амфиболов изучался в интрузиях Верхнегорбиачинская, оз. Пеляжьего и Центральная-Пелядка. В Верхнегорбиачинской интрузии  $f$  амфибола изменяется от 36 до 94 ат. %. На диаграмме Cl— $f$  точки анализов амфиболов вытягиваются в шлейф, который показывает повышение содержания Cl по мере увеличения  $f$ . Резкое повышение содержания Cl начинается при значении  $f = 70$  ат. %, Cl = 1 мас. %. Максимальное содержание хлора установлено в феррогастингите ( $f = 90$  ат. %, Cl = 5.07 мас. %). Содержание F в амфиболах из габбро-долеритов составляет 0.4—0.6 мас. %, в габбро-долеритах с сульфидной вкрапленностью 0.7—1.0 мас. %, в пегматоидах 1.5—1.8 мас. % (см. рис. 3). В феррогаббро-долерите интрузии оз. Пеляжьего амфиболы имеют  $f = 36$ —75 ат. %. Содержание F составляет 0.4—1.0 мас. %, Cl — 0.1—0.6 мас. %.

В **курейском комплексе** амфиболы изучались в породах интрузий: Среднегорбиачинская, Джалтул-Южный, горы Озерная, Центральная-Шилки, Центральная-Пелядка, Рудничный Камень, руч. Темного, руч. Горного. В габбро-долеритах амфиболы отмечаются в небольшом количестве в мезостазисе пород, а в габбро-долеритах с сульфидной вкрапленностью они нередко образуют сростания с рудным минералом. В гранитах, диоритах и родственных им породах амфибол является породообразующим минералом и в ряде случаев образует небольшие шпирь 5—10 см в поперечнике, в которых его количество достигает 70—80 %.

Диапазон вариаций  $f$  в амфиболах интрузий курейского комплекса составляет 22—92 ат. % (см. рис. 3). Практически все разнообразие состава амфиболов курейского комплекса представлено в интрузиях Среднегорбиачинская и Джалтул-Южный. На графике Cl— $f$  основная масса точек показывает, что по мере роста  $f$  происходит увеличение содержания Cl от 0.1 до 3.5—4.0 мас. %, которое сопровождается ростом дисперсии содержания Cl, особенно в области высокожелезистых амфиболов. На графике F— $f$  большая группа точек из расслоенной серии пород вытягивается в линейный шлейф с тенденцией увеличения содержания F примерно от 0.3 до 0.6 мас. % при изменении  $f$  от 25 до 90 ат. %. Над этим шлейфом располагаются разрозненные точки амфиболов, обогащенных фтором (F = 0.8—1.9 мас. %,  $f = 28$ —88 ат. %). Эти точки отражают состав амфиболов из реакционных образований на контактах гранита с ксенолитами роговиков.

В целом при рассмотрении диаграмм Cl— $f$  и F— $f$  в амфиболах из пород различных интрузивных комплексов можно видеть зависимость содержания галогенов от  $f$  минерала. В производных трахибазальтовых расплавах (интрузии тымерского комплекса) содержание Cl в амфиболах по сравнению с толеит-базальтовыми — низкие и со слабовыраженной тенденцией его роста при повышении  $f$ . Высокие содержания хлора отмечаются в амфиболах кремнекислых пород кузьмовского и курейского комплексов. Максимальное содержание Cl = 5.19—5.25 мас. % ( $f = 90$  ат. %) установлено в амфиболе из обособления гранофира в графит-ферритсодержащем микродолерите гомогенного включения в габбро-долерите интрузии Джалтул-Южный. На графике Cl— $f$  (см. рис. 3) в области повышенной  $f$  точки анализов рассыпаются в широкий шлейф, который указывает на большие колебания содержания Cl в амфиболах, близких по величине  $f$ , а также на сходные содержания Cl в минералах с разным значением  $f$ .

Содержание F в большинстве амфиболов из габбро-долеритов и трахидолеритов составляет около 0.4 мас. %. Наиболее высокое содержание F (2.3—2.4 мас. %) имеют амфиболы из пегматоидных шпиров щелочных габбро в трахидолеритах тымерского комплекса.

### ОСОБЕННОСТИ СОСТАВА СОСУЩЕСТВУЮЩИХ АПАТИТОВ, СЛЮД И АМФИБОЛОВ

В породах расслоенных интрузий нередко встречаются сростания различных галогенсодержащих минералов без каких-либо реакционных взаимоотношений между ними. Рассмотрим особенности состава этих минералов.

**Пара слюда+амфибол.** На диаграмме  $f_{\text{Амф}}—f_{\text{Сл}}$  нанесены точки состава амфибола и слюды, сосуществующих в одной породе из интрузий различных комплексов (рис. 4). Основная масса точек с небольшой дисперсией располагается вдоль линии, которая показывает близкое сходство  $f$  сосуществующих минералов и подтверждает их парагенезис.

На диаграмме (рис. 5) показано распределение Cl в сосуществующих в одной породе (из одного шлифа) слюдах и амфиболах. Из графика видно, что слюда и амфибол имеют близкую по величине  $f$ , но Cl предпочтительно накапливается в слюде, а не в амфиболе, т.е. в калиевом силикате, а не в кальцие-

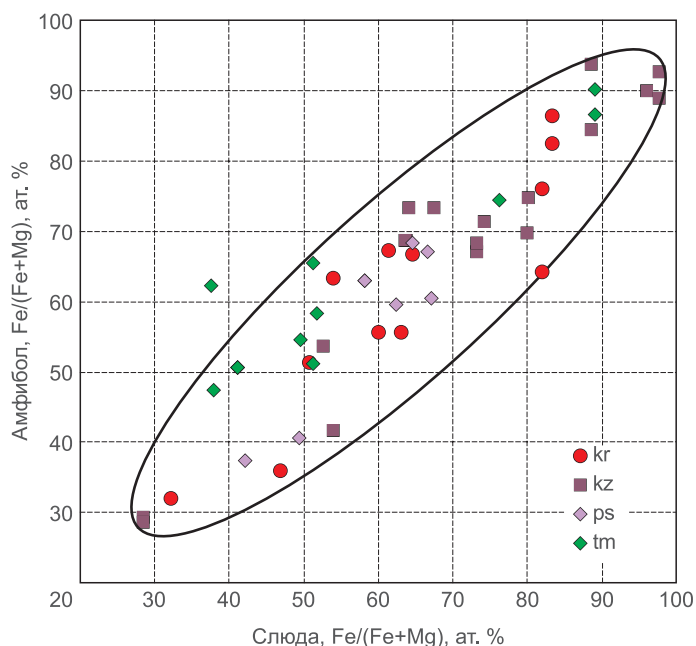


Рис. 4. Диаграмма зависимости Fe/(Fe+Mg) слюда и амфиболов, сосуществующих в одной породе.

Интрузивные комплексы: kr — курейский, kz — кузьмовский, ps — пясинский, tm — тымерский.

вом. Разница в содержании Cl может достигать 2—3 мас.%. В породах, где присутствует только один минеральный вид (слюда или амфибол), выделяются генерации минерала с различным содержанием Cl и величиной *f*.

**Ассоциация апатит ± слюда ± амфибол** изучалась в породах кузьмовского и курейского интрузивных комплексов (рис. 6). В сосуществующих минералах галогены распределяются между минералами избирательно: фтор предпочитительно накапливается в апатитах, а хлор — в слюдах и амфиболах. Содержание Cl повышается от

амфиболов к слюдам, а в одном минеральном виде — от ранних генераций к поздним. В апатитах содержание F возрастает от ранних генераций минерала к поздним.

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Исследования апатитов, слюда и амфиболов из расслоенных трапповых интрузий различных комплексов северо-запада Сибирской платформы позволили установить в них широкие вариации содержания F и Cl и *f* в фемических галогенсодержащих минералах. Особый интерес представляет вопрос условий кристаллизации этих минералов в породах расслоенных трапповых интрузий, при которых создавалась возможность кристаллизации практически полного спектра их разновидностей по величине *f* и содержанию F и Cl, в том числе, минералов с крайне высокими содержаниями галогенов.

**Кристаллизация слюда и амфиболов в восстановительных условиях.** Принято считать, что гидроксилсодержащие минералы образуются в окислительных условиях из водных растворов. Среди геологов утвердилось представление о кристаллизации апатитов, слюда и амфиболов в трапповых интрузиях в гидротермальную стадию минералообразования [Соболев, 1986]. Однако в природных объектах известны ассоциации гидроксилсодержащих минералов с минералами, образование которых возможно только в сильно восстановительной среде, создаваемой практически безводными флюидами [Никольский, 1987]. Убедительным, хотя и косвенным, показателем восстановительных условий минералообразования являются находки в породах и рудах графита, битумов, карбидов, Fe, W, а также самородных металлов и интерметаллидов [Буслаева, Новгородова, 1989]. Термодинамические расчеты и экспериментальные данные показали, что слюды и амфиболы могут кристаллизоваться не только в окисли-

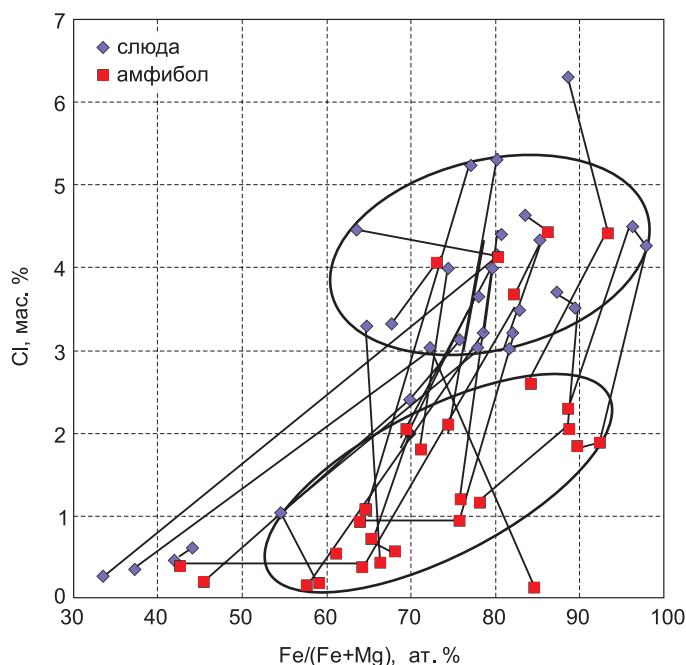
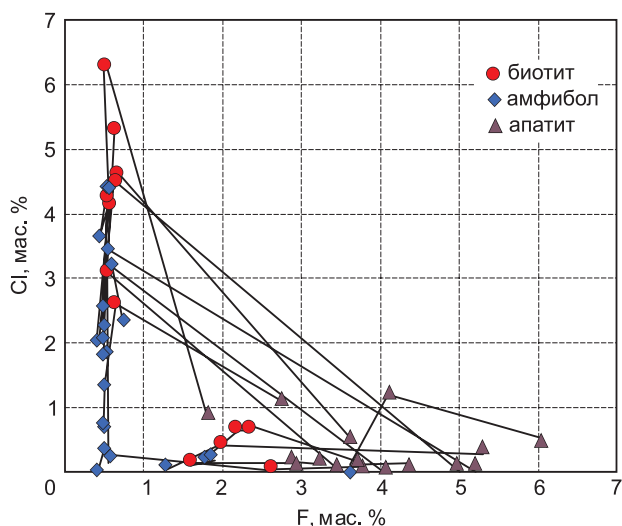


Рис. 5. Диаграмма зависимости Cl—Fe/(Fe+Mg) слюда и амфиболов, сосуществующих в одной породе.

Линиями соединены минералы из одного образца и разные генерации одного минерального вида.

**Рис. 6. Диаграмма распределения Cl и F в апатитах, слюдах и амфиболах, сосуществующих в одной породе.**

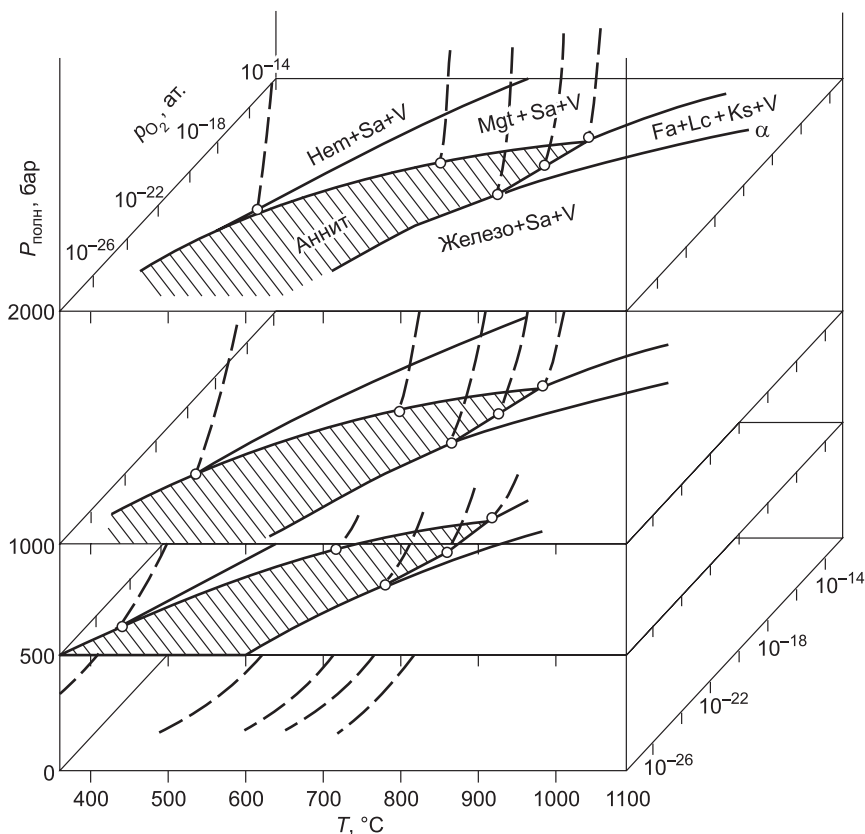
Линиями соединены минералы из одного образца и разные генерации одного минерального вида.



тельных условиях, но также при сравнительно низкой летучести кислорода.

Сведения о полях устойчивости слюд флогопит-аннитового ряда при различных давлениях воды и переменном парциальном давлении кислорода получены [Eugster, Wones, 1962]. На рис. 7 приведена трехмерная модельная диаграмма: температура—общее давление, равное давлению  $H_2O$ ,—парциальное давление кислорода. Из диаграммы видно, что поле устойчивости аннита ограничивается температурой  $800\text{ }^\circ\text{C}$ , изобарой  $p_{O_2} = 10^{-18}$  атм. и расширяется при понижении температуры и  $p_{O_2}$ .

Исследование устойчивости флогопита в недосыщенной кремнеземом среде было проведено при участии флюида системы  $H-O-C$  [Никольский, 1987]. Выяснилось, что при постоянном общем давлении стабильность флогопита в восстановленной среде достигается при более низких температурах, чем в окислительной. Значит, образование флогопита может происходить при участии как окисленных углекислотно-водных, так и восстановленных водородно-углеводородных флюидов. В связи с этим было высказано предположение, что отражением кристаллизации флогопита в восстановительных условиях



**Рис. 7. Трехмерная диаграмма устойчивости аннита в координатах температура—общее давление, равное давлению  $H_2O$ ,—парциальное давление кислорода, представленная в виде изобарических сечений [Eugster, Wones, 1962].**

An — аннит, Fa — фаялит, Fe — железо, Нем — гематит, Ks — калсилит, Lc — лейцит, Mag — магнетит, Sa — санидин, V — пар.

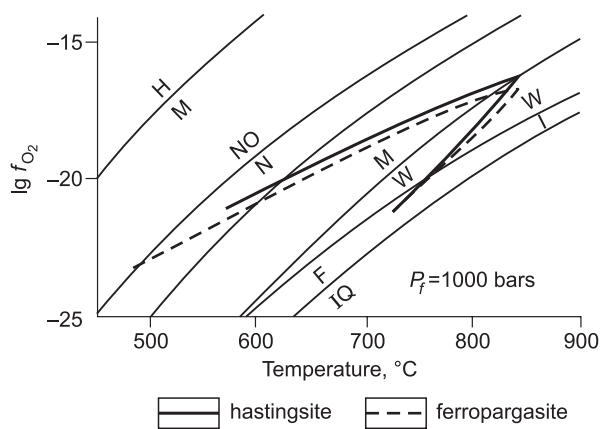


Рис. 8. Изобарическое поле устойчивости гастингсита — ферропаргасита в координатах  $\lg f_{O_2}-T$ , по [Thomas, 1982]; штриховая линия, по [Gilbert, 1966].

Буферы Н — гематит, М — магнетит, NO — NiO, N — Ni, W — вюстит, F — фаялит, IQ — железо-кварц,  $P_f$  — общее давление.

го амфибола ограничивается температурой около  $850^{\circ}C$ , изобарой около  $p_{O_2} = 10^{-17}$  атм и расширяется при понижении температуры и  $p_{O_2}$ .

Принимая во внимание экспериментальные данные [Eugster, Wones, 1962; Thomas, 1982; Никольский, 1987], можно предполагать, что кристаллизация высокожелезистых слюдов и амфиболов в трапповых интрузиях могла начинаться при температурах  $800-850^{\circ}C$  и парциальном давлении кислорода  $p_{O_2} = 10^{-17}-10^{-18}$  атм. и осуществляться при снижении температуры и понижении  $p_{O_2}$ . Низкое парциальное давление кислорода свидетельствует о практически безводном характере флюидов, т.е. о дефиците OH в гидроксилсодержащих минералах [Никольский, 1987]. Дефицит воды в восстановительных условиях при кристаллизации гидроксилсодержащих минералов, вероятно, компенсировался замещением ее галогенами, т.е. позиции OH в структуре минералов занимали F или Cl. Масштабы замещения, по-видимому, контролировались различными физико-химическими условиями и, в первую очередь, окислительно-восстановительным потенциалом магматогенной системы. Таким образом, именно восстановительные условия обеспечили накопление F и Cl в минералах до высоких содержаний и сдерживали переход галогенов в гидротермы.

### ПОВЕДЕНИЕ ГАЛОГЕНОВ В ГИДРОКСИЛСОДЕРЖАЩИХ МИНЕРАЛАХ

Нахождение в породах F- и Cl-содержащих минералов в ассоциации с графитом и углеродистым веществом позволяет предполагать, что сопутствующие базальтовым расплавам летучие компоненты представляли собой галоидоуглеродородную газовую смесь. Распространенность галогенсодержащих минералов в трапповых интрузиях имеет прямую связь со степенью дифференциации в них базальтового расплава. Вариации содержания F и Cl в минералах свидетельствуют о широком диапазоне физико-химических параметров состояния магматической системы в условиях высокого флюидного давления и восстановительного потенциала.

Кристаллизация апатита в траппах определялась химическим потенциалом  $P_{2O_5}$ , который существовал в исходной магме или возникал в результате ее дифференциации, а склонность к накоплению в нем фтора объясняется химическим родством  $P_2O_5-F$ . Содержание F в апатитах изменяется от 1.5 до 6 мас. %, и в подавляющей их массе концентрация  $F > Cl$ . Максимальные содержания галогенов в апатитах определены во фторапатите F — 6.05 мас.% и в хлорапатите Cl — 6.88 мас.%.

В слабодифференцированных субщелочных интрузиях содержание галогенов в слюдах и амфиболах трахидолеритов не превышает 1 мас.%. В обогащенных флюидами порциях расплава содержание галогенов возрастает и в пегматоидных щелочных габбро этих интрузий достигает (мас.%): в слюдах F — 4, Cl — 3.1, в амфиболах F — 2.3, Cl — 0.75.

На диаграммах зависимости Cl—f и F—f можно видеть, что в породах нормального ряда из различных интрузивных комплексов в слюдах и амфиболах при изменении величины f отмечаются сходные закономерности распределения галогенов. Увеличение содержания Cl в минералах при повышении в них f и рост содержания F при понижении f (или повышении магнезиальности) свидетельствуют об избирательном характере распределения галогенов в породах. Эти зависимости определялись химическим родством Cl—Fe и F—Mg, т.е. хлор проявил ярко выраженную феррофильность, а фтор — магнезиофильность. Изменение величины f в слюдах и амфиболах, по-видимому, отражает скрытую расслоненность в процессе кристаллизационной дифференциации расплава, а широкие вариации этой величины свидетельствуют о глубокой дифференциации расплава. Увеличение содержания Cl и F в минералах связано с повышением флюидного давления и восстановительного потенциала в ходе процесса. Наиболее ярко выраженная феррофильность Cl проявилась в слюдах и амфиболах интрузий кузьмовского,

курейского и катангского комплексов, а магнезиофильность F — в слюдах из пегматоидов верхних эндоконтактовых зон интрузий норильского типа и перекрывающих их метасоматитах.

На графиках  $Cl-f$  для слюд и амфиболов в области повышенных значений  $f$  и на графике  $F-f$  для слюд в области маложелезистых слюд шлейфы точек имеют большую дисперсию, которую создают широкие вариации содержания Cl и F в минералах сходной или близкой по величине  $f$ . Причина большого разброса точек, по-видимому, связана с неустойчивостью флюидного давления и окислительно-восстановительного потенциала, которые менялись в различных горизонтах пород и разрезах одного массива, а также в разных интрузивных комплексах.

Сосуществующие в одной породе слюды и амфиболы имеют близкую по величине  $f$ , а в области высокожелезистых составов содержание Cl в слюдах, как правило, выше, чем в амфиболах. Это свидетельствует о повышении давления галоидоуглеводородных флюидов в процессе кристаллизации минералов, которое сопровождалось падением химического потенциала кальция и ростом потенциала калия.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования показали широкие вариации содержания F и Cl в апатитах, слюдах и амфиболах трапповых интрузий, которые позволяют предполагать участие галогенов в процессах дифференциации базальтовых расплавов и в рудообразовании. Общие положения модели рудно-магматического процесса в сибирских траппах приводятся в монографии [Ryabov et al., 2014]. Согласно этой модели, ведущая роль в формировании расслоенных интрузий и в рудообразовании отводится флюидному режиму рудно-магматических систем с участием  $CH_4$ , F, Cl, S. Летучие компоненты сопутствовали внедряющимся базальтовым расплавам и, взаимодействуя с ними, способствовали дифференциации расплава и рудообразованию. Предполагается, что возможным источником летучих компонентов были осадочные породы, ресурсы которых на северо-западе Сибирской платформы были достаточны для осуществления крупномасштабных процессов, в том числе для формирования расслоенных интрузий и рудных месторождений-гигантов [Рябов, 2015].

Формирование рудоносных расслоенных интрузий представляет собой сложный многостадийный процесс, в котором в результате телескопирования признаки ранних физико-химических состояний магматогенной системы часто завуалированы или полностью стерты последующими процессами. В этом плане Курейский рудный район является уникальным, поскольку в расслоенных интрузиях и рудных месторождениях этого района отчетливо проявились особенности геохимии углеводородов, галогенов и серы в магматогенном процессе, изучение которых внесет существенный вклад в решение целого ряда генетических проблем, связанных с траппами [Рябов, 2015].

Химические свойства летучих компонентов и поведение их в составе газовых смесей зависят от параметров состояния рудно-магматических систем, в том числе от окислительно-восстановительного потенциала. Роль отдельно взятых летучих компонентов и различных их сочетаний в газовых смесях при взаимодействии с базальтовыми расплавами и в процессе рудообразования еще недостаточно ясна и требует дополнительных исследований. Тем не менее на основании полученных данных по распределению F и Cl в апатитах, слюдах и амфиболах расслоенных трапповых интрузий уже сейчас можно с уверенностью предполагать важную роль галогенов в рудно-магматическом процессе.

## ВЫВОДЫ

1. Формирование расслоенных трапповых интрузий происходило в восстановительных условиях при высоком давлении галоидоуглеводородных флюидов.
2. Кристаллизационная дифференциация флюидизированных толеит-базальтовых расплавов в восстановительных условиях отражается в повышении железистости слюд и амфиболов.
3. Поведение галогенов в гидроксилсодержащих минералах контролировалось окислительно-восстановительным потенциалом, давлением галоидоуглеводородных флюидов и составом базальтовых расплавов. Богатые галогенами слюды и амфиболы кристаллизовались на уровнях MW-, IW- и QIF-буферов. В восстановительных условиях хлор проявил ярко выраженную феррофильность, а фтор — магнезиофильность.
4. Сходное поведение галогенов в апатитах, слюдах и амфиболах в породах расслоенных интрузий различных комплексов свидетельствует об идентичности действовавших в них механизмов флюидно-магматической дифференциации.

Авторы выражают благодарность руководству ПАО «НГМК «Норильский никель» и ООО «Норильскгеология» за финансовое обеспечение полевых экспедиционных и аналитических работ, за постоянный интерес, внимание и помощь в проводимых исследованиях, проф. В.Н. Шарапову за обсуждение текста статьи и сделанные к ней замечания.

Работа выполнена в соответствии с госбюджетным заданием № 0330-2016-0010.

## ЛИТЕРАТУРА

**Аплонов В.С., Золотарев А.А.** Особенности химического состава амфиболов Талнахского медно-никелевого месторождения (северо-запад Сибирской платформы) // Зап. ВМО, № 4, 2005, с. 45—56.

**Буслаева Е.Ю., Новгородова М.И.** Элементоорганические соединения в проблеме миграции рудного вещества. М., Наука, 1989, 152 с.

**Виленский А.М., Кавардин Г.И., Кравцова Л.И., Старицина Г.Н.** Петрология трапповых интрузий правобережья нижнего течения Енисея. М., Наука, 1964, 237 с.

**Дистлер В.В., Служеникин С.Ф., Кабри Л.Дж., Криволицкая Н.А., Туровцев Д.М., Голованова Т.А., Мохов А.В., Кнауф В.В., Олешкевич О.И.** Платиновые руды норильских расслоенных интрузивов: соотношение магматического и флюидного концентрирования благородных металлов // Геология рудных месторождений, 1999, т. 41, № 3, с. 241—265.

**Золотарев А.А., Аплонов В.С.** Особенности химического состава слюд Талнахского платиноидно-медно-никелевого месторождения (северо-запад Сибирской платформы) // Зап. ВМО, 2006, № 4, с. 48—65.

**Золотухин В.В., Виленский А.М., Дюжиков О.А.** Базальты Сибирской платформы (особенности геологии, состава и генезиса пермотриасовых эффузивов). Новосибирск, Наука, 1986, 245 с.

**Карпенков А.М., Рудашевский Н.С., Шумская Н.И.** Природный хлорид палладия и висмута — фаза состава  $Pd_4Vl_5Cl_3$  // Зап. ВМО, 1981, вып. 1, ч. 110, с. 86—91.

**Кравчук И.Ф., Малинин С.Д., Сенин В.Г.** Растворимость хлора в алюмосиликатных расплавах // Геохимия, 1998, № 10, с. 1065—1070.

**Кривенко А.П., Толстых Н.Д.** Хлорапатит в рудоносных пикритоидах интрузива Норильск-I // Базитовый магматизм Сибирской платформы и его металлогения. Тез. докл. Всесоюз. совещ. Якутск, Якутский науч. Центр СО АН СССР, 1989, с. 97—98.

**Лурье М.Л., Масайтис В.Л., Полунина Л.А.** Интрузивные траппы западной окраины Сибирской платформы // Петрография Восточной Сибири / Ред. Г.Д. Афанасьев. Т. 1. М., Изд-во АН СССР, 1962, с. 5—70.

**Маракушев А.А., Сук Н.И., Новиков М.П.** Хлоридная экстракция рудогенных металлов и проблема их миграции из магматических очагов // ДАН, 1997, т. 352, № 1, с. 83—86.

**Никольский Н.С.** Флюидный режим эндогенного минералообразования. М., Наука, 1987, 198 с.

**Павлов Д.И.** Магнетитовое рудообразование при участии экзогенных хлоридных вод. М., Наука, 1975, 246 с.

**Павлов Н.В.** Магномагнетитовые месторождения Тунгусской синеклизы Сибирской платформы (Тр. ИГЕМ АН СССР). М., 1961, вып. 52, 224 с.

**Рудашевский Н.С., Карпенков А.М., Шипова Г.С., Шишкин Н.Н., Рябикин В.А.** Талфенисит — таллиевый аналог джерфишерита // Зап. ВМО, 1979, ч. CVIII, вып. 6, с. 696—701.

**Рябов В.В.** Источники флюидов в траппах и рудах Сибирской платформы // Флюидный режим эндогенных процессов континентальной литосферы // Материалы Всерос. совещ. (6—9 октября 2015 г.). — Иркутск, Институт земной коры СО РАН, 2015, с. 156—158.

**Рябов В.В.** Петрология и рудоносность Курейско-Горбиачинского вулканоплутона (северо-запад Сибирской платформы) // Петрология магматических и метаморфических комплексов (Материалы Всерос. конф.). Томск, ЦНТИ, 2016, вып. 8, с. 267—274.

**Соболев В.С.** Петрология траппов. Избранные труды. Новосибирск, Наука, 1986, 209 с.

**Eugster H.P., Wones D.R.** Stability relations of the ferruginous biotite, annite // J. Petrol., 1962, v. 3, part 1, p. 82—125.

**Gilbert M.C.** Synthesis and stability relations of the hornblende ferropargasite // Am. J. Sci., 1966, v. 264, p. 698—742.

**Ryabov V.V., Lapkovsky A.A.** Native iron(-platinum) ores from the Siberian Platform trap intrusions // Austral. J. Earth Sci., 2010, v. 57, p. 707—730.

**Ryabov V.V., Shevko A.Ya., Gora M.P.** Trap magmatism and ore formations in the Siberian Noril'sk region // Modern approaches in solid Earth sciences 3. V. 1. Trap petrology. 390 p. V. 2. Atlas of magmatic rocks. Springer. 2014, 628 p.

**Thomas W.M.** Stability Relations of the Amphibole Hastingsite // Am. J. Sci., 1982, v. 282, № 2, p. 136—164.