

ISSN 0869-5997

# **и РУДЫ МЕТАЛЛЫ**



Специальный выпуск – алмазы

## **ORES AND METALS**

Special Issue – Diamonds

**3 / 2021**

# РУДЫ И МЕТАЛЛЫ 3 / 2021

## Учредитель

ФГБУ «Центральный научно-исследовательский геологоразведочный институт цветных и благородных металлов»  
Роснедра Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации

Свидетельство о регистрации средства массовой информации № 01919 от 21 декабря 1992 г.

Решением Высшей аттестационной комиссии Министерства образования и науки Российской Федерации журнал включён в «Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание учёной степени доктора и кандидата наук»

Москва, ЦНИГРИ, 2021

Журнал издаётся при поддержке Международной ассоциации по генезису рудных месторождений



## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

### **Черных Александр Иванович**

главный редактор  
генеральный директор ФГБУ «ЦНИГРИ»  
кандидат геолого-минералогических наук

### **Иванов Анатолий Иннокентьевич**

заместитель главного редактора  
научный руководитель ФГБУ «ЦНИГРИ»  
доктор геолого-минералогических наук

### **Пирайно Франко**

заместитель главного редактора  
по международным публикациям  
профессор, Университет Западной Австралии,  
г. Перт, Австралия

### **Наумов Евгений Анатольевич**

заместитель главного редактора по общим вопросам  
заместитель генерального директора  
по научной работе ФГБУ «ЦНИГРИ»  
кандидат геолого-минералогических наук

### **Жаркова Вера Сергеевна**

заместитель главного редактора  
по редакционно-издательской деятельности  
заведующая редакционно-оформительским  
отделом ФГБУ «ЦНИГРИ»

### **Аракчеев Дмитрий Борисович**

генеральный директор ФГБУ «Росгеолфонд»  
кандидат технических наук

### **Волчков Алексей Гордеевич**

заведующий научно-методическим отделением ФГБУ «ЦНИГРИ»  
кандидат геолого-минералогических наук

### **Вымазалова Анна**

Чешская геологическая служба, г. Прага, Чешская Республика

### **Голубев Юрий Конкордьевич**

заведующий отделом алмазов ФГБУ «ЦНИГРИ»  
кандидат геолого-минералогических наук

### **Горячев Николай Анатольевич**

главный научный сотрудник СВКНИИ ДВО РАН  
доктор геолого-минералогических наук, член-корр. РАН

### **Дементьев Владимир Евгеньевич**

генеральный директор АО «Иргиредмет»  
кандидат технических наук

### **Звездов Вадим Станиславович**

заведующий отделом металлогении ФГБУ «ЦНИГРИ»  
кандидат геолого-минералогических наук

### **Калинин Юрий Александрович**

главный научный сотрудник ИГМ СО РАН  
доктор геолого-минералогических наук

### **Кременецкий Александр Александрович**

советник генерального директора ФГБУ «ИМГРЭ»  
доктор геолого-минералогических наук

### **Кряжев Сергей Гаврилович**

заведующий отделом минералогии  
и изотопной геохимии ФГБУ «ЦНИГРИ»  
доктор геолого-минералогических наук

### **Кузнецов Владимир Вениаминович**

заведующий отделом цветных металлов ФГБУ «ЦНИГРИ»  
кандидат геолого-минералогических наук

### **Ленц Дэвид**

профессор, Университет Нью Брунсуик, Канада

### **Мишенин Сергей Григорьевич**

заведующий отделом геофизики ФГБУ «ЦНИГРИ»  
кандидат геолого-минералогических наук

### **Похиленко Николай Петрович**

научный руководитель ИГМ СО РАН  
доктор геолого-минералогических наук, академик РАН

### **Проскурнин Василий Фёдорович**

заведующий отделом региональной геологии и полезных  
ископаемых Восточных районов России ФГБУ «ВСЕГЕИ»  
доктор геолого-минералогических наук

### **Зельтманн Реймар**

профессор, Музей естественной истории,  
г. Лондон, Великобритания

### **Толстов Александр Васильевич**

директор НИГП АК «АЛРОСА» (ПАО)  
доктор геолого-минералогических наук

### **Третьякова Ирина Геннадьевна**

учёный секретарь ФГБУ «ЦНИГРИ»  
кандидат геолого-минералогических наук

### **Фридовский Валерий Юрьевич**

директор ИГАБМ СО РАН  
доктор геолого-минералогических наук, профессор



# ORES AND METALS 3/2021

Founded by FSBI «Central research institute of geological prospecting for base and precious metals» (TsNIGRI)  
Federal Agency for Subsoil Use

Mass media registration certificate No 01919 (21.12.1992).

Published since 1992

Moscow, TsNIGRI, 2021

The Journal is published with the support of the IAGOD  
(International association on the genesis of ore deposits)



## EDITORIAL BOARD

### **Alexander I. Chernykh**

Editor-in-chief  
FSBI TsNIGRI, General Director  
PhD

### **Anatoly I. Ivanov**

Deputy editor-in-chief  
FSBI TsNIGRI, Scientific Director  
PhD

### **Franco Pirajno**

Deputy editor-in-chief for international publications  
Dr., Adjunct Professor at Centre for Exploration Targeting,  
University of Western Australia

### **Evgeniy A. Naumov**

Deputy Editor-in-chief  
FSBI TsNIGRI, Deputy Director for Research  
PhD

### **Vera S. Zharkova**

Deputy editor-in-chief for editorial and publishing activities  
Head of editorial and design department, FSBI TsNIGRI

### **Dmitry B. Arakcheev**

FSBI Rosgeofond, General Director  
PhD

### **Alexey G. Volchkov**

Head of scientific and methodical department, FSBI TsNIGRI  
PhD

### **Anna Vymazalova**

Dr., Czech Geological Survey, Czech Republic

### **Yuri K. Golubev**

Head of diamond department, FSBI TsNIGRI  
PhD

### **Nikolay A. Goryachev**

Chief researcher, NEISRI FEB RAS  
Corr. Member of RAS

### **Vladimir E. Dementiev**

General Director, JSC Irgiredmet  
PhD

### **Vadim S. Zvezdov**

Head of metallogeny department, FSBI TsNIGRI  
PhD

### **Yuri A. Kalinin**

Chief researcher, IGM SB RAS  
PhD

### **Alexander A. Kremenetsky**

Advisor to General Director, FSBI IMGRE  
PhD

### **Sergey G. Kryazhev**

Head of mineralogy and isotope geochemistry  
department, FSBI TsNIGRI  
PhD

### **Vladimir V. Kuznetsov**

Head of base metals department, FSBI TsNIGRI  
PhD

### **David Lentz**

Dr., Professor, University of New Brunswick, Canada

### **Sergey G. Mishenin**

Head of geophysics department, FSBI TsNIGRI  
PhD

### **Nikolay P. Pokhilenko**

Scientific Director, IGM SB RAS  
Academician of RAS

### **Vasily F. Proskurin**

Head of the eastern Russia regional geology  
and minerals department, FSBI VSEGEI  
PhD

### **Reimar Seltmann**

Dr., Professor, Head of CERCAMS (Centre for Russian  
and Central EurAsian Mineral Studies),  
Natural History Museum, London

### **Alexander V. Tolstov**

Director, JSC ALROSA (PJSC)  
PhD

### **Irina G. Tretiakova**

Science secretary, FSBI TsNIGRI  
PhD

### **Valery Yu. Fridovsky**

Director, IGABM SB RAS  
PhD, Professor



# СОДЕРЖАНИЕ CONTENTS

## ПРИКЛАДНАЯ МЕТАЛЛОГЕНИЯ

**Иванов Д. В., Толстов А. В., Иванов В. В.**  
Роль пликативных структур как прогнозных критериев на алмазоносные кимберлиты в Алакит-Мархинском поле

06

## APPLIED METALLOGENY

**Ivanov D. V., Tolstov A. V., Ivanov V. V.**  
The role of plicative structures as forecast criteria in the Alakit-Markhinsky field (Western Yakutia)

**Проценко Е. В., Шахурдина Н. К.**  
Дополнительные структурно-тектонические факторы локализации кимберлитов в пределах Вилуйско-Мархинской зоны разломов по современным данным

14

**Protsenko E. V., Shakhurdina N. K.**  
Tectonic setting of kimberlites in the Vilyui-Markhinsky fault zone according to modern data

**Прусакова Н. А.,  
Громцев К. В., Лаптев М. М.**  
Геолого-геофизические предпосылки выделения перспективных площадей для постановки поисковых работ на коренные месторождения алмазов

22

**Prusakova N.A.,  
Gromtsev K. V., Laptev M. M.**  
Geological and geophysical criteria as indicators of promising areas for diamond prospecting

**Толстов А. В., Максимкина Л. В.,  
Колесник А. Ю., Абрамов В. Ю.,  
Антонова Н. В.**  
Перспективы алмазоносности Чаро-Синской зоны разломов

46

**Tolstov A. V., Maksimkina L. V.,  
Kolesnik A. Yu., Abramov V. Yu.,  
Antonova N. V.**  
Diamond prospects of the Charo-Sinsk fault zone

## МЕТОДЫ И МЕТОДИКИ ПРОГНОЗА, ПОИСКОВ, ОЦЕНКИ И РАЗВЕДКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

**Зинчук Н. Н., Бардухинов Л. Д.**  
О специфике изучения алмаза при прогнозно-поисковых работах (на примере Сибирской платформы)

59

## PROGNOSIS, PROSPECTING AND EXPLORATION: TECHNIQUES AND METHODS

**Zinchuk N. N., Bardukhinov L. D.**  
Diamond study features in forecasting and prospecting (siberian platform)

**Каржавин В. К.**  
Алмазы «полуночных земель» России

76

**Karzhavin V. K.**  
Diamonds of Russia's «midnight lands»



## СТРОЕНИЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ АЛМАЗОВ

**Игнатов П. А., Зарипов Н. Р.,  
Новиков К. В., Толстов А. В.**

Складки волочения в осадочных  
породах, вмещающих кимберлиты  
Западной Якутии

**Пенделяк Р. Н.**

Многофазность образования трубки  
им. В. Гриба и её выраженность  
в палеомагнитных свойствах пород  
и ситовых характеристиках алмазов

**Помазанский Б. С., Монхоров Р. В.,  
Антонова Т. А., Мальковец В. Г.,  
Кулагин А. Н., Шалкина М. В.,  
Батырь В. Я., Собакин А. Е.**

Неизменённый кимберлит трубки  
Интернациональная (Мирнинское поле)

## ВЕЩЕСТВЕННЫЙ СОСТАВ И СВОЙСТВА ПОРОД И РУД

**Хачатрян Г. К., Анашкина Н. Е.**

Соотношение между распределением  
структурных примесей в кристаллах  
алмаза и алмазноностью  
кимберлитовых трубок (на примере  
Архангельской области и Якутии)

**Хмельков А. М.,  
Власова Э. А., Иванов А. С.**

Парагенетическое разнообразие  
состава гранатов из кимберлитов  
Накынского поля (Якутия)

## ПОЗДРАВЛЯЕМ С ЮБИЛЕЕМ

Филлипова В. П.  
Антоновича Л. П.  
Похиленко Н. П.  
Конкина В. Д.

## ПОСВЯЩАЕТСЯ ПАМЯТИ

Н. В. Межеловского  
Е. Е. Савари  
И. Б. Флёрова  
В. П. Орлова

82

92

101

114

131

142

148

## GEOLOGY OF DIAMOND DEPOSITS

**Ignatov P. A., Zaripov N. R.,  
Novikov K. V., Tolstov A. V.**

Drag folds in sedimentary  
rocks hosting kimberlites,  
west Yakutia

**Pendelyak R. N.**

Polyphase nature of Grib pipe formation  
and its manifestation in paleomagnetic  
rock properties and sieve diamond  
characteristics

**Pomazansky B. S., Monkhorov R. V.,  
Antonova T. A., Malkovets V. G.,  
Kulagin A. N., Sobakin A. E.,  
Shalkina M. V., Batyr V. Ya.**

Unaltered kimberlite  
of International pipe (Mirny field)

## COMPOSITION AND PROPERTIES OF ROCKS AND ORES

**Khachatryan N. E., Anashkina N. E.**

Ratio of structural impurity distribution  
in diamond crystals and kimberlite pipe  
diamond potential (case study  
of Arkhangelsk region and Yakutia)

**Khmelkov A. M.,  
Vlasova E. A., Ivanov A. S.**

Paragenetic diversity of garnet  
composition from Nakyn field  
kimberlites (Yakutia)

## OUR CONGRATULATIONS

Fillipov V. P.  
Antonovich L. P.  
Pokhilenko N. P.  
Konkin V. D.

## IN MEMORIUM

N. V. Mezhelovskiy  
I. B. Flerov  
E. E. Savari  
V. P. Orlov

## Роль пликативных структур как прогнозных критериев на алмазоносные кимберлиты в Алакит-Мархинском поле

### The role of plicative structures as forecast criteria in the Alakit-Markhinsky field (western Yakutia)

Иванов Д. В., Толстов А. В., Иванов В. В.

Ivanov D. V., Tolstov A. V., Ivanov V. V.

Охарактеризованы тектонические особенности Алакит-Мархинского кимберлитового поля, региональные факторы контроля кимберлитового магматизма, структурно-тектонические предпосылки поисков кимберлитовых тел. Раскрыты специфика образования кимберлитовых тел и роль тектоники в этом процессе. Как наиболее перспективные рассматриваются площади, относящиеся к малоамплитудным отрицательным структурам (депрессиям), поперечным осложнениям противоположного для основной пликативной структуры знака: для антиформ (поднятий) это седловидные понижения, для синформ (депрессий) – антиформные поднятия.

Ключевые слова: Алакит-Мархинское поле, кимберлит, тектоника, пликативные структуры, разломы.

This paper describes the tectonic features of the Alakit-Markha kimberlite field, regional factors of kimberlite magmatism control in this area, structural and tectonic preconditions for kimberlite pipe prospecting. The paper highlights kimberlite pipe formation features and the role of tectonics in this process. The most promising areas are those related to low-amplitude negative structures (e.g. depressions), especially transverse low-amplitude complications of the opposite sign for the main plicative structure: for antifolds (elevations), these are saddle-shaped depressions, and antifold elevations are for synforms (depressions).

Key words: Alakit-Markha field, kimberlite, tectonics, plicative structures, faults.

Для цитирования: © Иванов Д. В., Толстов А. В., Иванов В. В. Роль пликативных структур как прогнозных критериев на алмазоносные кимберлиты в Алакит-Мархинском поле. Руды и металлы. 2021. № 3. с. 6–13. DOI: 10.47765/0869-5997-2021-10014.

For citation: © Ivanov D. V., Tolstov A. V., Ivanov V. V. The role of plicative structures as forecast criteria in the Alakit-markhinsky field (western Yakutia). Ores and metals, 2021, № 3, pp. 6–13. DOI: 10.47765/0869-5997-2021-10014.



Интрузивные образования Алакит-Мархинского кимберлитового поля (АМКП) и Далдыно-Алакитского алмазонасного района (ДААР) связаны со структурами фундамента и платформенного чехла, формировавшимися в палеозое. В региональном плане площадь располагается в переходной зоне между положительными и отрицательными структурами I порядка Сибирской платформы – Анабарской антеклизой и Тунгусской синеклизой (рис. 1). Исследователи единодушны во мнении, что разрывные дислокации – наиболее важные элементы, определяющие как структуры кимберлитовых полей, так и размещение в их пределах отдельных тел [2, 10–12]. Кимберлитоконтролирующие разломы отражают на земной поверхности глубинные разломы I порядка, которые в осадочном чехле разветвляются в разрывные нарушения II–III порядков, постепенно переходя в зоны повышенной трещиноватости и дробления [2, 8, 9, 11].

Кимберлитовые тела АМКП приурочены к Сохолохскому грабенообразному прогибу секторного типа, который формировался по разломам субширотного и северо-восточного направлений (Безымянный, Чукукский и Мерчимденский), сходящимся к северо-востоку. Ось грабена ориентирована ортогонально простиранию региональных структур фундамента [7]. В гравитационном поле грабену соответствует отвечающий по морфологии минимум [2]. Относительное понижение интенсивности гравитационного поля обусловлено, по всей видимости, не только прогибанием кровли кристаллического основания, но и разуплотнением пород фундамента на глубинных уровнях его залегания, что может быть связано с очагом проявления кимберлитового магматизма. С кимберлитовыми проявлениями могло быть связано или предшествовать им интенсивное развитие мелких дислокаций (разрывных и пликативных) в пределах грабена.

В качестве примера региональных факторов контроля кимберлитового магматизма на Сибирской платформе можно привести Далдыно-Оленёкскую зону глубинных разломов, с которой многие исследователи связывают формирование Далдынского, Алакит-Мархин-

ского и других кимберлитовых полей, имеющих высокий и средний потенциал алмазонасности [1, 6, 7, 14–18]. Вероятно, основанием для выделения Далдыно-Оленёкской глубинной зоны послужил сам факт существования прерывистой цепочки кимберлитовых полей, простирающейся к северо-востоку от р. Морковка до среднего течения р. Оленёк. Некоторые авторы, основываясь на результатах геофизических исследований, говорят о непрерывной полосе (или зоне) глубинных разломов, прослеживающейся через кимберлитовые поля от ДААР через Верхне-Мунский до Средне-Оленёкского района. Ширина Далдыно-Оленёкской зоны – 80–90 км, простирание от северо-восточного 55–60° на юго-западе до северо-восточного 45–50° на северо-востоке. Отмечено также, что Далдыно-Оленёкская зона глубинных разломов пространственно-генетически не связана с вещественными комплексами или морфоструктурными элементами фундамента и платформенного чехла.

В пределах рассматриваемой территории выделена серия разрывных нарушений северо-восточного простирания. Они картируются как в пределах кимберлитового поля, так и вне контуров распространения кимберлитовых тел, не укладываясь в зону определённой ширины (80–90 км). Среди тектонических нарушений северо-восточного простирания, прослеживаемых через всю площадь АМКП, рядом отличительных признаков выделяются Эйкский и Чукукский разломы, проявленные в региональных геофизических полях. В зонах их влияния наблюдаются дугообразные загибы дайковых интрузий долеритов и изменение их простирания на ортогональное. Также отчётливо проявлены изменения структурных планов фундамента и платформенного чехла в блоках, разделённых данными разломами. Кроме того, все выявленные на сегодняшний день кимберлитовые тела АМКП не выходят за пределы блока, ограниченного Эйкским и Чукукским разломами.

Структурная позиция кимберлитового куста, цепочки или одиночно расположенных кимберлитовых тел в пределах поля неоднозначна и весьма разнообразна. Вместе с тем



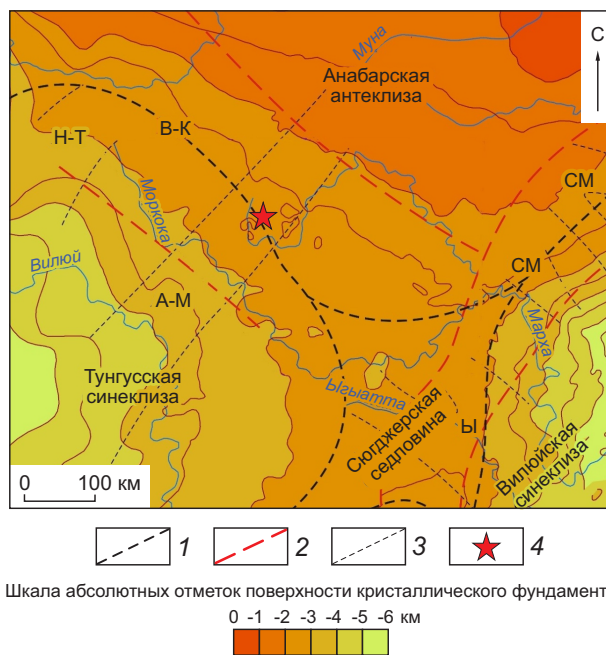
отмечается ряд закономерностей, которые позволяют выделить отдельные факторы структурного контроля [2, 3, 5, 10, 12, 13].

**Пликативные структуры.** Подавляющая часть кимберлитовых тел АМКП приурочена к малоамплитудным отрицательным структурам типа депрессий. Гораздо меньшая часть наблюдаются в сводах антиформ. Согласно статистике размещение кимберлитовых объектов в тектоническом плане тяготеет к депрессиям в два раза сильнее, чем к поднятиям. Так, расстояние от кимберлитовых тел до осей синформ в среднем составляет 980 м, тогда как до осей антиформ – в два раза больше (уже 1860 м).

Данная закономерность связана, очевидно, с особенностями генезиса кимберлитовых трубок. Дело в том, что депрессии имеют такую тектоническую структуру, при которой в килевой части создаётся область растяжения, а в приповерхностной части, наоборот, – сжатия (Гзовский, 1963). Благодаря этому кимберлитовый расплав быстро и практически беспрепятственно поднимается до верхних слоёв платформенного чехла, что сохраняет алмазы в расплаве. Попав в область сжатия, препятствующую процессу дегазации, расплав продолжает быть насыщенным летучими компонентами. В замкнутой системе давление растёт до критических показателей, пока не происходит взрыв, при котором и образуется кимберлитовая трубка.

Крылья складок поперечного изгиба представляют собой участки наиболее сниженного давления и максимального числа разрывов (рис. 2). Кимберлитовые тела, расположенные в этих участках, как правило, имеют форму жил и характеризуются слабой алмазонасностью. Однако это нельзя считать закономерностью, поскольку к такому типу относится промышленное месторождение – высокоалмазное дайкообразное тело месторождения Айхал, расположенное в борту локального поднятия на расстоянии 1310 и 2280 м от осей антиклинали и смежной синклинали соответственно (рис. 5).

Несмотря на общую приуроченность большинства кимберлитовых тел к депрессиям, мо-



**Рис. 1. Схема современной поверхности кристаллического фундамента в пределах рассматриваемого района, изученная по подошве осадочного чехла:**

1 – границы платформенных структур I порядка и их названия; 2 – зоны разломов I порядка (В-К – Вилойско-Котуйская); 3 – зоны разломов II порядка: Н-Т – Нижне-Томбинская, А-М – Алаakit-Моркокинская, Ы – Ыгыяттинская, СМ – Среднемархинская; 4 – трубка Юбилейная

**Fig. 1. Scheme of the crystalline basement modern surface within the considered area studied from the sedimentary cover base:**

1 – boundaries of the 1<sup>st</sup> order platform structures and their names; 2 – 1<sup>st</sup> order fault zones (B-K – Vilyuiskaya-Kotuykaya); 3 – 2<sup>nd</sup> order fault zones: H-T – Nizhne-Tombinskaya, A-M – Alakit-Morkokinskaya, Y – Ygyattinskaya, SM – Srednemarkhinskaya; 4 – Yubileynaya pipe

жно проследить закономерность их отсутствия в наиболее погружённых частях и размещение на локальных возвышенностях в пределах данных структур. Так, например, трубка Юбилейная локализована на малоамплитудном антиформном перегибе осевой линии Цен-

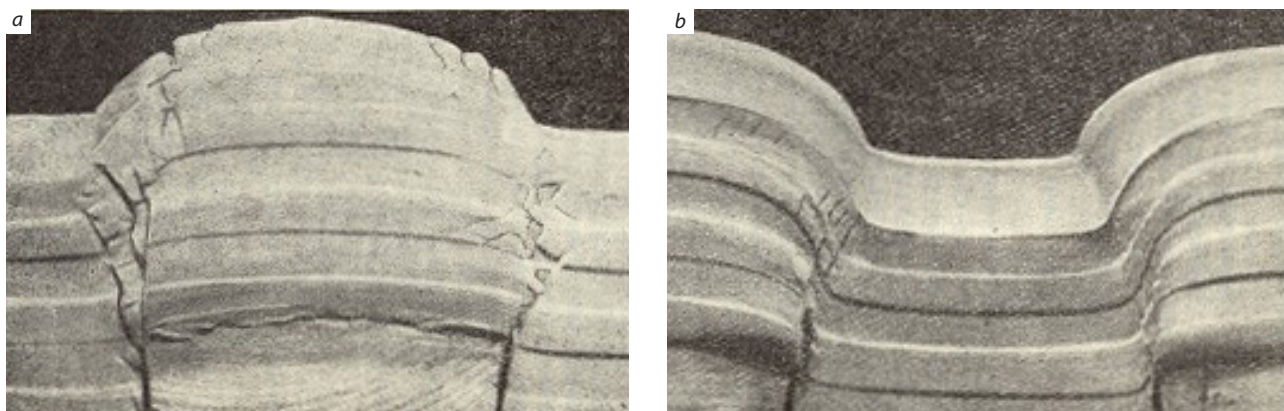


Рис. 2. Модели антиклинали (а) и синклинали (b) поперечного изгиба

Fig. 2. Models of anticline (a) and syncline (b) for transverse bending

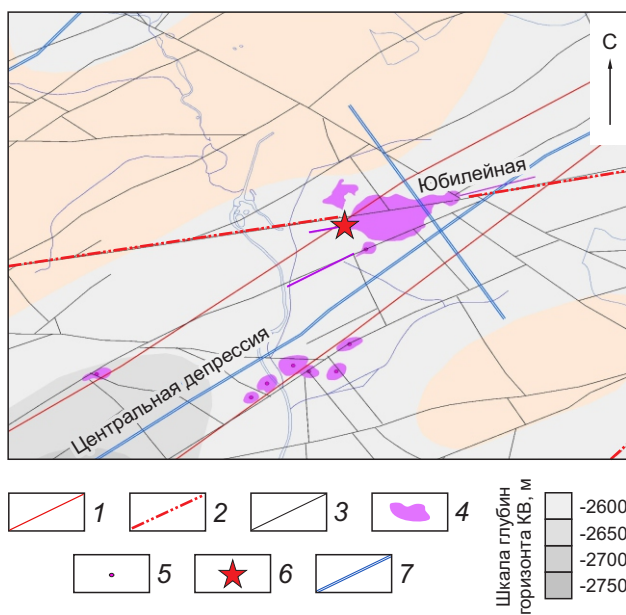


Рис. 3. Структурное положение трубки Юбилейная, масштаб 1:50 000:

осевые зоны рудовмещающих разломов: 1 – установленные, 2 – предполагаемые; 3 – разрывные нарушения, выделяемые по геолого-геофизическим данным; 4 – контуры кимберлитовых тел; 5 – кимберлитовые трубки; 6 – месторождения алмазов; 7 – оси структур синклиналичного типа (депрессий) и осложняющих поперечных пликативных дислокаций

Fig. 3. Structural position of the Yubileynaya pipe, scale 1:50 000:

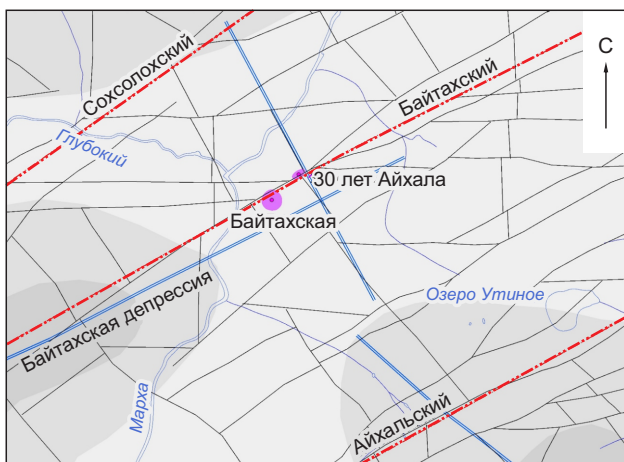
axial zones of ore-hosting faults: 1 – identified, 2 – estimated; 3 – faults identified by geological and geophysical data; 4 – contours of kimberlite bodies; 5 – kimberlite pipes; 6 – diamond deposits; 7 – axes of synclinal-type structures (depressions) and complicating transverse plicative dislocations

тральной депрессии (рис. 4). В подобных тектонических условиях располагаются трубки Удачная и Краснопресненская, однако последняя размещается не на поднятии, а в седловидном понижении антиформной структуры.

Таким образом, очевидно, что коренные месторождения алмазов тяготеют к локальным перегибам противоположного для основной пликативной структуры знака: в случае

поднятий это седловидные понижения, депрессий – антиформные поднятия.

**Закключение.** Подтверждением предположения о приуроченности кимберлитовых тел к поперечным малоамплитудным осложнениям противоположного для основной пликативной структуры знака является пространственное размещение ранее открытых (30 Лет Айхала, Байтахская, Ноябрьская, рис. 4, 5) и не-

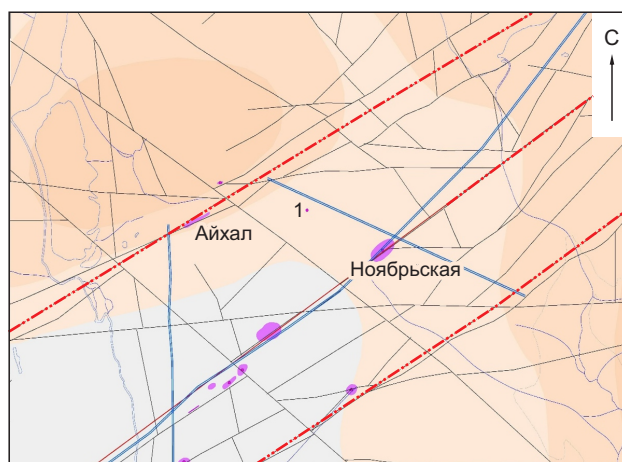


**Рис. 4. Структурное положение трубок 30 лет Айхала и Байтахская, масштаб 1 : 50 000:**

усл. обозн. см. рис. 3

**Fig. 4. Structural setting of Aikhal and Baytakhskaaya pipes, scale 1 : 50 000:**

see Fig. 3 for legend

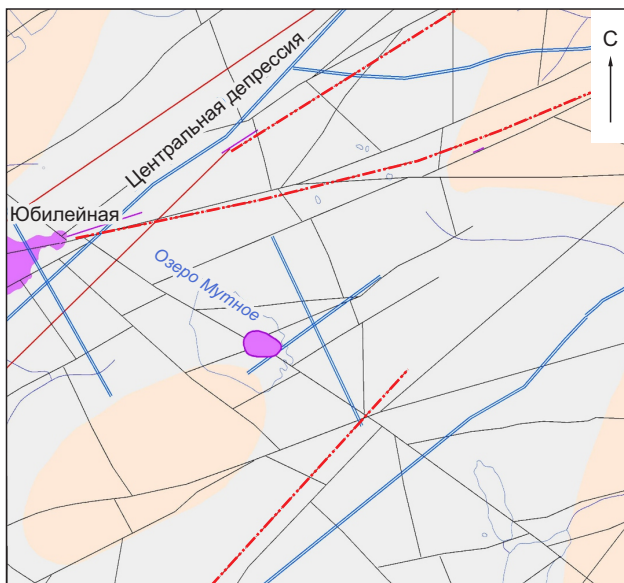


**Рис. 5. Структурное положение трубки Ноябрьская и вновь открытого тела на участке Трапповый, масштаб 1 : 50 000:**

усл. обозн. см. рис. 3

**Fig. 5. Structural setting of the Noyabrskaya pipe and the newly discovered body at the Trappovy area, scale 1 : 50 000:**

see Fig. 3 for legend



**Рис. 6. Структурное положение тела на оз. Мутное, масштаб 1 : 50 000:**

усл. обозн. см. рис. 3

**Fig. 6. Structural setting of the body, Mutnoye lake, scale 1 : 50 000:**

see Fig. 3 for legend

давно обнаруженных кимберлитовых тел на оз. Мутное (рис. 6) и на участке Трапповый (см. рис. 5).

Данные диаграммы локализованы в районе антиформных поднятий осевых линий депрессии. При этом на участке «Озеро Мутное», помимо указанных прогнозных критериев, иные предпосылки и признаки практически отсутствуют. Кимберлитовое тело под оз. Мутным имеет площадь около 6,5 га, что согласно «Инструкции по применению классификации запасов к коренным месторождениям алмазов» [7] позволяет отнести его к среднему по размерам. Вышесказанное позволяет сделать два вывода:

1. Главные структурно-тектонические критерии локального прогноза коренных месторождений алмазов в пределах АМКП, помимо кимберлитоперспективных узлов пересечения Далдыно-Оленёкской зоны глубинных разломов с тектоническими нарушениями северо-западного, субширотного и субмеридио-





нального направлений, – малоамплитудные депрессии, осложнённые структурами противоположного знака (антиформами).

2. Выявление значительного по размерам алмазоносного кимберлитового тела площадью 6,5 га под оз. Мутным наряду с открытием в 2016–2017 гг. кимберлитовых тел Январское и Весеннее в пределах хорошо изученных

площадей АМКП свидетельствует о высоких перспективах на обнаружение новых кимберлитовых объектов [4]. Прогнозируемые кимберлитовые тела по аналогии с трубками Айхал, Комсомольская и Заря могут стать коренными месторождениями повышенной алмазоносности (Айхал) или содержать алмазы повышенного качества (Комсомольская).

## Список литературы

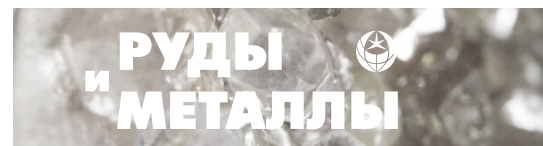
1. *Василенко В. Б., Толстов А. В., Кузнецова Л. Г., Минин В. А.* Петрохимические критерии оценки алмазоносности кимберлитовых месторождений Якутии // *Геохимия*. – 2010. – № 4. – С. 366–376.
2. *Герасимчук А. В.* Математическое моделирование – основной метод повышения надёжности локализации кимберлитовых полей по геофизическим данным // *Геология, закономерности размещения, методы прогнозирования и поисков месторождений алмазов*. – Мирный, 1998. – С. 244–246.
3. *Горев Н. И., Герасимчук А. В., Проценко Е. В., Толстов А. В.* Тектонические аспекты строения Вилюйско-Мархинской зоны, их использование при прогнозировании кимберлитовых полей // *Наука и образование*. – 2011. – № 3. – С. 5–10.
4. *Иванов Д. В., Толстов А. В., Иванов В. В.* Геологическое строение и вещественный состав кимберлитового тела Январское (Далдыно-Алаakitский алмазоносный район) // *Известия высших учебных заведений. Геология и разведка*. – 2018. – № 5. – С. 39–43.
5. *Игнатов П. А., Бушков К. Ю., Штейн Я. И., Толстов А. В., Яныгин Ю. Т.* Геологические и минералого-геохимические признаки структур, контролирующих алмазоносные кимберлиты Накынского поля Якутии // *Руды и металлы*. – 2006. – № 4. – С. 59–67.
6. *Инструкция по применению классификации запасов к коренным месторождениям алмазов*. – М.: ГКЗ СССР, 1984. – 22 с.
7. *Лапин А. В., Толстов А. В., Василенко В. Б.* Петрохимические особенности кимберлитов Средне-Мархинского района в связи с проблемой геохимической неоднородности кимберлитов // *Геохимия*. – 2007. – № 12. – С. 1292–1304.
8. *Мальцев М. В., Толстов А. В., Фомин В. М., Старкова Т. С.* Новое кимберлитовое поле в Якутии и типоморфные особенности его минералов-индикаторов // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. – 2016. – № 3. – С. 86–94.
9. *Мальцев М. В., Толстов А. В., Старкова Т. С., Иванов А. С.* Особенности вещественного состава кимберлитов Сюльдюкарского поля (Западная Якутия) // *Наука и образование*. – 2017. – № 4 (88). – С. 37–43.
10. *Милашев В. А.* Структуры кимберлитовых полей. – Л. [СПб.]: Недра, 1979. – 183 с.
11. *Проценко Е. В., Толстов А. В., Горев Н. И.* Критерии поисков кимберлитов и новые перспективы коренной алмазоносности Якутии // *Руды и металлы*. – 2018. – № 4. – С. 14–23.
12. *Салихов Р. Ф., Иванюшина Е. Н., Иванов Д. В.* Структурные критерии при крупномасштабном и локальном прогнозировании кимберлитов на закрытых территориях // *Геология и минералогия Северной Евразии: материалы совещания, приуроченного к 60-летию Института геологии и геофизики СО АН СССР*. – 2017. – С. 205–206.
13. *Салихов Р. Ф.* Дополнительные критерии прогноза кимберлитовых полей // *Региональная научно-практическая конференция «Геологическое обеспечение минерально-сырьевой базы алмазов: проблемы, пути решения, инновационные разработки и технологии»*. – Мирный, 2014. с. 195–198.
14. *Симоненко В. И., Толстов А. В., Васильева В. И.* Новый подход к геохимическим поискам кимберлитов на закрытых территориях // *Разведка и охрана недр*. – 2008. – № 4–5. – С. 108–112.
15. *Толстов А. В., Минин В. А., Василенко В. Б., Кузнецова Л. Г., Разумов А. Н.* Новое тело высокоалмазоносных кимберлитов в Накынском поле Якутской алмазоносной провинции // *Геология и геофизика*. – 2009. – Т. 50, № 3. – С. 227–240.

16. Agashev A. M., Pokhilenko N. P., Tolstov A. V., Orihashi Y., Nakai S., Serov I. V. Age of Mirny field kimberlites (Siberia) and application of rutile and titanite for U-Pb Dating of kimberlite emplacement by LA-ICP-MS // *Geochemical Journal*. – 2016. – V. 50, № 5. – P. 431–438.
17. Sobolev N. V., Tomilenko A. A., Tolstov A. V., Logvinova A. M., Kuz'min D. V., Sobolev A. V., Batanova V. G. Unique compositional peculiarities of olivine pheno-

- crysts from the post flood basalt diamondiferous Malokuonapskaya Kimberlite Pipe, Yakutia // *Doklady Earth Sciences*. – 2015. – V. 463, № 2. – P. 828–832.
18. Vasilenko V. B., Kuznetsova L. G., Minin V. A., Tolstov A. V. Evaluating the diamondiferous potential of unaltered kimberlites by the population models of their composition // *Geochemistry International*. – 2012. – V. 50, № 12. – P. 988–1006.

## References

1. Vasilenko V. B., Tolstov A. V., Kuznetsova L. G., Minin V. A. Petrokhimicheskie kriterii otsenki almazonosnosti kimberlitovykh mestorozhdenii Yakutii [Petrochemical criteria for evaluation of diamond content of kimberlite deposits in Yakutia], *Geokhimiya* [*Geochemistry International*], 2010, No 4, pp. 366–376. (In Russ.).
2. Gerasimchuk A. V. Matematicheskoe modelirovaniye – osnovnoi metod povysheniya nadezhnosti lokalizatsii kimberlitovykh polei po geofizicheskim dannym [Mathematical modeling is the main method of improving the reliability of the localization of the kimberlite fields according to geophysical data], *Geologiya, zakonmernosti razmeshcheniya, metody prognozirovaniya i poiskov mestorozhdenii almazov* [*Geology, patterns of distribution, methods of forecasting and prospecting of diamond deposits*], Mirny, 1998, pp. 244–246. (In Russ.).
3. Gorev N. I., Gerasimchuk A. V., Prochenko E. V., Tolstov A. V. Tektonicheskie aspekty stroeniya Vilyuiskko-Markhinskoi zony, ikh ispol'zovanie pri prognozirovaniim kimberlitovykh polei [Tectonic aspects of the structure of the Vilyui-Markha zone, their use in predicting kimberlite fields], *Nauka i obrazovanie* [*The Education and Science Journal*], 2011, No 3, pp. 5–10. (In Russ.).
4. Ivanov D. V., Ivanov V. V., Tolstov A. V. Geologicheskoe stroenie i veshchestvennyi sostav kimberlitovogo tela Yanvarskoe (Daldyno-Alakitskii almazonosnyi raion [Geological structure and material composition of the kimberlite pipe Yanvarskaya (Daldyn-Alakit diamond-bearing district)], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Geologiya i razvedka* [*Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration*], 2018, No 5, pp. 39–43. (In Russ.).
5. Ignatov P. A., Bushkov K. Y., Shtejn Y. I., Tolstov A. V., Yanygin Y. T. Geologicheskie i mineralogo-geokhimicheskie priznaki struktur, kontroliruyushchikh almazonosnye kimberlity Nakynskogo polya Yakutii [Geological and mineralogical-geochemical features of structures controlling diamond-bearing kimberlites of the Nakyn field of Yakutia], *Rudy i metallu* [*Ores and metals*], 2006, No 4, pp. 59–67. (In Russ.).
6. Instruksiya po primeneniyu klassifikatsii zapasov k korennyim mestorozhdeniyam almazov [Instructions for the application of reserves classification to indigenous diamond deposits]. Moscow, GKZ SSSR Publ., 1984, 22 p.
7. Lapin A. V., Tolstov A. V., Vasilenko V. B. Petrogeokhimicheskie osobennosti kimberlitov Sredne-Markhinskogo raiona v svyazi s problemoi geokhimicheskoi neodnorodnosti kimberlitov [Geochemical features of kimberlites of the Sredne-Markha region of the problem of the geochemical heterogeneity of kimberlites], *Geokhimiya* [*Geochemistry International*], 2007, No 12, pp. 1292–1304. (In Russ.).
8. Maltsev M. V., Tolstov A. V., Fomin V. M., Starkova T. S. Novoe kimberlitovoe pole v Yakutii i tipomorfnye osobennosti ego mineralov-indikatorov [New kimberlite field in Yakutia and typomorphic peculiarities of minerals-indicators], *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya* [*Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*], 2016, No 3, pp. 86–94. (In Russ.).
9. Maltsev M. V., Tolstov A. V., Starkova T. S., Ivanov A. S. Osobennosti veshchestvennogo sostava kimberlitov Syul'dyukarskogo polya (Zapadnaya Yakutiya) [Features of the kimberlite material composition in Syuldyukarskue kimberlite field (Western Yakutia)], *Nauka i obrazovanie* [*The Education and Science Journal*], 2017, No 4, pp. 37–43. (In Russ.).
10. Milashev V. Struktury kimberlitovykh polei [Structures of kimberlite fields], Leningrad, Nedra Publ., 1979, 183 p.



11. Protsenko E. V., Tolstoy N., Gorev N. I. Kriterii poiskov kimberlitov i novye perspektivy korennoi alamazonosnosti Yakutii [Criteria for the search for kimberlites and new prospects for the indigenous diamond content of Yakutia], *Rudy i metally* [Ores and metals], 2018, No 4, pp. 14–23. (In Russ.).
12. Salikhov R. F., Ivaniushina E. N., Ivanov D. V. Strukturnye kriterii pri krupnomasshtabnom i lokal'nom prognozirovanii kimberlitov na zakrytykh territoriyakh [The Structural criteria at largescale and the local prognostication of kimberlites in closed areas], *Geologiya i minerageniya Severnoi Evrazii: materialy soveshchaniya, priurochennogo k 60-letiyu Instituta geologii i geofiziki SO AN SSSR* [Geology and metallogeny of Northern Eurasia: proceedings of the conference dedicated to the 60th anniversary of the Institute of Geology and Geophysics SD AS USSR], 2017, pp. 205–206. (In Russ.).
13. Salikhov R. F. Dopolnitel'nye kriterii prognoza kimberlitovykh polei [Additional criteria for prediction of kimberlite fields], *Regional'naya nauchno-prakticheskaya konferentsiya "Geologicheskoe obespechenie mineral'no-syr'evoi bazy almazov: problemy, puti resheniya, innovatsionnye razrabotki i tekhnologii"* [Regional scientific and practical conference "Geological support of mineral resources base of diamonds: problems, solutions, innovative developments and technologies"], Mirny, 2014, pp. 195–198. (In Russ.).
14. Simonenko V. I., Tolstov A. V., Vasileva V. I. Novyi podkhod k geokhimicheskim poiskam kimberlitov na zakrytykh territoriyakh [New approach to geochemical prospecting of kimberlites in closed areas], *Razvedka i okhrana nedr* [Prospect and protection of mineral resources], 2008, No 4–5, pp. 108–112. (In Russ.).
15. Tolstov A. V., Minin V. A., Vasilenko V. B., Kuznetsova L. B., Razumov A. N. Novoe telo vysokoalmazonosnykh kimberlitov v Nakynskom pole Yakutskoi alamazonosnoi provintsii [New body of high-diamond kimberlites in the Nakyn field of the Yakut diamondiferous province], *Geologiya i geofizika* [Russian Geology and Geophysics], 2009, V. 50, No 3, pp. 227–240. (In Russ.).
16. Agashev A. M., Pokhilenko N. P., Tolstov A. V., Orihashi Y., Nakai S., Serov I. V. Age of Mirny field kimberlites (Siberia) and application of rutile and titanite for U-Pb Dating of kimberlite emplacement by LA-ICP-MS, *Geochemical Journal*, 2016, V. 50, No 5, pp. 431–438.
17. Sobolev N. V., Tomilenko A. A., Tolstov A. V., Logvinova A. M., Kuz'min D. V., Sobolev A. V., Batanova V. G. Unique compositional peculiarities of olivine phenocrysts from the post flood basalt diamondiferous Malokuonapskaya Kimberlite Pipe, Yakutia, *Doklady Earth Sciences*, 2015, V. 463, No 2, pp. 828–832.
18. Vasilenko V. B., Kuznetsova L. G., Minin V. A., Tolstov A. V. Evaluating the diamondiferous potential of unaltered kimberlites by the population models of their composition, *Geochemistry International*, 2012, V. 50, No 12, pp. 988–1006.

## Авторы

### Иванов Дмитрий Вячеславович

начальник участка ОГРП ВГРЭ  
IvanovDV@alrosa.ru

### Толстов Александр Васильевич

доктор геолого-минералогических наук  
академик АН РС (Я), директор  
TolstovAV@alrosa.ru

### Иванов Вячеслав Викторович

кандидат геолого-минералогических наук  
главный специалист геологического отдела ВГРЭ  
IvanovVV@alrosa.ru

Научно-исследовательское геологическое предприятие  
АК «АЛРОСА» (ПАО)

## Authors

### Ivanov Dmitry Vyacheslavovich

Head of department  
IvanovDV@alrosa.ru

### Tolstov Alexander Vasil'evich

PhD  
Corresponding Member of RAS  
TolstovAV@alrosa.ru

### Ivanov Vyacheslav Viktorovich

PhD  
Chief expert  
IvanovVV@alrosa.ru

JSC ALROSA (PJSC)  
Mirny, Russia



## Дополнительные структурно-тектонические факторы локализации кимберлитов в пределах Вилуйско-Мархинской зоны разломов

### Tectonic setting of kimberlites in the Vilyui-Markhinsky fault zone according to modern data

Проценко Е. В., Шахурдина Н. К.

Protsenko E. V., Shakhurdina N. K.

Латеральная зональность Вилуйско-Мархинской зоны (ВМЗ) разломов установлена посредством анализа структурно-тектонических построений, на общем фоне моноклиального залегания нижнепалеозойских пород были выявлены области усложнённого структурного плана, выделенные в качестве подзон ВМЗ – центральной и западной; они охарактеризованы. Отмечено, что высокоалмазоносные поля Мирнинское и Накынское приурочены к центральной, а среднеалмазоносное Сюдьюкарское поле – к западной подзоне Вилуйско-Мархинской зоны. Выполнен анализ плотности дизъюнктивных дислокаций на территории исследований. Показано, что в пределах подзон увеличена плотность разрывных нарушений, что характеризует их как области повышенной проницаемости, благоприятные для внедрения кимберлитовых расплавов. Данный факт может служить дополнительным структурно-тектоническим критерием при выделении площадей для постановки алмазопромышленных работ.

Ключевые слова: структурно-тектонический анализ, Вилуйско-Мархинская зона, плотность разрывных нарушений, кимберлитовое поле.

The lateral heterogeneity of the Vilyui-Markha fault zone was determined, the central and western subzones were identified. The high-grade diamondiferous Mir and Nakyn kimberlite fields are confined to the central subzone. The low-grade diamondiferous Syuldyukar kimberlite field is confined to the western subzone of the Vilyui-Markha zone. The analysis of the fault network density in the research area was carried out. It was found that the fault network density increases within the subzones, which characterizes them as increased permeability areas favorable for kimberlite melts uprising. This fact can be another tectonic criterion for setting up diamond prospecting operations.

Keywords: tectonic analysis, Vilyui-Markha zone, faults, kimberlite field.

Для цитирования: © Проценко Е. В., Шахурдина Н. К. Дополнительные структурно-тектонические факторы локализации кимберлитов в пределах Вилуйско-Мархинской зоны разломов. Руды и металлы. 2021. № 3. с. 14–21. DOI: 10.47765/0869-5997-2021-10015.

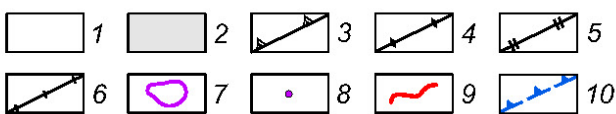
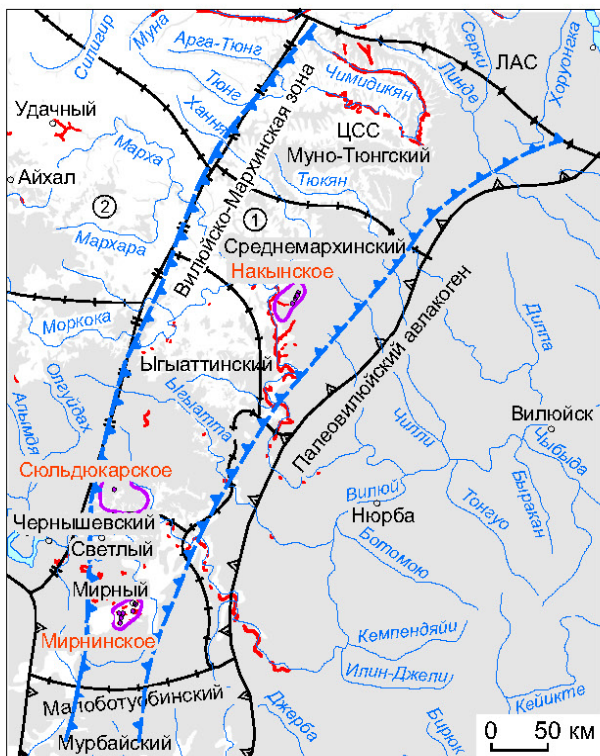
For citation: © Protsenko E. V., Shakhurdina N. K. Tectonic setting of kimberlites in the Vilyui-Markhinsky fault zone according to modern data. Ores and metals, 2021, № 3, pp. 14–21. DOI: 10.47765/0869-5997-2021-10015.

Основной источник алмазов в России – Якутская алмазоносная провинция (ЯАП). Наиболее продуктивной считается её южная часть – Центрально-Сибирская субпровинция (ЦСС). Вилуйско-Мархинская зона разломов (ВМЗ), обрамляющая северо-западный борт Палеовилуйского авлакогена, занимает юго-восточную часть ЦСС и пространственно совмещена с Вилуйско-Мархинской минерагенической областью, где выделяются пять алмазоносных районов. В ВМЗ открыты три продуктивных кимберлитовых поля – Мирнинское, Накынское и Сюльдюкарское, а также известны многочисленные находки алмазов, россыпи и россыпепроявления, коренные источники которых пока не выявлены (рис. 1).

Таким образом, Вилуйско-Мархинская зона – один из наиболее перспективных участков Западной Якутии на обнаружение новых

месторождений алмазов. В её пределах территории преимущественно открытого типа, на которых кимберлитовмещающие терригенно-карбонатные породы нижнего палеозоя выходят на земную поверхность, детально изучены лёгкими поисковыми работами, не требующими значительных материальных затрат. Степень их опоскованности на сегодняшний день можно считать удовлетворительной. Открытие здесь новых алмазоносных кимберлитовых полей и коренных месторождений алмазов маловероятно.

Большая часть территории ВМЗ перекрыта терригенными и, в меньшей мере, вулканогенными и магматическими породами верхнего палеозоя и мезозоя, экранирующими среднепалеозойские коренные источники алмазов (см. рис. 1). Эти закрытые площади изучены по-разному, но преимущественно слабо, то есть



**Рис. 1. Обзорная схема Вилуйско-Мархинской зоны с элементами минерагенического районирования:**

типы поисковых площадей: 1 – открытые для поисков, 2 – закрытые для поисков; границы разноранговых алмазоносных таксонов: 3 – Якутской алмазоносной провинции, 4 – субпровинций (ЦСС – Центрально-Сибирская, ЛАС – Лена-Анабарская), 5 – алмазоносных областей (1 – Вилуйско-Мархинская, 2 – Верхневилуйская), 6 – алмазоносных районов (и их названия), 7 – алмазоносных кимберлитовых полей (и их названия); 8 – кимберлитовые тела; 9 – россыпи и россыпепроявления алмазов; 10 – граница Вилуйско-Мархинской зоны разломов

**Fig. 1. General diagram of the Vilyui-Markha zone showing mineragenic zoning elements**

types of prospecting areas: 1 – accessible for prospecting, 2 – inaccessible for prospecting; boundaries of different-scale diamondiferous taxa: 3 – Yakutsk diamondiferous province, 4 – subprovinces (ЦСС – Central Siberian, ЛАС – Lena-Anabar), 5 – diamondiferous areas (1 – Vilyui-Markhinskaya, 2 – Verkhnevilyuiskaya), 6 – diamondiferous regions (and their names), 7 – diamondiferous kimberlite fields (and their names); 8 – kimberlite bodies; 9 – diamond placers; 10 – Vilyui-Markha fault zone

алмазонасный потенциал закрытой части зоны не исчерпан, поэтому она представляет основной интерес для постановки ГРР на алмазы.

В условиях закрытых площадей первостепенное значение приобретает научно обоснованный выбор участков для постановки ГРР, базирующийся на использовании комплекса надёжных прогнозно-поисковых признаков и достоверных предпосылок.

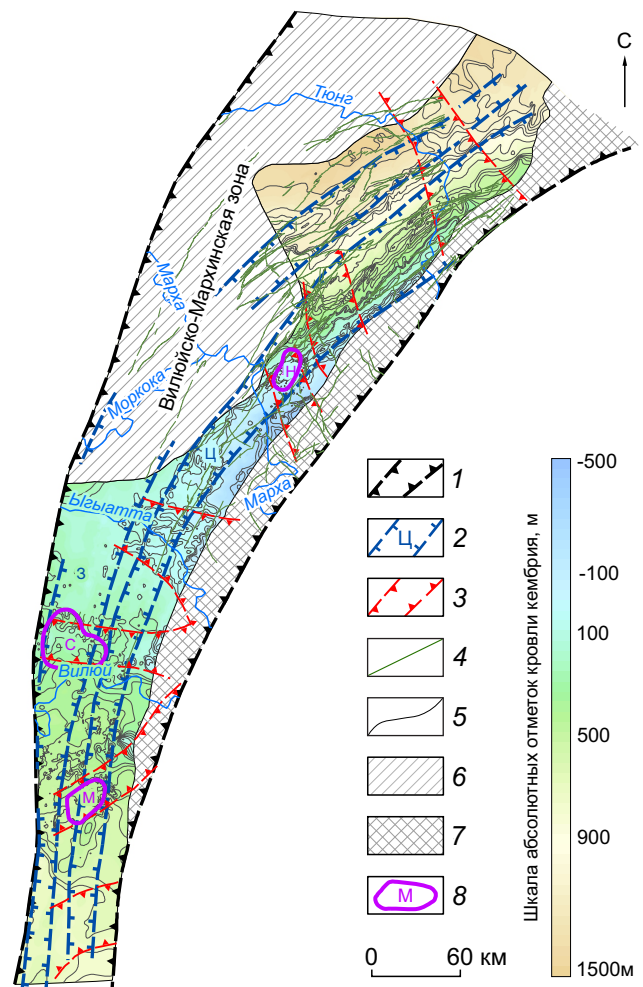
Немаловажное место в их ряду занимают структурно-тектонические критерии. Для алмазонасных таксонов среднего масштаба к ним относятся тектонические элементы, отвечающие за контроль кимберлитовых полей.

Многочисленными исследованиями установлено, что кимберлитовые поля тяготеют к краевым частям стабильных блоков и располагаются в узлах пересечения разнонаправленных разломных зон (линеаментов) [1, 2, 3, 9].

Ширина ВМЗ, занимающей краевую часть Анабаро-Мирнинского стабильного блока, варьируется в широких пределах – от 30–50 км на юге до 150 км на северо-востоке, а в центральной части составляет около 130 км.

Границы секущих зон, трассирующихся со стороны Палеовилуйского авлакогена, выделяются с определённой долей условности, так как сами зоны в осадочном чехле проявлены отдельными опущенными блоками либо фрагментарно прослеженными линейными прогибами (депрессиями), а большинство входящих в них разрывных нарушений выделяются в ранге предполагаемых. При значительной ширине ВМЗ и неуверенном прослеживании секущих зон узлы пересечения этих структур, во-первых, имеют площадь в десятки тысяч км<sup>2</sup>, что намного превышает площадь кимберлитового поля, и, во-вторых, выделяются недостаточно надёжно.

Ранее [4] на северо-восточном фланге ВМЗ была закартирована область повышенной проницаемости осадочного чехла, названная авторами центральной (осевой) ветвью ВМЗ, которая была прослежена в виде полосы шириной 20–25 км от долины р. Марха на юго-западе до р. Тюнг на северо-востоке. Было установлено, что дислоцированность верхней части нижнепалеозойского разреза вызвана ши-



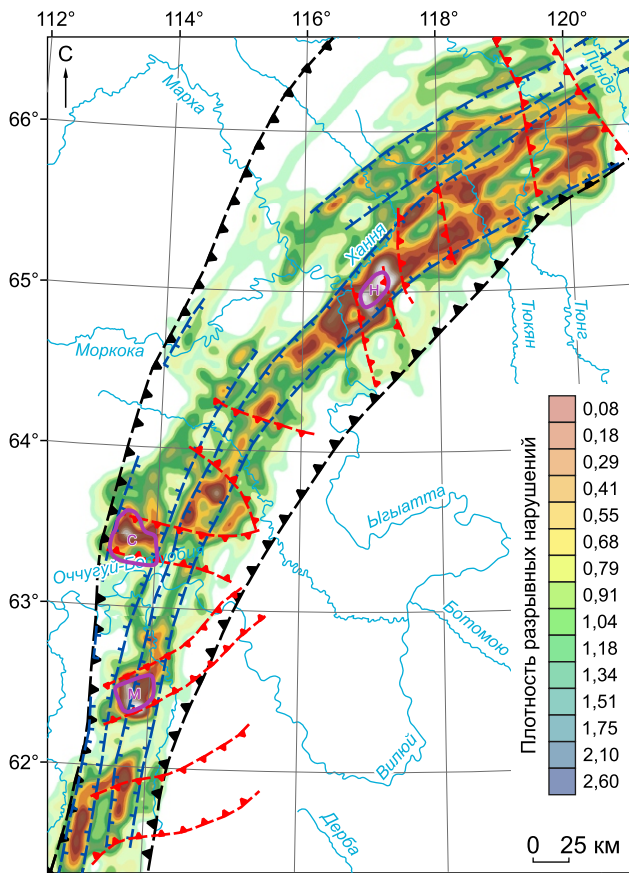
**Рис. 2. Структурно-тектоническая схема ВМЗ:**

1 – граница ВМЗ; 2 – подзоны ВМЗ (3 – западная, Ц – центральная); 3 – границы секущих зон разломов; 4 – дайки долеритов; 5 – изогипсы кровли кембрия; области ВМЗ, слабоизученные для структурных построений: 6 – открытые, 7 – закрытые; 8 – алмазонасные кимберлитовые поля (Н – Накынское, М – Мирнинское, С – Сьюлдюкарское)

**Fig. 2. Structural-tectonic scheme of the VMZ**

1 – Vilyui-Markha fault zone; 2 – VMZ subzones (3 – western, Ц – central); 3 – crosscutting zones; 4 – Cambrian roof isohypses; 5–6 – VMZ areas poorly studied for structural constructions: 5 – accessible, 6 – inaccessible; 7 – diamondiferous kimberlite fields (H – Nakynskoe, M – Mirninskoe, C – Syuldyukarskoe)





**Рис. 3. Схема плотности разрывных нарушений ВМЗ:**

усл. обозн. см. рис. 2

Fig. 3. Fault density diagram of the Vilyui-Markha fault zone see Fig. 2 for legend

роким развитием складчатых деформаций, а также значительным количеством разломных нарушений (до десяти на одно пересечение).

Цель настоящих исследований – изучение строения верхней части кимберлитовмещающих отложений на всём протяжении ВМЗ, а также выделение в её пределах тектонически ослабленных областей, наиболее благоприятных для внедрения магматических расплавов.

Для этого в программной среде ArcGIS был составлен комплект структурно-тектонических карт, с помощью которых была проанализирована пликативная тектоника изучаемой территории. Кроме того, на базе модуля Spati-

al Analyst Density была построена схема плотности разрывных нарушений в пределах ВМЗ. Фактическим материалом для построений послужили результаты детального стратиграфического расчленения нижнепалеозойских отложений по данным бурения колонковых скважин в комплексе с геофизическим исследованием скважин, а также результаты геологических и геофизических съёмок, проведённых на площади ВМЗ различными организациями.

Анализ пликативной тектоники верхней части нижнепалеозойского разреза показал, что строение зоны неоднородно: области моноклиналиного залегания пород перемежаются участками со сложным структурным планом, в пределах которых широко развиты складчатые деформации, представленные преимущественно линейными прогибами (грабенами), а также изометрическими, брахиформными синклиналиными и антиклиналиными складками, структурными мысами, желобами, часто осложнёнными разрывными нарушениями. Эти участки усложнённого строения, как и отмечалось ранее, прослеживаются в виде широкой, практически непрерывной полосы в центральной части ВМЗ, но, кроме того, фрагментарно фиксируются на её западном фланге. В связи с этим в пределах ВМЗ кроме центральной ветви выделена ещё одна ветвь (подзона) – западная (рис. 2). Именно к ней приурочено Сюдьюкарское кимберлитовое поле. Ретроспективные реконструкции, выполненные как для отдельных кимберлитовых полей [5, 6], так и для всей территории ВМЗ [8], показали, что большая часть как дизъюнктивных, так и пликативных структур имеет доюрский, вероятнее всего среднепалеозойский возраст, синхронный внедрению кимберлитов.

Внутренние (примыкающие к авлакогену) области ВМЗ слабо изучены поисковым бурением, данных для структурных построений в этой части зоны недостаточно. Однако по отдельным буровым профилям здесь зафиксировано резкое погружение стратиграфических горизонтов осадочного чехла в юго-восточном направлении, а также сильная тектоническая нарушенность, что свидетельствует об участ-

ках усложнённого строения и на юго-восточном фланге ВМЗ. Предшествующими исследованиями было установлено, что на границе с Вилюйской подвижной областью амплитуды разломных нарушений достигают 100–200 м и более [2]. А по результатам сейсморазведочных работ в краевой части Палеовилюйского авлакогена (ВМЗ) была выделена флексуобразная сложнопостроенная зона шириной 20–26 км, характеризующаяся как область повышенных дислокаций осадочного чехла [7], являющаяся зоной перехода от плавного к резкому погружению кристаллического фундамента в Вилюйскую синеклизу. Это позволяет предположить существование ещё одной подзоны усложнённого строения ВМЗ – восточной, характеризующейся наличием контрастных тектонических структур, как пликативных, так и разрывных. Сильная раздробленность вмещающих пород в пределах восточной подзоны, по нашему мнению, не способствует обеспечению термодинамической устойчивости рудообразующей системы, которая необходима для сохранения алмазов, и это делает обнаружение алмазоносных кимберлитовых проявлений в пределах восточной подзоны маловероятным.

Каждая из выделенных ветвей (подзон) характеризуется своими структурными особенностями. Центральная подзона в структуре нижнепалеозойских отложений выделяется уверенно. Ширина в центральной и северо-восточной частях – 30 км, на южном фланге – 20–25 км. В её пределах по всей длине фиксируется серия сближенных грабенообразных прогибов, сопровождающих разломы ВМЗ, широкое развитие пликативных дислокаций в виде изометрических либо удлинённых синклиналильных и антиклиналильных складок. Амплитуды пликативных структур варьируются от 10–30 до 50–70 м, редко больше, поперечные размеры изометрических складок в основном 2–7 км. Центральная подзона ВМЗ наиболее насыщена разломами и дайками. Подавляющая часть разломов благодаря интрузирующим их траппам уверенно фиксируется в наблюдаемом магнитном поле чёткими линейными протяжёнными аномалиями высокой ин-

тенсивности. В пределах центральной подзоны ВМЗ локализованы алмазоносные кимберлитовые поля Мирнинское и Накынское.

Западная подзона (ветвь) ВМЗ (шириной до 35 км) выделяется не столь уверенно, фрагментарно. Она представлена отдельными участками со сложным структурным планом кимберлитовмещающих отложений, обусловленным либо серией сближенных грабенообразных прогибов, как в центральных областях ВМЗ, либо широким развитием складчатых дислокаций, как на северо-восточном фланге зоны. На южном фланге, при значительно меньшей ширине самой ВМЗ, западная подзона выделена весьма условно. По сравнению с центральной подзоной амплитуды пликативных структур в пределах западной значительно ниже. Даечные тела, интрузирующие разломы, как правило, имеют меньшую протяжённость, часто прослежены фрагментарно. Многие из них в наблюдаемом магнитном поле не фиксируются, а выделены в трансформантах аномального магнитного поля. Открытое в 2015 г. Сьюльдюкарское кимберлитовое поле приурочено к западной подзоне ВМЗ.

Кроме выполненных структурных построений на территорию ВМЗ была составлена схема плотности разрывных нарушений (рис. 3). Ранее подобные построения проводились только для отдельных кимберлитовых полей [10, 11]. В рамках настоящих исследований было установлено, что плотность дизъюнктивов в пределах ВМЗ варьируется от 0,05 до 2,5 км/км<sup>2</sup>, причём разломы на исследуемой территории распределены неравномерно. Из представленной схемы видно, что именно в границах ветвей ВМЗ сконцентрировано и большинство разрывных нарушений (плотность разломов от 0,6 до 2,5 км/км<sup>2</sup>). Наибольших значений (1,3–2,5 км/км<sup>2</sup>) данная величина достигает в пределах известных кимберлитовых полей. Также повышенная плотность разломных нарушений характерна для ряда площадей, преимущественно совмещённых с центральной ветвью зоны, расположенных на междуречье Большой и Малой Ботубий (южная оконечность ВМЗ), правобережье р. Ыгыатта (центр зоны), долине р. Тюкян, на левобережье р. Тюнг.



Довольно выдержанное простираение ветвей ВМЗ, широко развитые в них складчатые дислокации, значительная концентрация разломов, зачастую залеченных протяжёнными дайками долеритов, свидетельствуют, по-видимому, о том, что подзоны отражают в верхней части осадочного чехла крупные долгоживущие разломы фундамента. Именно подзоны по физико-механическим особенностям представляют собой, с одной стороны, проницаемые участки земной коры, благоприятные для проникновения (продвижения) кимберлитовой магмы к дневной поверхности, а с другой – относительно закрытую тектономагматическую систему, способную сохранять термодинамические параметры в области стабильности алмаза.

Таким образом, анализом региональных построений была установлена латеральная зональность ВМЗ, в которой выделены центральная (шириной до 30 км) и западная (до 35 км) подзоны, характеризующиеся усложнением моноклиналиного залегания нижнепалеозой-

ского (кимберлитовмещающего) комплекса пород. При этом высокоалмазоносные поля Мирнинское и Накынское приурочены к центральной, а среднеалмазоносное Сюльдюкарское – к западной подзоне ВМЗ. Выделенные подзоны характеризуются повышенной плотностью разрывных нарушений, наибольших значений данная величина достигает в пределах известных кимберлитовых полей.

Данный факт может служить дополнительным структурно-тектоническим критерием при выделении площадей для постановки поисковых работ. Участки повышенной плотности разрывных нарушений, особенно совмещённые с областями усложнённого структурного плана нижнепалеозойских пород (подзонами), требуют особо пристального внимания и более детального изучения. Именно такие площади, характеризующиеся повышенной дислоцированностью осадочного чехла, по нашему мнению, наиболее благоприятны для продвижения к поверхности магматических расплавов, в том числе и кимберлитовых.

## Список литературы

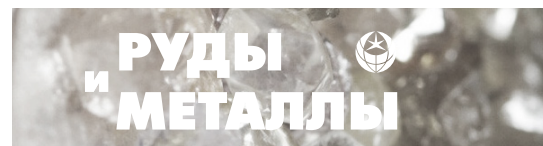
1. Антипин И. Ин., Антипин И. И. Среднемасштабное алмазопрогнозирование на примере Центрально-Сибирской субпровинции // Руды и металлы. – 2018. – № 1. – С. 4–10.
2. Горев Н. И. Тектонические исследования при прогнозировании коренных источников алмазов // Алмазная геология в АК «АЛРОСА» – настоящее и будущее (геологи АК «АЛРОСА» к 50-летию юбилею алмазодобывающей промышленности России). – Воронеж : ВГУ, 2005. – С. 1175–1202.
3. Горев Н. И., Герасимчук А. В. Специализированные тектонические карты при прогнозировании коренных месторождений алмазов на Сибирской платформе: методика составления и анализа // Руды и металлы. – 2017. – № 4. – С. 25–41.
4. Горев Н. И., Герасимчук А. В., Проценко Е. В., Толстов А. В. Тектонические аспекты строения Вилюйско-Мархинской зоны, их использование при прогнозировании кимберлитовых полей // Наука и образование. – 2011. – № 3. – С. 5–10.
5. Горев Н. И., Манаков А. В., Эринчек Ю. М., Гаррат М. Н. Особенности строения осадочного чехла Малоботуобинского алмазоносного района Якутии по данным палеоструктурного анализа // Региональная геология и металлогения. – 1994. – № 2 – С. 132–144.
6. Кондратьев А. А., Горев Н. И. Тектоническое строение и история развития Средне-Мархинского алмазоносного района Западной Якутии // Геология алмаза – настоящее и будущее. – Воронеж : ВГУ, 2005. – С. 95–105.
7. Манаков А. В., Оськин И. В., Антонов Ю. В., Слюсарев А. В. Новые данные о строении Вилюйско-Мархинской системы разломов // Геология, закономерности размещения, методы прогнозирования и поисков месторождений алмазов. – Мирный, 1998. – С. 270–272.
8. Проценко Е. В. Структурно-тектонические закономерности локализации алмазоносных кимберлитовых полей в пределах Вилюйско-Мархинской минерагенической зоны (Западная Якутия): специальность 25.00.11 «Геология, поиски и разведка твёрдых полезных ископаемых, минерагения»: дис. на соискание учён. степ. канд. геол.-минерал. наук / Проценко Елена Викторовна. – М., 2020. – 149 с.



9. Харькив А. Д., Зинчук Н. Н., Крючков А. И. Коренные месторождения алмазов мира. – М. : Недра, 1998. – 555 с.
10. Шахурдина Н. К. Применение информационных методов при локальном прогнозе Мирнинского кимберлитового поля // Геологическое обеспечение минерально-сырьевой базы алмазов: проблемы, пути решения, инновационные разработки и технологии : материалы IV Региональной научно-практической конференции. – Мирный, 2014. – С. 245–247.
11. Шахурдина Н. К., Проценко Е. В. Использование программной среды ARCGIS для анализа разломной тектоники кимберлитоперспективных территорий на примере Накынского кимберлитового поля (Западная Якутия) // Геологическое обеспечение минерально-сырьевой базы алмазов АК «АЛРОСА»: проблемы, пути решения, инновационные разработки и технологии. Айхал : материалы V полевого научно-практического семинара. – 2015. – С. 225–227.

## References

1. Antipin I. In., Antipin I. I. Srednemashtabnoe almazoprognozirovanie na primere Tsentral'no-Sibirskoi subprovintсии [Medium-scale diamond forecasting on the example of the Central Siberian subprovince], *Rudy i metally [Ores and Metals]*, 2018, No 1, pp. 4–10. (In Russ.).
2. Gorev N. I. Tektonicheskie issledovaniya pri prognozirovanii korennykh istochnikov almazov [Tectonic research in predicting the primary sources of diamonds], *Almaznaya geologiya v AK "ALROSA" – nastoyashchee i budushchee (geologi AK "ALROSA" k 50-letnemu yubileyu almazodobyvayushchei promyshlennosti Rossii)* [Diamond Geology at AK ALROSA – the present and the future (geologists of AK ALROSA to the 50th anniversary of the diamond mining industry in Russia)], Voronezh, VGU Publ., 2005, pp. 1175–1202.
3. Gorev N. I., Gerasimchuk A. V. Spetsializirovannyye tektonicheskie karty pri prognozirovanii korennykh mestorozhdenii almazov na Sibirskoi platforme: metodika sostavleniya i analiza [Specialized tectonic maps for forecasting primary diamond deposits on the Siberian platform: compilation and analysis methods], *Rudy i metally [Ores and Metals]*, 2017, No 4, pp. 25–41. (In Russ.).
4. Gorev N. I., Gerasimchuk A. V., Protsenko E. V., Tolstov A. V. Tektonicheskie aspekty stroeniya Vilyuisko-Markhinskoi zony, ikh ispol'zovanie pri prognozirovanii kimberlitovykh polei [Tectonic aspects of the structure of the Vilyui-Markha zone, their use in predicting kimberlite fields], *Nauka i obrazovanie [Science and Education]*, 2011, No 3, pp. 5–10. (In Russ.).
5. Gorev N. I., Manakov A. V., Erinchek Yu. M., Garat M. N. Osobennosti stroeniya osadochnogo chekhla Malobotuobinskogo almazonosnogo raiona Yakutii po dannym paleostruktornogo analiza [Features of the structure of the sedimentary cover of the Malobotuobinsky diamondiferous region of Yakutia according to paleostructural analysis], *Regional'naya geologiya i metallogeniya [Regional Geology and Metallogeny]*, 1994, No 2, pp. 132–144. (In Russ.).
6. Kondrat'ev A. A., Gorev N. I. Tektonicheskoe stroenie i istoriya razvitiya Sredne-Markhinskogo almazonosnogo raiona Zapadnoi Yakutii [Tectonic structure and history of development of the Sredne-Markhinsky diamondiferous region of Western Yakutia], *Geologiya almaza – nastoyashchee i budushchee [Geology of diamond – present and future]*, Voronezh, VGU Publ., 2005, pp. 95–105.
7. Manakov A. V., Os'kin I. V., Antonov Yu. V., Slyusarev A. V. Novye dannye o stroenii Vilyuisko-Markhinskoi sistemy razlomov [New data on the structure of the Vilyui-Markha system of faults], *Geologiya, zakonomernosti razmeshcheniya, metody prognozirovaniya i poiskov mestorozhdenii almazov [Geology, distribution patterns, methods of forecasting and prospecting for diamond deposits]*, Mirnyy, 1998, pp. 270–272.
8. Protsenko E. V. Strukturno-tektonicheskie zakonomernosti lokalizatsii almazonosnykh kimberlitovykh polei v predelakh Vilyuisko-Markhinskoi mineragenicheskoi zony (Zapadnaya Yakutiya) [Structural and tectonic patterns of localization of diamondiferous kimberlite fields within the Vilyui-Markha mineragenic zone (Western Yakutia): candidate's thesis], Moscow, 2020, 149 p.
9. Khar'kiv A. D., Zinchuk N. N., Kryuchkov A. I. Korennyye mestorozhdeniya almazov mira [Primary diamond deposits of the world], Moscow, Nedra Publ., 1998, 555 p.



10. Shakhurdina N. K. Primenenie informatsionnykh metodov pri lokal'nom prognoze Mirninskogo kimberlitovogo polya [Application of information methods for local forecasting of the Mirny kimberlite field], *Geologicheskoe obespechenie mineral'nosyr'evoi bazy almazov: problemy, puti resheniya, innovatsionnye razrabotki i tekhnologii: materialy IV Regional'noi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Geological support of the mineral resource base of diamonds: problems, solutions, innovative developments and technologies: materials of the IV Regional Scientific and Practical Conference], Mirny, 2014, pp. 245–247.
11. Shakhurdina N. K., Protsenko E. V. Ispol'zovanie programmnoi sredy ARCGIS dlya analiza razlomnoi tektoniki kimberlitoperspektivnykh territorii na primere Nakynskogo kimberlitovogo polya (Zapadnaya Yakutiya) [Using the ARCGIS software environment for the analysis of fault tectonics of promising kimberlite territories on the example of the Nakyn kimberlite field (Western Yakutia)], *Geologicheskoe obespechenie mineral'no-syr'evoi bazy almazov AK "ALROSA": problemy, puti resheniya, innovatsionnye razrabotki i tekhnologii. Aikhal: materialy V polevogo nauchno-prakticheskogo seminar* [Geological support of the ALROSA mineral resource base of diamonds: problems, solutions, innovative developments and technologies. Aikhal: materials of the V field scientific-practical seminar], 2015, pp. 225–227.

### Авторы

#### Проценко Елена Викторовна

кандидат геолого-минералогических наук  
заведующий прогнозно-методологическим отделом  
ProtsenkoEV@alrosa.ru

#### Шахурдина Надежда Константиновна

старший научный сотрудник  
ShakhurdinaNK@alrosa.ru

Научно-исследовательское геологическое предприятие  
(НИГП) АК «АЛРОСА» (ПАО),  
г. Мирный

### Authors

#### Protsenko Elena Viktorovna

PhD  
Head of Department of Forecasting and Methodology  
ProtsenkoEV@alrosa.ru

#### Shakhurdina Nadezhda Konstantinovna

Senior Researcher  
ShakhurdinaNK@alrosa.ru

JSC ALROSA (PJSC)  
Mirny, Russia

## Геолого-геофизические предпосылки выделения перспективных площадей для постановки поисковых работ на коренные месторождения алмазов

### Geological and geophysical criteria as indicators of promising areas for diamond prospecting

Прусакова Н. А., Громцев К. В., Лаптев М. М.

Prusakova N. A., Gromtsev K. V., Laptev M. M.

Показан разработанный комплекс геолого-геофизических предпосылок, рекомендуемый к использованию для локализации площадей при постановке поисковых работ на коренные месторождения алмазов.

Ключевые слова: коренные месторождения алмазов, геолого-геофизические предпосылки, алмазные минерогенические таксоны, субпровинция, минерогеническая зона, кимберлитовые поля, кусы тел, алмазоперспективные площади.

The developed complex of geological and geophysical criteria is shown, which is recommended for use in localizing areas for setting up prospecting works on primary diamond deposits.

Keywords: primary diamond deposits, geological and geophysical criteria, diamondiferous mineragenic taxa, subprovince, mineragenic zone, kimberlite fields, clusters of kimberlite bodies, diamond prospecting areas.

---

Для цитирования: Прусакова Н. А., Громцев К. В., Лаптев М. М. Геолого-геофизические предпосылки выделения перспективных площадей для постановки поисковых работ на коренные месторождения алмазов. Руды и металлы. 2021. № 3. 22–45. DOI: 10.47765/0869-5997-2021-10016.

For citation: Prusakova N. A., Gromtsev K. V., Laptev M. M. Geological and geophysical criteria as indicators of promising areas for diamond prospecting. Ores and metals, 2021, № 3, 22–45. DOI: 10.47765/0869-5997-2021-10016.





В последние годы появилось много работ, в которых показаны нарастающие проблемы в состоянии МСБ алмазов РФ. Это выражается в том, что воспроизводство не восполняет погашение запасов [5]. За последние 20 лет новых значимых месторождений алмазов не выявлено, несмотря на значительные затраты на их поиски, которые проводятся в пределах перспективных площадей, выделенных в разные годы различными организациями. В связи с этим весьма важная задача, направленная на повышение эффективности поисков коренных месторождений алмазов, – повышение достоверности прогноза площадей, перспективных для постановки алмазоперспективных работ.

ФГБУ «ЦНИГРИ» с 80-х гг. прошлого века занимается данной проблемой. В процессе исследований с учётом материалов других организаций и специалистов были разработаны и продолжают развиваться оптимальные комплексы геолого-геофизических критериев и методологические подходы, которые могут использоваться при локализации площадей, перспективных на коренную алмазность. Исследования проводятся в рамках практически общепринятого (с небольшими вариациями) ряда следующих алмазосных (потенциально алмазосных) минерагенических таксонов: провинция – субпровинция – район – поле – куст (группа) тел – тело (трубка, месторождение). В этом иерархически построенном ряду таксоны ранга алмазосных (потенциально алмазосных) поля и куста тел соответствуют площадям, в пределах которых целесообразно проводить поисковые работы, направленные на непосредственное вскрытие алмазосных кимберлитовых тел – коренных месторождений алмазов. Размеры подобных площадей, как правило, составляют от первых сотен до 1,0–2,5 тыс. км<sup>2</sup> (для поля) и от единиц до первых десятков км<sup>2</sup> (для кустов тел). Как показывает практика работ, в зависимости от имеющихся материалов предварительное выделение алмазоперспективных площадей ранга поля может быть осуществлено на стадии работ м-ба 1 : 1 000 000 – 1 : 500 000. Окончательно их локализируют при проведении работ м-ба 1 : 100 000 – 1 : 200 000. На перспективных площадях ранга

потенциально алмазосного поля с оценёнными ресурсами категории Р<sub>3</sub> ставятся собственно поисковые работы. При проведении этих работ выделяются участки ранга кустов (групп) тел. В пределах подобных участков сосредотачиваются работы, направленные на вскрытие алмазосных кимберлитовых тел. Предварительное выделение перспективных площадей ранга куста тел может осуществляться (при наличии соответствующих материалов) при проведении работ м-ба 1 : 100 000 – 1 : 200 000, их окончательное ограничение проводится на стадии работ м-ба 1 : 50 000.

В ходе выполненных исследований установлено, что локализацию алмазоперспективных площадей под постановку поисковых работ рангов поля и куста тел целесообразно проводить в два этапа. На первом перспективные площади выделяются на основе комплекса геолого-геофизических предпосылок – косвенных факторов (критериев), которые являются индикаторами перспективных площадей этих рангов. На втором этапе выполняется разбровка площадей, выделенных по косвенным факторам, на основе имеющихся прямых признаков алмазности в виде ореолов минералов-индикаторов кимберлитов, наличия россыпей алмазов или отдельных их находок с обязательным изучением особенностей формирования ореолов рассеяния и россыпей на предмет их генетической связи с выделенной перспективной площадью. В данной технологической схеме важное значение придаётся первому этапу работ. Именно на нём предварительно определяется позиция и, что самое главное, границы прогнозируемых перспективных на коренную алмазность площадей этих рангов.

*Геолого-геофизические индикационные предпосылки*, которые могут использоваться при выделении перспективных площадей ранга потенциально алмазосных поля и куста тел, разрабатывались (с учётом наработок других организаций и специалистов) в процессе изучения закономерностей размещения в системе современных физико-геологических неоднородностей литосферы (проявленных на различных глубинных уровнях, в аномальных осо-

бенностях геофизических полей, в материалах дистанционных съёмок) известных алмазоносных эталонных объектов.

В качестве эталонных объектов были выбраны разновозрастные и в различной степени алмазоносные поля кимберлитового и родственного ему магматизма, занимающие различную структурно-тектоническую позицию в различных регионах мира (на севере Восточно-Европейской платформы, на Сибирской, юге Африканской, западе Австралийской и северо-западе Северо-Американской платформ). Всего было исследовано 146 эталонных объектов. В процессе изучения закономерностей их локализации были рассмотрены: морфологические особенности основных границ раздела литосферы (её подошва, раздел кора – мантия, поверхность докембрийского кристаллического фундамента и др.); структурно-тектонические особенности кристаллического фундамента и осадочного чехла; термические, скоростные (сейсмические), электрические, плотностные и магнитные характеристики литосферы, отражённые в аномальных особенностях геофизических полей. Исследования проводились эмпирическим методом, при котором сопоставлялись пространственные позиции эталонных объектов и те или иные особенности анализируемых геолого-геофизических данных. В этих исследованиях не рассматривались данные дистанционных съёмок (материалов дистанционного зондирования), поскольку они в полной мере проанализированы в работах Ю. Н. Серокурова с соавторами [18, 19].

Как и любая другая часть иерархически построенной системы (минерагенического ряда алмазоносных таксонов), комплекс предпосылок для прогнозирования площадей ранга алмазоносных (потенциально алмазоносных) поля и кустов тел сочетает в себе разномасштабные индикационные факторы (предпосылки): региональные, присущие вышестоящим в минерагеническом ряду таксонам, и локальные, свойственные для нижестоящих. Так, исходя из практики проведения ГРР, при выделении алмазоперспективных площадей ранга поля на стадии региональных (м-б 1 : 1 000 000 – 1 : 500 000) работ в комплекс применяемых кри-

териев прогнозирования входят геолого-геофизические индикационные предпосылки алмазоносных минерагенических таксонов ранга субпровинции, минерагенической (кимберлитоконтролирующей) зоны и кимберлитового поля. При проведении среднемасштабных поисковых работ учитываются индикационные предпосылки алмазоносных поля и куста тел. В ходе исследований нами установлено, что только совокупность (комплекс) всех этих предпосылок (региональных и локальных) позволяет наиболее достоверно прогнозировать искомые объекты – потенциально алмазоносное кимберлитовое поле и кусты тел в его пределах. Их позиция и границы определяются комплексными областями совмещения на плоскости геолого-геофизических индикационных предпосылок – элементов прогнозно-поисковых моделей этих минерагенических таксонов.

При локализации алмазоперспективных площадей ранга поля и кустов тел на основе геолого-геофизических предпосылок на первом этапе эти индикационные предпосылки выявляются в пределах изучаемой территории и представляются в картографическом виде (отображение в плане, в полигональном виде, пространственной позиции той или иной предпосылки на площади работ). При этом проводятся: сбор, анализ и обобщение различных геолого-геофизических материалов, характеризующих особенности строения различных горизонтов литосферы; обработка и интерпретация геолого-геофизических данных с применением различных компьютерных технологий; построение промежуточных карт, схем, позволяющих с той или иной степенью достоверности выделять какой-либо индикационный фактор.

На втором этапе проводится комплексирование (суммирование) выделенных индикационных предпосылок, которое может осуществляться компьютерным путём (с использованием различных математических аппаратов).

Опыт работ ФГБУ «ЦНИГРИ» [16] показал, что для повышения степени достоверности прогнозных построений в условиях неравномерной или недостаточной геолого-геофизической изученности территорий при выделении и ком-

плексировании (в том числе с использованием различных компьютерных технологий) геолого-геофизических индикационных предположений целесообразно:

- учитывать индикационные предпосылки как самого прогнозируемого минерагенического таксона, так и более региональных (например, для поля – субпровинции и минерагенической зоны), имеющих ограниченное распространение (ограничения в плановом положении) на площади работ;

- учитывать в интегрированном виде (через вводимые при кодировании соответствующие коэффициенты) все полученные из разных источников представления о плановом положении той или иной индикационной предпосылки;

- учитывать те факторы, которые в соответствии с геолого-геофизической изученностью более или менее с одинаковой достоверностью могут быть в картографическом (полигональном) виде выделены на всей площади работ;

- суммировать предпосылки прогнозируемых площадей более высокого ранга в пределах контуров более мелкомасштабного минерагенического таксона.

*Геолого-геофизические индикационные предпосылки, используемые при локализации алмазоперспективных площадей ранга алмазонасного поля.* Под алмазонасным кимберлитовым полем понимается естественная группировка пространственно-сближенных кимберлитовых тел, связанных происхождением с развитием единой вертикальной «стволовой» зоны повышенной проницаемости (флюидно-магматической колонны). Площадь поля составляет обычно от первых сотен км<sup>2</sup> до 2,5 тыс. км<sup>2</sup> [4].

Потенциально алмазонасные кимберлитовые поля прогнозируются в пределах наиболее стабильных блоков литосферы (площадью сотни тысяч км<sup>2</sup>) с областями древней алмазонасной мантии (литосферного корня), не претерпевшими в платформенную эпоху существенной тектоно-термальной переработки, которые в минерагеническом плане отождествляются с алмазонасными (потенциально алмазонасными) субпровинциями. В общепринятом понимании их тектоническими индикаторами

являются крупные геоблоки – кратоны – с возрастом стабилизации фундамента не моложе 2 500 млн лет (правило Клиффорда). Однако следует отметить, что это правило в его современном понимании отражает лишь чисто статистическую зависимость и реализуется в ходе тектонического районирования фундамента платформы. Согласно ему вероятность обнаружения коренных месторождений алмазов более высока в блоках с архейским возрастом консолидации фундамента, чем с нижнепротерозойским. Но стоит подчеркнуть, что сделанный вывод имеет достаточно упрощенный и общий характер. Можно привести целый ряд примеров исключений из правила Клиффорда: и когда архейский блок (кратон) стерилен в отношении коренной алмазонасности (например, блок Йилгарн Западной Австралии или блок Антон провинции Слэйв в Канаде), и когда алмазонасный магматизм проявлен вне архейских кратонов (например, кимберлиты Зимнего берега, лампроиты Аргайла и др.). В то же время изучение закономерностей локализации алмазонасного магматизма в различных алмазонасных провинциях мира позволило установить на уровне эмпирических сравнений ряд факторов (предпосылок), проявленных в глубинном строении и геофизических полях, с которыми пространственно ассоциирует алмазонасный магматизм. Часть из них носит региональный характер и является индикаторами наиболее стабильных на платформенном этапе развития блоков древних платформ, сопоставляемых с алмазонасными субпровинциями. Наиболее распространенные из них приведены в табл. 1 и дополнены материалами, обеспечивающими наиболее достоверное выделение этих региональных предпосылок.

В пределах субпровинций потенциально алмазонасные кимберлитовые (лампроитовые) поля, как правило, приурочены к тектоническим узлам, образованным пересечением различно ориентированных минерагенических (кимберлитоконтролирующих) зон или одной минерагенической зоны с поперечными зонами глубинных разломов. Под кимберлитоконтролирующей зоной понимается линейная (протяжённостью до 500 и более км при ши-



## 1. Геолого-геофизические индикационные предпосылки, определяющие

### 1. Geological and geophysical criteria, which determine the

(1) Индикационные предпосылки	(2) Виды съёмки и материалы, обеспечивающие наиболее достоверное выделение предпосылок
<p><b>Глубинные геофизические, проявленные:</b></p> <p><b>в элементах морфологии подошвы литосферы:</b>  <b>1</b> – области (площадью сотни тыс. км<sup>2</sup>) с глубиной залегания подошвы литосферы 150–200 и более км, (глубина залегания изотермы 1200°, маркирующей подошву литосферы, – 150–200 и более км), в том числе их краевые части – зоны горизонтального градиента</p>	<p>Интерпретационные материалы сейсмической томографии и/или глубинных магнитотеллурических зондирований (МТЗ), и/или геотермических съёмки (геотермического моделирования) и/или сейсмической томографии</p>
<p><b>в элементах морфологии раздела кора – мантия:</b>  <b>2</b> – региональные (площадью от сотен тыс. до 1 млн км<sup>2</sup>) области повышенных глубин залегания поверхности Мохоровичича (раздел кора – мантия), в том числе их краевые части – зоны горизонтального градиента</p>	<p>Интерпретационные материалы (разрезы, схемы, карты) глубинных сейсмических исследований (ГСЗ, ГСЗ-МОВЗ, ТСЗ, КМПВ, МОГТ) и/или глубинных магнитотеллурических зондирований (МТЗ)</p>
<p><b>2а</b> – депрессии (включая их краевые части – зоны горизонтального градиента), осложняющие региональные области с повышенными глубинами залегания поверхности Мохоровичича</p>	<p>Интерпретационные материалы (разрезы, схемы, карты) глубинных сейсмических исследований (ГСЗ, ГСЗ-МОВЗ, ТСЗ, КМПВ, МОГТ) и/или глубинных магнитотеллурических зондирований (МТЗ), желательного с привлечением данных глубокого бурения</p>
<p><b>в элементах морфологии поверхности докембрийского кристаллического фундамента:</b>  <b>3</b> – региональные области (площадью сотни тыс. км<sup>2</sup> и более) относительно пониженных глубин залегания кристаллического фундамента с выходом на поверхность в пределах щитов, в том числе краевые части (зоны горизонтального градиента) областей (в зонах сочленения крупных блоковых поднятий и впадин в рельефе фундамента)</p>	<p>Интерпретационные материалы (разрезы, схемы, карты) глубинных сейсмических исследований (ГСЗ, ГСЗ-МОВЗ, ТСЗ, КМПВ, МОГТ) и/или глубинных магнитотеллурических зондирований (МТЗ), желательного с привлечением данных глубокого бурения</p>
<p><b>в областях с различной мощностью кристаллической коры, которая при необходимости может быть рассчитана как разность абсолютных отметок кровли кристаллического фундамента и кровли верхней мантии:</b>  <b>4</b> – региональные области относительно повышенной мощности кристаллической коры (в том числе их краевые части – зоны горизонтального градиента) площадью сотни тыс. км<sup>2</sup></p>	<p>Интерпретационные материалы глубинных сейсмических исследований (ГСЗ, ГСЗ-МОВЗ, ТСЗ, КМПВ, МОГТ) и/или глубинных магнитотеллурических зондирований (МТЗ), желательного с привлечением интерпретационных данных гравиметрических съёмки</p>
<p><b>4а</b> – участки наиболее мощной кристаллической коры (в том числе краевые части – зоны горизонтального градиента), осложняющие региональные области относительно повышенной мощности</p>	<p>Интерпретационные материалы (разрезы, схемы, карты) глубинных сейсмических исследований (ГСЗ, ГСЗ-МОВЗ, ТСЗ, КМПВ, МОГТ) и/или глубинных магнитотеллурических зондирований (МТЗ), желательного с привлечением данных глубокого бурения</p>

В зависимости от наличия соответствующих интерпретационных материалов используются только предпосылки 2, 2а и 3 или только предпосылки 4 и 4а; при необходимости все эти предпосылки могут дополнять друг друга



## позицию прогнозируемых потенциально алмазоносных субпровинций

position of the projected potential diamondiferous subprovinces

	(3) Эталонные объекты, на которых выполнена апробация предпосылок (с указанием числа объектов, контролируемых той или иной предпосылкой)	(4) Примечания
Промышленно-алмазоносные, слабоалмазоносные и неалмазоносные поля кимберлитов и родственных им пород различного возраста, расположенные в различных регионах мира: в пределах европейской части РФ, восточной части Финляндии, Восточной Сибири, Южной Африки и Канады	В группе эталонных объектов установлено участие данной предпосылки в контроле позиции промышленно-алмазоносных полей следующих возрастов: <i>мезопротерозойского</i> – 3 из 3, <i>неопротерозойского</i> – 2 из 2, <i>неопротерозой-раннепалеозойского</i> – 1 из 1, <i>раннепалеозойского</i> – 4 из 4, <i>среднепалеозойского</i> – 7 из 7, <i>мезозойского</i> – 16 из 16, <i>мезозой-кайнозойского</i> – 1 из 1, <i>кайнозойского</i> – 0 из 2. <b>Всего: 34 объекта из 36</b>	<b>Исключения:</b> промышленно-алмазоносные лампроитовые поля Эллендейл и Калвинярдс (Австралия) <i>кайнозойского</i> возраста
	В группе эталонных объектов установлено участие данной предпосылки в контроле позиции промышленно-алмазоносных полей следующих возрастов: <i>мезопротерозойского</i> – 3 из 3, <i>неопротерозойского</i> – 2 из 2, <i>неопротерозой-раннепалеозойского</i> – 1 из 1, <i>раннепалеозойского</i> – 4 из 4, <i>среднепалеозойского</i> – 7 из 7, <i>мезозойского</i> – 14 из 16, <i>мезозой-кайнозойского</i> – 1 из 1, <i>кайнозойского</i> – 2 из 2. <b>Всего: 34 объекта из 36</b>	В пределах Восточно-Европейской, Сибирской и Северо-Американской платформ для региональных областей относительно повышенных глубин залегания раздела кора – мантия характерны отметки 38–40 и более км, в пределах Австралийской платформы – 35 и более км, в южной части Африкано-Аравийской платформы – 25 и более км. <b>Исключения:</b> промышленно-алмазоносные кимберлитовые поля Свазиленд (Свазиленд) и Джерико (Канада) <i>мезозойского</i> возраста
	В группе эталонных объектов установлено участие данной предпосылки в контроле позиции промышленно-алмазоносных полей следующих возрастов: <i>мезопротерозойского</i> – 2 из 2, <i>неопротерозой-раннепалеозойского</i> – 1 из 1, <i>раннепалеозойского</i> – 3 из 4, <i>среднепалеозойского</i> – 7 из 7, <i>мезозойского</i> – 11 из 16, <i>мезозой-кайнозойского</i> – 0 из 1. <b>Всего: 24 объекта из 31</b>	В пределах Африкано-Аравийской платформы депрессиям свойственны отметки 38–40 и более км, в пределах Восточно-Европейской, Сибирской и Северо-Американской платформ – 40–42 и более км <b>Исключения:</b> промышленно-алмазоносные кимберлитовые поля: <i>раннепалеозойское</i> – Мурова (Зимбабве), <i>мезозойские</i> – Робертс-Виктор, Ягерсфонтейн, Монастери (ЮАР), Свазиленд (Свазиленд), Джерико (Канада), <i>мезозой-кайнозойское</i> – Лак де Гра (Канада)
	В группе эталонных объектов установлено участие данной предпосылки в контроле позиции промышленно-алмазоносных полей следующих возрастов: <i>мезопротерозойского</i> – 2 из 2, <i>раннепалеозойского</i> – 1 из 4, <i>среднепалеозойского</i> – 7 из 7, <i>мезозойского</i> – 15 из 15. <b>Всего: 25 объектов из 28</b>	<b>Исключения:</b> <i>раннепалеозойские</i> промышленно-алмазоносные кимберлитовые поля Ривер Ранч (Зимбабве), Венишия и Оакс (ЮАР)
	В группе эталонных объектов установлено участие данной предпосылки в контроле позиции промышленно-алмазоносных полей следующих возрастов: <i>мезопротерозойского</i> – 2 из 2, <i>раннепалеозойского</i> – 3 из 4, <i>среднепалеозойского</i> – 7 из 7, <i>мезозойского</i> – 10 из 15. <b>Всего: 22 объекта из 28</b>	<b>Исключения:</b> промышленно-алмазоносные кимберлитовые поля: <i>раннепалеозойское</i> – Мурова (Зимбабве), <i>мезозойские</i> – Кимберли, Робертс-Виктор, Ягерсфонтейн, Постмасбург (ЮАР), Лесото (Лесото)
В группе эталонных объектов установлено участие данной предпосылки в контроле позиции промышленно-алмазоносных полей следующих возрастов: <i>мезопротерозойского</i> – 2 из 2, <i>раннепалеозойского</i> – 1 из 4, <i>среднепалеозойского</i> – 7 из 7, <i>мезозойского</i> – 5 из 15. <b>Всего: 15 объектов из 28</b>	<b>Исключения:</b> промышленно-алмазоносные кимберлитовые поля: <i>раннепалеозойские</i> – Мурова (Зимбабве), Ривер Ранч, Оакс (ЮАР), <i>мезозойские</i> – Джваненг (Ботсвана), Кронстад, Монастери, Винбург, Кимберли, Робертс-Виктор, Ягерсфонтейн, Постмасбург (ЮАР), Свазиленд (Свазиленд), Лесото (Лесото)	



1	2
<p><b>Глубинные геофизические, проявленные:</b></p> <p><b>в аномальных особенностях поля теплового потока:</b>  <b>5</b> – области относительно пониженных значений поверхностного теплового потока площадью до 1 млн км<sup>2</sup> (1-го порядка), в том числе их краевые части – зоны горизонтального градиента</p>	
<p><b>5а</b> – области относительно пониженных значений поверхностного теплового потока площадью первые десятки тыс. км<sup>2</sup> (южная часть Африкано-Аравийской платформы) – сотни тыс. км<sup>2</sup> (Восточно-Европейская, Сибирская, Австралийская платформы) 2-го порядка (в том числе их краевые части – зоны горизонтального градиента), осложняющие области 1-го порядка</p>	<p>Интерпретационные материалы тепловых съёмов (схемы, карты)</p>
<p><b>в аномальных особенностях поля силы тяжести (в редукции Буге):</b>  <b>6</b> – области относительно повышенных значений поля силы тяжести (в том числе их краевые части – зоны горизонтального градиента) площадью 100 тыс. км<sup>2</sup> – 1 млн км<sup>2</sup></p>	<p>Карты и цифровые модели аномального поля силы тяжести (в редукции Буге) и его трансформант (региональных, локальных составляющих, горизонтального градиента и др.), составленные по материалам гравиметрических съёмов м-ба 1 : 1 000 000 – 1 : 500 000</p>
<p><b>в аномальных особенностях электрического поля:</b>  <b>7</b> – крупные (до десятков тыс. км<sup>2</sup>) корово-мантийные области высокого (200–600 и более Ом·м) сопротивления</p>	<p>Интерпретационные материалы (разрезы, карты, схемы) региональных профильных глубинных магнитотеллурических зондирований (МТЗ)</p>
<p><b>Геолого-структурные:</b>  <b>8</b> – крупные поднятия в структуре осадочного чехла (антеклизы, седловины), в том числе их краевые части (области сочленения со структурами обратного знака)</p>	<p>Материалы геологических съёмов м-ба 1 : 1 000 000 и крупнее, геоструктурных исследований (в виде геологических, тектонических карт, разрезов) с использованием данных глубокого бурения</p>
<p><b>Магматические:</b>  <b>9</b> – наличие полей кимберлитов и/или родственных им пород и/или трубок взрыва основного состава, синхронных по возрасту кимберлитовому магматизму</p>	<p>Материалы геологических съёмов м-ба 1 : 1 000 000 и крупнее (в виде геологических карт, разрезов) с использованием данных бурения</p>





Окончание табл. 1

	3	4	
Промышленно-алмазоносные, слабоалмазоносные и неалмазоносные поля кимберлитов и родственных им пород различного возраста, расположенные в различных регионах мира:	В пределах европейской части РФ, восточной части Финляндии, Восточной Сибири, Западной Австралии, Южной Африки и Канады	В группе эталонных объектов установлено участие данной предпосылки в контроле позиции промышленно-алмазоносных полей следующих возрастов: <i>мезопротерозойского</i> – 3 из 3, <i>неопротерозойского</i> – 2 из 2, <i>неопротерозой-раннепалеозойского</i> – 1 из 1, <i>раннепалеозойского</i> – 4 из 4, <i>среднепалеозойского</i> – 7 из 7, <i>мезозойского</i> – 15 из 16, <i>мезозой-кайнозойского</i> – 1 из 1, <i>кайнозойского</i> – 0 из 2. <b>Всего: 33 объекта из 36</b>	Для областей относительно пониженных значений поверхностного теплового потока 1-го порядка характерны значения 40 мВт/м <sup>2</sup> и менее в пределах Восточно-Европейской и Сибирской платформ, 60 мВт/м <sup>2</sup> и менее в пределах Австралийской платформы и южной части Африкано-Аравийской платформы <b>Исключения:</b> промышленно-алмазоносное кимберлитовое поле Ягерсфонтейн (ЮАР) <i>мезозойского</i> возраста; промышленно-алмазоносные <i>кайнозойские</i> лампроитовые поля Эллендейл и Калвинярдах (Австралия)
	В пределах европейской части РФ, восточной части Финляндии, Восточной Сибири, Западной Австралии и Южной Африки	В группе эталонных объектов установлено участие данной предпосылки в контроле позиции промышленно-алмазоносных полей следующих возрастов: <i>мезопротерозойского</i> – 2 из 3, <i>неопротерозойского</i> – 0 из 2, <i>раннепалеозойского</i> – 0 из 4, <i>среднепалеозойского</i> – 7 из 7, <i>мезозойского</i> – 8 из 15, <i>кайнозойского</i> – 0 из 2. <b>Всего: 17 объектов из 33</b>	Для областей относительно пониженных значений поверхностного теплового потока 2-го порядка характерны значения 30 мВт/м <sup>2</sup> и менее в пределах Восточно-Европейской и Сибирской платформ, 50 мВт/м <sup>2</sup> и менее в пределах Австралийской платформы и южной части Африкано-Аравийской платформы <b>Исключения:</b> промышленно-алмазоносные кимберлитовые поля: <i>мезопротерозойское</i> – Лерала (Ботсвана), <i>неопротерозойские</i> – Птеропус, Филлипс Рэндж (Австралия), <i>раннепалеозойские</i> – Мурова, Ривер Ранч (Зимбабве), Венишия, Оакс (ЮАР), <i>мезозойские</i> – Гоппе, Орапа (Ботсвана), Марсфонтейн, Кронстад, Робертс-Виктор, Ягерсфонтейн (ЮАР), Лесото (Лесото); промышленно-алмазоносные лампроитовые поля: <i>кайнозойские</i> – Эллендейл и Калвинярдах (Австралия)
	В пределах европейской части РФ, восточной части Финляндии, Восточной Сибири, Южной Африки и Канады	В группе эталонных объектов установлено участие данной предпосылки в контроле позиции промышленно-алмазоносных полей следующих возрастов: <i>мезопротерозойского</i> – 1 из 2, <i>неопротерозой-раннепалеозойского</i> – 0 из 1, <i>раннепалеозойского</i> – 3 из 4, <i>среднепалеозойского</i> – 7 из 7, <i>мезозойского</i> – 1 из 16, <i>мезозой-кайнозойского</i> – 0 из 1. <b>Всего: 12 объектов из 31</b>	Промышленно-алмазоносные кимберлитовые поля, расположенные в областях относительно пониженных значений поля силы тяжести (в том числе в их краевых частях – зонах горизонтального градиента) размером от сотен до 1 млн км <sup>2</sup> : <i>мезопротерозойское</i> – Претория (ЮАР), <i>неопротерозой-раннепалеозойское</i> – Юго-Восточный Слейв (Снэп Лейк) (Канада), <i>раннепалеозойское</i> – Мурова (Зимбабве), <i>мезозойские</i> – Гоппе, Зуве, Орапа (Ботсвана), Марсфонтейн, Рунстербург, Кронстад, Монастери, Винбург, Кимберли, Робертс-Виктор, Ягерсфонтейн, Постмасбург (ЮАР), Свазиленд (Свазиленд), Лесото (Лесото), Джерико (Канада), <i>мезозой-кайнозойское</i> – Лак де Гра (Канада)
	В пределах европейской части РФ, восточной части Финляндии и Восточной Сибири	Установлено, что <b>все</b> промышленно-алмазоносные <i>среднепалеозойские</i> поля европейской части РФ и Восточной Сибири контролируются данными предпосылками	
	В пределах европейской части РФ, восточной части Финляндии, Восточной Сибири, Западной Австралии, Южной Африки и Канады		При наличии указанных проявлений магматизма может учитываться как дополнительный благоприятный фактор



## 2. Геолого-геофизические предпосылки-индикаторы минерагенических (кимберлитоконтролирующих) зон

### 2. Geological and geophysical criteria of mineragenic (kimberlite-controlling) zones

Индикационные предпосылки	Виды съёмки и материалы, обеспечивающие наиболее достоверное выделение предпосылок	
<p><b>Глубинные геофизические, проявленные в особенностях сейсмического разреза:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• наличие линейных прогибов или уступов (градиентных зон) в кровле верхней мантии (по поверхности Мохоровичича);</li> <li>• присутствие в надмантийном горизонте земной коры образований с повышенными скоростными характеристиками <math>V_p</math> (более 7 км/с) и <math>V_p/V_s</math> (более 1,70–1,72);</li> <li>• наличие на отдельных участках инверсионных поднятий внутрикоровых границ К1 и К2</li> </ul>	<p>Интерпретационные данные (карты, схемы, разрезы) глубинных сейсмических исследований (ГСЗ, ГСЗ-МОВЗ, ТСЗ, КМПВ, МОГТ) и/или глубинных магнитотеллурических зондирований (МТЗ)</p>	
<p><b>в аномальных особенностях поля силы тяжести (в редукции Буге):</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• полосовая зонально построенная (в крест простирания) аномалия поля силы тяжести, выраженная сочетанием субпараллельных зон пониженных и повышенных значений или</li> <li>• системы линейных элементов поля силы тяжести (полосовые аномалии повышенных значений, зоны потери коррелятивности аномалий, зоны горизонтального градиента и др.), формирующие протяжённые линейные зоны того или иного простирания, в том числе и субпараллельные простиранию рифтогенных грабенов авлакогенов</li> </ul>	<p>Данные гравиметрических съёмок масштаба 1 : 200 000, представленные в виде карт и цифровых моделей аномального поля силы тяжести в редукции Буге (сечение изоаномал 2 мгл) и его различных трансформант (карт региональных и локальных составляющих различной частотности, горизонтального и полного градиента, анизотропии и т. д.)</p>	
<p><b>в аномальных особенностях магнитного поля:</b></p> <p>системы линейных элементов магнитного поля (линейных локальных аномалий повышенных (в т. ч. «даечного» типа) и пониженных значений, зон потери коррелятивности аномалий, зон горизонтального и вертикального градиентов и др.), формирующие протяжённые линейные зоны того или иного простирания, в том числе и субпараллельные простиранию рифтогенных грабенов авлакогенов</p>	<p>Данные магнитометрических съёмок масштаба 1 : 200 000 – 1 : 50 000 и крупнее, представленные в виде карт и цифровых моделей аномального магнитного поля и его различных трансформант (карт локальных составляющих различной частотности, горизонтального, вертикального и полного градиентов, анизотропии и т. д.)</p>	
<b>Геолого-структурные:</b>		
<p>Плечевая (бортовая) часть рифта или авлакогена – зона, примыкающая к осевому грабену рифта или авлакогена</p> <p>Зона краевых дислокаций, субпараллельная осевой палеорифтовой депрессии и удалённая от последней на расстояние до 150–200 км</p> <p>Региональная зона «секущего» глубинного разлома</p> <p>Зона, сопряжённая с коллизией зоной в структуре кристаллического фундамента</p> <p>Зона, разделяющая литосферные геоблоки, эволюционирующие в различных тектонических режимах</p>	<p>Широкое развитие различных по составу и возрасту магматических образований, формирующих линейные разновозрастные зоны</p> <p>В структуре кристаллического фундамента – широкое развитие сдвиго-надвиговых структур, или сдвиговых разрывных дислокаций, или система субпараллельных кулисообразно расположенных разломов</p> <p>В осадочном чехле – зона повышенной трещиноватости, или система линейных складок, или флексура</p>	<p>Данные:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• геологических съёмок, геоструктурных исследований, бурения (в виде геологических, тектонических карт, разрезов);</li> <li>• морфоструктурного анализа современного рельефа и дешифрирования аэрокосмоматериалов;</li> <li>• интерпретации геофизических съёмок (гравиметрических, магнитометрических, сейсмических и др.) в виде карт и цифровых моделей потенциальных полей, интерпретационных схем, разрезов</li> </ul>

рине от 50 до 100–150 км) глубинная высокопроницаемая структура древнего заложения, неоднократно активизировавшаяся и контролирующая процессы корово-мантийного энерго-массопереноса [4]. Наиболее характерные геолого-геофизические предпосылки-индикаторы минерагенических (кимберлитоконтролирующих) зон и материалы, используемые на региональной стадии работ при их выделении, приведены в табл. 2.

Более локальные геолого-геофизические предпосылки-индикаторы, присущие непосредственно самому алмазонасному (потенциально алмазонасному) полю и выделяемые на фоне рассмотренных выше региональных индикационных факторов, приведены в табл. 3.

Приведённые в табл. 1 и 3 данные, отражающие степень участия той или иной предпосылки в контроле локализации разновозрастных промышленно-алмазонасных полей, позволяют сделать вывод, что значительная часть региональных глубинных геофизических предпосылок являются «сквозными» или устойчивыми. Они в большинстве случаев участвуют в контроле локализации региональных площадей, вмещающих алмазонасные поля независимо от их тектонической позиции и возраста проявленного алмазонасного магматизма. Локальные предпосылки, определяющие позицию непосредственно самого прогнозируемого поля в пределах перспективной региональной площади, являются менее устойчивыми.

*Геолого-геофизические индикационные предпосылки, используемые при локализации алмазоперспективных площадей (участков) ранга куста кимберлитовых алмазонасных тел.* Следует отметить, что общепринятое определение куста кимберлитовых тел, его границ в настоящее время отсутствует. Если обобщить данные разных авторов, занимавшихся этим вопросом, то понятие «куст кимберлитовых тел» можно сформулировать следующим образом: группа сближенных (от 2 до 10) тел, локализованная на участке площадью от единиц до первых десятков км<sup>2</sup> и являющаяся производным локальных промежуточных магматических очагов на фоне единого глубинного очага, присущего кимберлитовому полю в целом [4, 14, 15].

Для магматических тел одного куста характерны однотипные ассоциации глубинных минералов [9]. Кусты кимберлитовых тел, как правило, приурочены к одному разрывному нарушению или к узлу пересечения нескольких разломов, либо контролируются участком коротких субпараллельных кулисообразных трещин. В зависимости от этого в пределах куста кимберлитовые тела располагаются и ориентируются:

- непосредственно вдоль зоны разлома (группа «согласного типа» по В. А. Милашеву);
- по оперяющим основной разлом трещинам отрыва или скола, образующим с ним угол 15–45°;
- вдоль поперечных к основному разлому, ориентированных приблизительно под прямым углом, трещин (группа «несогласного типа»).

Следует отметить, что общепринятых устойчивых (универсальных) индикационных геолого-геофизических предпосылок для куста тел в настоящее время не существует. Внутренняя структура кустов кимберлитовых тел, как и их взаимное расположение, контролируется различными факторами, не имеющими универсального характера, прежде всего из-за разнообразия геологических обстановок. Ряд исследователей вообще отрицает возможность выделения данного минерагенического таксона. Однако при изучении закономерностей локализации магматизма в пределах некоторых алмазонасных полей Якутии и Архангельской области установлены факторы, контролирующие позицию групп (кустов) тел в пределах каждого рассмотренного объекта [1, 2, 3, 7, 8, 10, 11, 12, 13, 17] (Н. Е. Морозова и др., 2016; Н. Н. Романов и др., 1995; Н. И. Горев и др., 2009; Р. Ф. Салихов и др., 2008; М. И. Лелюх, 1988), что было учтено в процессе наших исследований.

В табл. 4 приведены установленные на сегодняшний день геолого-геофизические факторы (предпосылки), участвующие в контроле кустов тел промышленно-алмазонасных полей Архангельской области (Зимнебережный район) и Якутии (Мирнинское, Накынское, Далдынское, Алакит-Мархинское кимберлитовые поля). Здесь же приведены материалы, использованные при выделении данных предпосылок.





### 3. Геолого-геофизические индикационные предпосылки, алмазоносных кимберлитовых полей в пределах

#### 3. Geological and geophysical criteria, which determine the position of the projected

(1) Индикационные предпосылки	(2) Виды съёмки и материалы, обеспечивающие наиболее достоверное выделение предпосылок
<p><b>Глубинные геофизические:</b> <i>Область преобразования (с аномальными свойствами, соизмеримая с размерами, принятыми для поля) мантийно-коровой толщи, связываемая с формированием и развитием здесь гетерогенной кимберлитообразующей системы в составе мантийного диапира, флюидно-магматической колонны, несущей базитовые, базит-гипербазитовые и кимберлитовые расплавы.</i></p> <p><b>Проявлена:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li><b>на интерпретационных сейсмических разрезах:</b> мантийно-коровая интегрированная неоднородность с аномальными сейсмическими параметрами. Может быть проявлена повышенной расчленённостью земной коры с присутствием слоёв с инверсией скоростей (волноводов); аномальностью (по скоростным параметрам, картине отражений и т. п.) по отношению к вмещающим образованиям сейсмического разреза земной коры; наличием локальной депрессии или перегиба (градиентной зоны) в поверхности Мохоровичича</li> </ul>	<p>Материалы региональной профильной сейсморазведки (ГСЗ, ГСЗ-МОВЗ, ТСЗ, МОГТ, КМПВ) – интерпретационные разрезы, схемы</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li><b>в аномальных особенностях поля силы тяжести (в редукции Буге):</b> - приуроченность к периферическим частям (градиентным зонам) положительных среднечастотных (с периодом до 100 км) гравитационных аномалий;</li> </ul>	<p>Карты и цифровые модели аномального поля силы тяжести (в редукции Буге) и его трансформант (региональных, локальных составляющих, горизонтального градиента и др.), составленные по материалам гравиметрических съёмки м-ба 1 : 200 000</p>
<p>- аномальная область на фланге положительной среднечастотной (с периодом до 100 км) гравитационной аномалии, выраженная нарушением структурного плана поля горизонтального градиента и/или снижением уровня поля, осложнённым отдельными малоамплитудными локальными максимумами. Обусловлена (по данным гравитационного моделирования) интегрированной субвертикальной транскоровой гетерогенной системой плотностных неоднородностей (с аномальными по отношению к вмещающим образованиям плотностными параметрами), включает среднекоровое разуплотнение.</p>	<p>Карты и цифровые модели аномального поля силы тяжести (в редукции Буге) и его трансформант (региональных, локальных составляющих – частотные характеристики, градиентные, статистические характеристики и др.), составленные по материалам гравиметрических съёмки м-ба 1 : 200 000 и крупнее; результаты количественной интерпретации, включая гравитационное моделирование</p>
<p><b>В аномальных особенностях магнитного поля:</b> аномальная область, выраженная нарушением общего структурного (аномального) плана поля (Т)а</p>	<p>Карты и цифровые модели аномального магнитного поля и его трансформант (частотные, градиентные, статистические характеристики и др.), составленные по материалам аэромагнитных съёмки м-ба 1 : 200 000 – 1 : 50 000 и крупнее</p>



## определяющие позицию прогнозируемых потенциально потенциально алмазоносных субпровинций

potential diamondiferous kimberlite fields within the potential diamondiferous subprovinces

(3) Эталонные объекты, на которых выполнена апробация предпосылок	(4) Примечания
<p>Промышленно-алмазоносные кимберлитовые поля <i>среднепалеозойского возраста</i>:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Мирнинское, Накынское, Далдынское, Алакит-Мархинское и Верхнемунское – Якутия;</li> <li>• Зимнебережное (в составе Золотицких, Кепинских и Верхотинских с трубкой им. Гриба кимберлитов и родственных им пород) – Архангельская область</li> </ul>	<p>Для промышленно-алмазоносных кимберлитовых полей Якутии отмечено присутствие локализованных максимумов (более 8,6 км/с) граничных скоростей по поверхности Мохоровичича. Зимнебережное (в составе Золотицких, Кепинских и Верхотинских с трубкой им. Гриба кимберлитов и родственных им пород) промышленно-алмазоносное поле Архангельской области приурочено к области, характеризующейся нормальными (8,2 км/с) значениями граничных скоростей вдоль поверхности Мохоровичича</p>
<p>Промышленно-алмазоносные поля: <i>мезо- и неопротерозойского</i> (Южной Африки – кимберлитовые, Западной Австралии – кимберлитовые, лампроитовые), <i>раннепалеозойского</i> (Южной Африки – кимберлитовые), <i>среднепалеозойского</i> (Якутии и Архангельской области – кимберлитовые), <i>мезозойского</i> (Южной Африки – кимберлитовые), <i>кайнозойского</i> (Западной Австралии – лампроитовые) возрастов</p>	<p><b>Исключения</b> – промышленно-алмазоносные кимберлитовые поля: <i>неопротерозойское</i> – Филлипс Рэндж (Австралия) и <i>раннепалеозойское</i> – Мурова (Южная Африка) Для промышленно-алмазоносных полей среднепалеозойского возраста Якутии (Мирнинского, Накынского, Далдынского, Алакит-Мархинского и Верхнемунского) и Архангельской области (Зимнебережного в составе Золотицких, Кепинских и Верхотинских с трубкой им. Гриба кимберлитов и родственных им пород) – приуроченность к периферическим частям (градиентным зонам) остаточных от кристаллической коры положительных среднечастотных (с периодом до 100 км) гравитационных аномалий</p>
<p><b>Промышленно-алмазоносные поля:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• кимберлитовые: <i>среднепалеозойского возраста</i> Якутии (Мирнинское, Накынское, Далдынское, Алакит-Мархинское, Верхнемунское) и Архангельской области (Зимнебережное в составе Золотицких, Кепинских и Верхотинских с трубкой им. Гриба кимберлитов и родственных им пород), <i>неопротерозойского возраста</i> Западной Австралии (Петропус);</li> <li>• лампроитовые: <i>мезопротерозойского возраста</i> Западной Австралии (Восточное с месторождением Аргайл)</li> </ul>	
<p>Промышленно-алмазоносные кимберлитовые поля <i>среднепалеозойского возраста</i> Якутии (Мирнинское, Накынское, Далдынское, Алакит-Мархинское и Верхнемунское) и Архангельской области (Зимнебережное в составе Золотицких, Кепинских и Верхотинских с трубкой им. Гриба кимберлитов и родственных им пород)</p>	<p>Для Зимнебережного промышленно-алмазоносного поля Архангельской области – выражена повышением среднего уровня поля (на 1,5–2,0 нТл), на фоне которого выделяются отдельные максимумы близизометрической и вытянутой форм; Золотицкие (с месторождением им. Ломоносова), Кепинские и Верхотинские (с месторождением им. Гриба) кимберлиты и родственные породы ограничены пределами региональных максимумов поля. Для промышленно-алмазоносных полей Якутии по данным количественной интерпретации – выражена депрессией расчётной магнитоактивной поверхности (связываемой с размагничиванием до глубин порядка 5 км пород фундамента), осложнённой высокочастотными положительными аномалиями, в том числе так называемого даечного типа</p>



1	2
<p><b>Глубинные геофизические:</b> <i>Область преобразования (с аномальными свойствами, соизмеримая с размерами, принятыми для поля) мантийно-коровой толщи, связываемая с формированием и развитием здесь гетерогенной кимберлитобразующей системы в составе мантийного диапира, флюидно-магматической колонны, несущей базитовые, базит-гипербазитовые и кимберлитовые расплавы.</i></p> <p><b>Проявлена:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>в аномальных особенностях электрического поля:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- приуроченность к крупным (до десятков тыс. км<sup>2</sup>) корово-мантийным областям высокого (200–600 и более Ом·м) сопротивления;</li> <li>- в пределах корово-мантийной области высокого сопротивления позицию поля определяет субвертикальная мантийно-коровая геоэлектрическая неоднородность (или группа сближенных локальных субвертикальных геоэлектрических неоднородностей) с пониженными (десятки Ом·м) значениями удельного электрического сопротивления (с повышенной проводимостью);</li> </ul> </li> </ul>	<p>Интерпретационные материалы (разрезы, карты, схемы) региональных профилейных глубинных магнитотеллурических зондирований (МТЗ)</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- наличие локальных геофизических аномалий (магнитных, электрических) «трубочного» типа.</li> </ul>	<p>Интерпретационные материалы аэро и наземных геофизических (магнитометрических, электроразведочных) съёмки м-ба 1 : 25 000 – 1 : 10 000 и крупнее</p>
<p><b>Геолого-структурные:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- приуроченность к тектоническим узлам, образованным пересечением различно ориентированных минерагенических (кимберлитоконтролирующих) зон или одной минерагенической зоны с секущими зонами тектоно-магматической активизации, зонами поперечных к рифтогенным структурам глубинных разломов, активизированными на момент внедрения кимберлитов</li> </ul>	<p>Данные геологических съёмок м-ба 1 : 1 000 000 – 1 : 200 000, геоструктурных исследований (в виде геологических, тектонических карт, разрезов), дешифрирования аэро- космоснимков и/или интерпретационные данные геофизических съёмок: региональных глубинных сейсмических (ГСЗ, ГСЗ-МОВЗ, ТСЗ, МОГТ, КМПВ), и/или глубинных магнитотеллурических зондирований (МТЗ), и/или гравиметрических м-ба 1 : 200 000 и крупнее, и/или магнитометрических м-ба 1 : 200 000 и крупнее</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>в поверхности кристаллического фундамента:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- наличие участка (соизмеримого с размерами, принятыми для поля) нарушения структурного плана положительной структуры или приуроченность к локальным положительным структурам (их периферическим частям)</li> </ul> </li> </ul>	<p>Материалы геологических съёмок м-ба 1 : 1 000 000 – 1 : 200 000, геоструктурных исследований (в виде геологических, тектонических карт, разрезов) с использованием данных глубокого бурения и/или интерпретационные данные региональных глубинных сейсмических (ГСЗ, ГСЗ-МОВЗ, ТСЗ, МОГТ, КМПВ) съёмки и/или глубинных магнитотеллурических зондирований (МТЗ)</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>в рудовмещающей (кимберлитовмещающей) толще осадочного чехла:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- участок (соизмеримый с размерами, принятыми для поля) нарушения структурного плана в пределах и/или на периферии более региональной положительной структуры (выражен малоамплитудной депрессией, осложнённой более мелкими малоамплитудными положительными и отрицательными структурами);</li> <li>- область с повышенной остаточной мощностью кимберлитовмещающих пород</li> </ul> </li> </ul>	<p>Данные геолого-структурного анализа осадочного чехла; литолого-фациального анализа основных терригенных горизонтов дочетвертичных пород (с воссозданием палеогеографических условий их формирования) м-ба 1 : 200 000 (с использованием данных геологического картирования и бурения)</p>





Продолжение табл. 3

3	4
<p>Промышленно-алмазоносные кимберлитовые поля <i>среднепалеозойского возраста</i> Якутии (Мирнинское, Накынское, Далдынское, Алакит-Мархинское и Верхнемунское) и Архангельской области (Зимнебережное в составе Золотицких, Кепинских и Верхотинских с трубкой им. Гриба кимберлитов и родственных им пород)</p>	<p>За пределами крупных высокоомных блоков промышленно-алмазоносных полей в настоящее время не выявлено, но встречаются слабоалмазоносные кимберлитовые поля различного возраста, приуроченные к субвертикальным коровым проводящим неоднородностям</p>
<p>Промышленно-алмазоносные кимберлитовые поля <i>среднепалеозойского возраста</i> Якутии, Архангельской области</p>	<p><i>При наличии указанных локальных геофизических аномалий может учитываться как дополнительный благоприятный фактор</i></p>
<p>Промышленно-алмазоносные <i>разновозрастные</i> кимберлитовые и лампроитовые поля Якутии, Архангельской области, Западной Австралии, Канады</p>	<p>Для промышленно-алмазоносных полей Якутии – узлы пересечения отдельных ветвей кимберлитоконтролирующих зон (Вилуй-Мархинской, Далдыно-Оленёнской) с секущими тектоно-магматическими зонами (их краевыми или выклинивающимися частями), представляющими собой рифтоподобные структуры, развивающиеся (ответвляющиеся) из авлакогенных структур</p>
<p>Промышленно-алмазоносные кимберлитовые поля <i>среднепалеозойского возраста</i> Якутии и Архангельской области</p>	<p>Применяются в условиях частей древних платформ, перекрытых осадочным чехлом (плитных частей)</p>
<p>Промышленно-алмазоносные кимберлитовые поля <i>среднепалеозойского возраста</i> Якутии (Мирнинское, Накынское, Далдынское, Алакит-Мархинское)</p>	

1	2
<p><b>Геолого-структурные:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>положительная морфоструктура с радиально-концентрическим строением размером в поперечнике ~ 80–100 км (входящая в единую систему более региональных радиально-кольцевых структур), связанная с очагом тектоно-магматической активизации в нижней (на глубине 20–40 км) части земной коры;</li> <li>наличие блока с изотропной ориентировкой трещиноватости</li> </ul>	<p>Данные морфоструктурного анализа современного рельефа и речной сети; дешифрирования аэро-, космоматериалов среднего разрешения</p>
<p><b>Магматические:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>области, характеризующиеся существенным сокращением мощности пластовых тел раннетриасовых долеритов, интрузирующих нижнепалеозойские кимберлитовмещающие породы;</li> <li>наличие тел (трубок, даек, жил) кимберлитов и/или родственных им пород и/или трубок взрыва основного состава, синхронных по возрасту кимберлитовому магматизму</li> </ul>	<p>Материалы геологических съёмок м-ба 1 : 200 000, геоструктурных исследований (в виде геологических разрезов) с использованием данных бурения, интерпретационные данные сейсмических (МОВ и др.) съёмок</p> <p>Материалы геологических съёмок м-ба 1 : 200 000 и крупнее (в виде геологических карт, разрезов) с использованием данных бурения</p>

#### 4. Геолого-геофизические индикационные прогнозируемых кустов кимберлитовых тел в пределах

##### 4. Geological and physical indicative prerequisites that determine the position of

(1) Индикационные предпосылки	(2) Виды съёмки и материалы, обеспечивающие наиболее достоверное выделение предпосылок
<p><b>Глубинные геофизические, проявленные в аномальных особенностях поля силы тяжести:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>сочетание в плане малоамплитудных положительных аномалий эффективной плотности или локальных составляющих поля силы тяжести (размером в поперечнике до первых десятков км и менее), обусловленных (по данным гравитационного моделирования) гравитирующими объектами, расположенными на глубине в первые км (с выходом на поверхность кристаллического фундамента), интерпретируемыми как погребённые верхнекоровые ареалы базит-гипербазитового магматизма; отрезков секущих зон нарушения структурного плана локальных гравитационных аномалий или отрезков зон горизонтального градиента локальной составляющей поля силы тяжести, интерпретируемых как зоны повышенной проницаемости кристаллического фундамента;</li> <li>линейные зоны повышенного градиента и/или слабо интенсивных (до первых мгл) положительных локальных аномалий, характеризующие зоны кимберлитоконтролирующих разломов, определяющих позицию кустов тел</li> </ul>	<p>Карты и цифровые модели аномального поля силы тяжести (в редукции Буге) и его трансформант (локальных составляющих, горизонтального градиента и др.), составленные по материалам гравиметрических съёмок м-ба 1 : 200 000 – 1 : 50 000 и крупнее; результаты количественной интерпретации (с использованием компьютерных технологий), включая гравитационное моделирование</p>



Окончание табл. 3

3	4
Промышленно-алмазоносные <i>разно-возрастные</i> кимберлитовые и лампроитовые поля Якутии, Архангельской области, Западной Австралии, Южной Африки, Канады	
Промышленно-алмазоносные <i>разно-возрастные</i> кимберлитовые и лампроитовые поля Якутии, Архангельской области	<i>Может учитываться как дополнительный благоприятный фактор</i>
Промышленно-алмазоносные <i>разно-возрастные</i> кимберлитовые и лампроитовые поля Якутии	<i>При наличии трапповых образований может учитываться как дополнительный благоприятный фактор</i>
Промышленно-алмазоносные <i>разно-возрастные</i> кимберлитовые и лампроитовые поля Якутии, Архангельской области	<i>При наличии указанных проявлений магматизма может учитываться как дополнительный благоприятный фактор</i>

### предпосылки, определяющие позицию потенциально алмазоносных кимберлитовых полей

the predicted kimberlite field clusters in the size of diamondiferous kimberlite field

(3) Эталонные объекты, на которых выполнена апробация предпосылок	(4) Примечания
Группы тел Зимнебережного (выделенного по геофизическим данным и включающего Золотицкие с месторождением им. Ломоносова, Кепинские и Верхотинские с месторождением им. Гриба кимберлиты и родственные им породы) промышленно-алмазоносного кимберлитового поля среднепалеозойского возраста (Архангельская область)	
Кусты тел Мирнинского и Накынского промышленно-алмазоносных полей среднепалеозойского возраста (Якутия)	<b>В Мирнинском промышленно-алмазоносном поле в узлах пересечения зон кимберлитоконтролирующих разломов (определяющих позицию кустов тел) с кимберлитовмещающими разломами отмечено понижение амплитуды гравитационных аномалий</b>





1	2
<p><b>в аномальных особенностях магнитного поля:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>сочетание в плане положительных аномалий эффективной намагниченности или локальных составляющих магнитного поля (размером до первых десятков км и менее, интенсивностью до сотен нТл), обусловленных (по данным аналитических расчётов) магнитовозмущающими объектами, расположенными в верхних (с выходом на поверхность кристаллического фундамента) горизонтах земной коры, интерпретируемых как верхнекоровые ареалы базит-гипербазитового магматизма; по данным съёмов м-ба 1 : 25 000 – 1 : 5 000 – узких (шириной первые и менее км) зон локальных магнитных аномалий или остаточных аномалий распределения эффективной намагниченности, носящих секущий характер по отношению к общему структурному плану магнитного поля, сформированных магнитными образованиями, расположенными (по данным аналитических расчётов) в осадочном чехле, и интерпретируемых как зоны повышенной проницаемости, унаследованно проявленные в осадочном чехле;</li> </ul>	<p>Карты и цифровые модели аномального магнитного поля и его трансформант (частотные, градиентные характеристики), составленные по материалам аэромагнитных съёмов м-ба 1 : 200 000 – 1 : 50 000 – 1 : 25 000 и крупнее; результаты количественной интерпретации (с использованием компьютерных технологий)</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>приуроченность к зонам линейных положительных аномалий (интенсивностью от первых десятков до первых сотен нТл) так называемого даечного типа, характеризующим зоны кимберлитоконтролирующих разломов, определяющих позицию кустов тел</li> </ul>	<p>Карты и цифровые модели аномального магнитного поля и его трансформант (частотные, градиентные характеристики), составленные по материалам аэромагнитных съёмов м-ба 1 : 25 000 – 1 : 10 000 и крупнее</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>наличие локальных магнитных аномалий «трубчатого» типа</li> </ul>	<p>Интерпретационные материалы аэро- и наземных магнитометрических съёмов м-ба 1 : 25 000 – 1 : 10 000 и крупнее</p>
<p><b>Глубинные геофизические, проявленные:</b></p> <p><b>в аномальных особенностях электрического поля:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>приуроченность к линейным зонам повышенной электропроводности, интерпретируемым как зоны повышенной проницаемости осадочного чехла;</li> </ul>	<p>Интерпретационные данные электроразведочных (аэро- и наземных различных модификаций) съёмов м-ба 1 : 25 000 и крупнее</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>приуроченность к локальным субвертикальным сквозькоровым проводящим неоднородностям (с удельным электрическим сопротивлением десятки Ом·м на фоне сотен и более Ом·м);</li> </ul>	<p>Интерпретационные материалы (карты, разрезы) глубинных магнитотеллурических зондирований (МТЗ)</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>приуроченность к связываемым с кимберлитовмещающим разломом: <ul style="list-style-type: none"> <li>границе резкого изменения фазы импеданса электромагнитного поля на низких (10–20 Гц) частотах</li> <li>и/или</li> <li>проводящей зоне на плане фазы импеданса на высоких частотах;</li> </ul> </li> </ul>	<p>Интерпретационные материалы электроразведочных работ методом АМТЗ</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>наличие локальных электрических аномалий «трубчатого» типа</li> </ul>	<p>Интерпретационные материалы аэро- и наземных электроразведочных съёмов м-ба 1 : 25 000 – 1 : 10 000 и крупнее</p>



Продолжение табл. 4

3	4
<p>Группы тел Зимнебережного (выделенного по геофизическим данным и включающего Золотицкие с месторождением им. Ломоносова, Кепинские и Верхотинские с месторождением им. Гриба кимберлиты и родственные им породы) промышленно-алмазоносного кимберлитового поля среднепалеозойского возраста (Архангельская область)</p>	<p>Отдельные тела и группы тел <b>Зимнебережного поля</b> локализируются в узлах пересечения различно ориентированных зон повышенной проницаемости осадочного чехла, проявленных в магнитном поле обозначенными характеристиками</p>
<p>Кусты тел Мирнинского и Накынского промышленно-алмазоносных полей среднепалеозойского возраста (Якутия)</p>	<p><b>В Мирнинском промышленно-алмазоносном поле</b> в узлах пересечения зон кимберлитоконтролирующих разломов (определяющих позицию кустов тел) с поперечными к ним (кимберлитовмещающими) разломами отмечено понижение амплитуды магнитных аномалий смещение или изгибы их осей <b>В Накыньском промышленно-алмазоносном поле</b> кимберлитовмещающий Диагональный разлом, определяющий здесь позицию Дяхтарского куста, отмечается слабо интенсивной фрагментарной (неярко проявленной) линейной аномалией, выделяемой в аномальных особенностях различных трансформант (частотные, градиентные характеристики)</p>
<p>Промышленно-алмазоносные кимберлитовые поля среднепалеозойского возраста Якутии и Архангельской области</p>	<p><i>При наличии указанных локальных магнитных аномалий «трубчатого» типа может учитываться как дополнительный благоприятный фактор</i></p>
<p>Группы тел Зимнебережного (выделенного по геофизическим данным и включающего Золотицкие с месторождением им. Ломоносова, Кепинские и Верхотинские с месторождением им. Гриба кимберлиты и родственные им породы) промышленно-алмазоносного кимберлитового поля среднепалеозойского возраста (Архангельская область)</p>	<p>Отдельные тела и группы тел <b>Зимнебережного поля</b> локализируются в узлах пересечения различно ориентированных зон повышенной проницаемости осадочного чехла, проявленных в электрическом поле обозначенными характеристиками</p>
<p>Золотицкие кимберлиты с месторождением им. Ломоносова и промышленно-алмазоносная трубка им. Гриба Зимнебережного (выделенного по геофизическим данным) промышленно-алмазоносного поля Архангельской области; кусты тел Мирнинского, Накынского (Параллельный и Дяхтарский соответственно), Далдынского и Алакит-Мархинского промышленно-алмазоносных полей Якутии</p>	<p><b>В Мирнинском (Западный куст), Далдыньском (в районе тр. Зарница) и Алакит-Мархинском (в районе тр. Юбилейная) промышленно-алмазоносных полях Якутии</b> некоторые кусты тел приурочены к участку сочленения проводящей субвертикальной сквозькоревой неоднородности с высокоомным блоком земной коры</p>
<p>Дяхтарский куст тел Накынского промышленно-алмазоносного поля Якутии</p>	<p>Фактор установлен при проведении опытно-методических электроразведочных работ в пределах Накыньского поля</p>
<p>Промышленно-алмазоносные кимберлитовые поля среднепалеозойского возраста Якутии и Архангельской области</p>	<p><i>При наличии указанных локальных электрических аномалий «трубчатого» типа может учитываться как дополнительный благоприятный фактор</i></p>



1	2
<p><b>в особенностях сейсмического разреза:</b> в верхней части сейсмических разрезов на глубинах, соответствующих кимберлитовмещающим породам, наличие грабенообразных структур сложной морфологии (шириной до 4 км, амплитудой до 100 м), участков нарушения корреляции (прослеживаемости) отражающих границ, интенсивных явлений дифракции сейсмических волн, характеризующих отдельные разломы в составе региональной минерагенической зоны, контролирующей позицию кимберлитового поля</p>	<p>Интерпретационные материалы площадной средне- крупномасштабной (расстояние между профилями 4 и 0,5–2 км соответственно) высокочастотной и среднечастотной сейсморазведки МОВ-ОГТ</p>
<p><b>Геолого-структурные:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• приуроченность к участкам с относительно повышенной мощностью кимберлитовмещающих пород;</li> <li>• приуроченность к линейным тектоническим зонам, в ряде случаев сопряжённым с депрессиями различной морфологии, проявленными в верхних горизонтах кимберлитовмещающих пород и по возрасту синхронных с проявлениями кимберлитового магматизма (в перекрывающих отложениях депрессии не фиксируются)</li> </ul>	<p>Данные детального палеотектонического анализа (с детальным стратиграфическим расчленением кимберлитовмещающих отложений) с использованием результатов бурения в комплексе с ГИС и/или интерпретационных материалов сейсморазведки МОВ-ОГТ</p>
<p><i>в кровле кимберлитовмещающих пород</i> приуроченность:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• к крутым склонам и периклинальным окончаниям валообразных осложнений шириной и протяжённостью первые км; или</li> <li>• к линейной (субмеридиональной) совокупности мульд проседания в околотрубочном пространстве;</li> </ul> <p><i>в перекрывающих кимберлиты осадочных толщах</i> приуроченность:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• к конседиментационным нарушениям, устанавливаемым по осям палеодолин и резким перепадам мощностей, перекрывающих отложений (урзугская свита); или</li> <li>• к паре сближенных (до расстояния 1 км) разломов субмеридионального простирания с грабенообразным понижением (на 20–30 м) внутри, фиксируемых по подошве перекрывающих (урзугской свиты) отложений</li> </ul>	<p>Данные геолого-структурного анализа осадочного чехла м-ба 1 : 100 000–1 : 5 000</p>
<p><b>Магматические:</b> наличие тел (трубок, даек, жил) кимберлитов и/или родственных им пород и/или трубок взрыва основного состава, синхронных по возрасту кимберлитовому магматизму</p>	<p>Материалы геологических съёмок м-ба 1 : 200 000 и крупнее (в виде геологических карт, разрезов) с использованием данных бурения</p>





Окончание табл. 4

3	4
<p>Кусты тел Мирнинского, Накынского, Далдынского и Алакит-Мархинского промышленно-алмазоносных полей среднепалеозойского возраста (Якутия)</p>	<p><b>В Мирнинском промышленно-алмазоносном поле Якутии</b> отмеченные грабенообразные структуры, проявленные в верхней части разреза (на глубинах, соответствующих кровле мирнинской свиты среднего кембрия), непосредственно определяют позицию кустов тел (Западного и Параллельного). При этом для Западного куста на глубинах, соответствующих нижней части разреза осадочного чехла, отмечается слабовыраженный прогиб в картине отражений.</p> <p><b>В Накынском промышленно-алмазоносном поле Якутии</b> Дяхтарский куст кимберлитовых тел занимает секущее положение по отношению к отмеченным грабенообразным структурам. Диагональный кимберлитовмещающий разлом, определяющий позицию данного куста, отмечается одиночными разрывами, флексуобразными перегибами сейсмоотражающих границ на глубинах, соответствующих нижнепалеозойским кимберлитовмещающим породам в верхней части осадочного чехла.</p>
<p>Кусты тел Мирнинского, Накынского, Далдынского и Алакит-Мархинского промышленно-алмазоносных полей среднепалеозойского возраста (Якутия)</p>	<p>Для более достоверного выделения указанных предпосылок требуется густая сеть (порядка <math>(4 \times 2) - (2 \times 1)</math> км) буровых скважин.</p> <p><b>В Мирнинском промышленно-алмазоносном поле Якутии</b> кимберлитовые тела Западного и Параллельного кустов локализованы в пределах линейных прогибов (грабенообразных структур), сопровождающих одноимённые разломы в составе Виллой-Мархинской минерагенической зоны. Центральные части прогибов трассируются слепыми дайками долеритов. Позицию отдельных трубок определяют скрытые разломы северо-западного простирания, оперяющие зоны Западного и Параллельного разломов. В структуре кимберлитовмещающих и перекрывающих пород эти разломы не проявлены и за пределы грабенов в карбонатном цоколе не трассируются. Некоторые месторождения алмазов (тр. Интернациональная, им. XXIII съезда КПСС) находятся за пределами осевой части грабенообразной структуры. Слабоалмазоносные тела (тр. Таежная, Амакинская и др.) тяготеют к осевой части этой структуры.</p> <p><b>В Накынском промышленно-алмазоносном поле Якутии</b> Дяхтарский куст кимберлитовых тел и Диагональный разлом, определяющий его позицию, занимают секущее положение по отношению аналогичным грабенообразным структурам. Дяхтарский куст приурочен к малоамплитудной мульде в структуре нижнепалеозойских пород.</p>
<p>Группы кимберлитовых тел Зимнебережного (выделенного по геофизическим данным) промышленно-алмазоносного поля Архангельской области</p>	
<p>Промышленно-алмазоносные разновозрастные кимберлитовые и лампроитовые поля Якутии, Архангельской области</p>	<p><i>При наличии указанных проявлений магматизма может учитываться как дополнительный благоприятный фактор</i></p>

При локализации алмазоперспективных площадей ранга поля и куста тел в каком-либо регионе приведённый выше перечень индикационных предпосылок этих таксонов может быть сокращён (в зависимости от геолого-геофизической изученности района исследований) или дополнен (с учётом вновь полученных данных по закономерностям локализации алмазоносного магматизма). Достоверность выполненного прогноза зависит от степени изученности площади работ теми или иными геологическими и геофизическими съёмками.

Геолого-геофизические предпосылки рассмотренные как индикаторы алмазоперспективных площадей, были использованы ФГБУ «ЦНИГРИ» при проведении прогнозно-минералогического районирования различных масштабов (1 : 2 500 000 – 1 : 100 000) территорий Восточно-Европейской и Сибирской платформ, а

также при проведении поисковых работ на алмазы. В частности, успешный опыт их применения был изложен в статье Ю. К. Голубева с соавторами [6]. В ней показано, что выделение локальных участков, перспективных на вскрытие кимберлитовых тел, позволяет сосредоточить поисковые работы в пределах конкретных наиболее перспективных участков, что резко повышает эффективность ГРП на алмазы.

Изложенный в данной статье комплекс геолого-геофизических индикационных предпосылок, рекомендуемых при локализации поисковых площадей на коренную алмазоносность, в концентрированном виде вошёл в состав Проекта Методических указаний по проведению алмазопоисковых работ в сложных поисковых обстановках, который подготовлен по заказу Роснедр и представлен в отчётах ФГБУ «ЦНИГРИ» за 2019 и 2020 гг.

## Список литературы

1. Бессмертный С. Ф., Поспеева Е. В., Овчинникова О. И. Изучение особенностей строения консолидированной коры Далдыно-Алакитского района по данным региональной сейсморазведки МОВ-ОГТ и электроразведки МТЗ // Проблемы прогнозирования и поисков месторождений алмазов на закрытых территориях. – Якутск : ЯНЦ СО РАН. – 2008. – С. 55–62.
2. Биезайс Я. Я., Караев Н. А., Лебедкин П. А. Региональная сейсморазведка МОВ-ОГТ при решении прогнозно-поисковых задач на алмазы // Геология алмаза – настоящее и будущее (геологи к 50-летию юбилею г. Мирный и алмазодобывающей промышленности России). – Воронеж : ВГУ, 2005. – С. 1111–1123.
3. Биланенко В. А., Балакшин Г. Д., Побережский В. А., Ушаков В. М. Структурно-тектонические критерии размещения кимберлитовых полей в южной части Якутской провинции // Геология, петрография и геохимия магматических образований северо-востока Сибирской платформы. – Якутск : ЯФ СО АН СССР, 1976. – С. 5–11.
4. Ваганов В. И. Алмазные месторождения России и мира (Основы прогнозирования). – М. : Геоинформмарк, 2000. – 371 с.
5. Голубев Ю. К., Гаранин К. В., Кошкарёв Д. А., Голубева Ю. Ю., Шахурдина Н. К. Состояние и перспективы развития минерально-сырьевой базы алмазов России // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. – 2020. – № 6. – С. 1–9.
6. Голубев Ю. К., Прусакова Н. А., Лукьянова Л. И. Опыт выявления возможных коренных источников алмазных россыпей Арктической зоны Якутии // Отечественная геология. – 2017. – № 1. – С. 54–67.
7. Горев Н. И., Герасимчук А. В., Проценко Е. В., Толстов А. В. Тектонические аспекты строения Вилюйско-Мархинской зоны, их использование при прогнозировании кимберлитовых полей // Наука и образование. – 2011. – № 3. – С. 5–10.
8. Горев Н. И., Проценко Е. В. Тектонические особенности размещения кимберлитовых тел и их использование при прогнозировании (на примере кимберлитовых полей Западной Якутии) // Руды и металлы. – 2017. – № 4. – С. 62–69.
9. Илупин И. П., Ваганов В. И., Прокопчук Б. И. Кимберлиты. – М. : Недра, 1990. – 248 с.
10. Костровицкий С. И., Яковлев Д. А., Альимова Н. В. Кимберлитовый вулканизм Якутской провинции – тектонический контроль, мантийные источники // Вулканизм и геотектоника. Материалы IV Всероссийского симпозиума по вулканологии и палеовулканологии. Том 1. – Петропавловск-Камчатский, 2009. – С. 381–384.



11. Потехина И. А., Маковчук И. В., Гладков А. С. Разрывная тектоника месторождения трубка «Комсомольская» // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2008. – № 4 (36). – С. 25–31.
12. Потехина И. А. Разломно-блоковое строение и кимберлитовые тела Алаakit-Мархинского алмазонасного поля (тектонифизический анализ) : специальность 25.00.03 «Геотектоника и геодинамика» : автореф. дис. на соискание учёного степеней. канд. геол.-минерал. наук / Потехина Инна Александровна. – Иркутск : ИЗК СО РАН, 2010. – 163 с.
13. Потуроев А. А. О трещинно-разрывной тектонике Далдыно-Алаakitского района // Магматические образования северо-востока Сибирской платформы. – Якутск : ЯФ СО АН СССР, 1975. – С. 57–72.
14. Прусакова Н. А. Геолого-геофизическая прогноз-поисковая модель Зимнебережного кимберлитового поля : специальность 25.00.11 «Геология, поиски и разведка твёрдых полезных ископаемых, минерагения» : автореф. дис. на соискание учёного степеней. канд. геол.-минерал. наук / Прусакова Наталья Александровна. – М., 2004. – 167 с.
15. Прусакова Н. А. Глубинная структура Зимнебережного кимберлитового поля, Архангельская область // Руды и металлы. – 2006. – № 2. – С. 53–64.
16. Прусакова Н. А. Локализация площадей под поисковые работы на основе геолого-геофизических предпосылок коренной алмазонасности // Эффективность геологоразведочных работ на алмазы: прогнозно-ресурсные, методические, инновационно-технологические пути её повышения. Материалы V Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, посвященной 50-летию Алмазной лаборатории ЦНИГРИ – НИГП АК «АЛРОСА» (ПАО). – Мирный, 2018. – С. 152–156.
17. Прусакова Н. А. Принципы выделения локальных участков ранга куста кимберлитовых трубок на основе структурно-геофизического районирования // Эффективность прогнозирования и поисков месторождений алмазов: прошлое, настоящее и будущее (Алмазы-50). – Санкт-Петербург, 2004. – С. 272–274.
18. Серокуров Ю. Н., Калмыков В. Д., Зуев В. М. Дистанционный прогноз кимберлитового магматизма. – М. : Триумф, 2017. – 312 с.
19. Серокуров Ю. Н., Калмыков В. Д., Зуев В. М. Космические методы при прогнозе и поисках месторождений алмазов. – М. : Недра-Бизнесцентр, 2001. – 198 с.

## References

1. Bessmertnyi S. F., Pospeeva E. V., Ovchinnikova O. I. Izuchenie osobennosti stroeniya konsolidirovannoi kory Daldyno-Alakitskogo raiona po dannym regional'noi seismorazvedki MOV-OGT i elektro-razvedki MTZ [Study of the structural features of the consolidated crust of the Daldyn-Alakit region according to the regional seismic survey MOV-CDP and electrical exploration MTZ], *Problemy prognozirovaniya i poiskov mestorozhdenii almazov na zakrytykh territoriyakh* [Problems of forecasting and prospecting for diamond deposits in closed areas], Yakutsk, YaNTs SO RAN Publ., 2008, pp. 55–62.
2. Biezais Ya. Ya., Karaev N. A., Lebedkin P. A. Regional'naya seismorazvedka MOV-OGT pri reshenii prognozno-poiskovykh zadach na almazy [Regional seismic survey MOV-CDP in solving forecasting and prospecting problems for diamonds], *Geologiya almaza – nastoyashchee i budushchee (geologi k 50-letnemu yubileyu g. Mirniy i almazodobyvayushchei promyshlennosti Rossii)* [Geology of diamond – the present and the future (geologists for the 50th anniversary of Mirny and the diamond mining industry of Russia)], Voronezh, VGU Publ., 2005, pp. 1111–1123.
3. Bilanenko V. A., Balakshin G. D., Poberezhskii V. A., Ushakov V. M. Strukturno-tektonicheskie kriterii razmeshcheniya kimberlitovykh polei v yuzhnoi chasti Yakutskoi provintsii [Structural-tectonic criteria for the location of kimberlite fields in the southern part of the Yakutsk province], *Geologiya, petrografiya i geokhimiya magmaticheskikh obrazovaniy severo-vostoka Sibirskoi platformy* [Geology, petrography and geochemistry of magmatic formations in the north-east of the Siberian platform], Yakutsk, YaF SO AN SSSR Publ., 1976, pp. 5–11.
4. Vaganov V. I. Almaznye mestorozhdeniya Rossii i mira (Osnovy prognozirovaniya) [Diamond Deposits in Russia and the World (Forecasting Basics)], Moscow, Geoinformmark Publ., 2000, 371 p.



5. Golubev Yu. K., Garanin K. V., Koshkarev D. A., Golubeva Yu. Yu., Shakhurdina N. K. Sostoyanie i perspektivy razvitiya mineral'no-syr'evoi bazyalmazov Rossii [State and prospects of development of the mineral resource base of diamonds in Russia], *Mineral'nye resursy Rossii. Ekonomika i upravlenie [Mineral resources of Russia. Economics and Management]*, 2020, No 6, pp. 1–9. (In Russ.).
6. Golubev Yu. K., Prusakova N. A., Luk'yanova L. I. Opyt vyyavleniya vozmoznykh korennykh istochnikovalmaznykh rossypei Arkticheskoi zony Yakutii [Experience in identifying possible primary sources of diamond placers in the Arctic zone of Yakutia], *Otechestvennaya geologiya [National Geology]*, 2017, No 1, pp. 54–67. (In Russ.).
7. Gorev N. I., Gerasimchuk A. V., Protsenko E. V., Tolstov A. V. Tektonicheskie aspekty stroeniya Vilyuisko-Markhinskoi zony, ikh ispol'zovanie pri prognozirovanii kimberlitovykh polei [Tectonic aspects of the structure of the Vilyui-Markha zone, their use in forecasting kimberlite fields], *Nauka i obrazovanie [Science and education]*, 2011, No 3, pp. 5–10. (In Russ.).
8. Gorev N. I., Protsenko E. V. Tektonicheskie osobennosti razmeshcheniya kimberlitovykh tel i ikh ispol'zovanie pri prognozirovanii (na primere kimberlitovykh polei Zapadnoi Yakutii) [Tectonic features of the distribution of kimberlite bodies and their use in forecasting (on the example of kimberlite fields in Western Yakutia)], *Rudy i metally [Ores and Metals]*, 2017, No 4, pp. 62–69. (In Russ.).
9. Ilupin I. P., Vaganov V. I., Prokopchuk B. I. Kimberlity [Kimberlites], Moscow, Nedra Publ., 1990, 248 p.
10. Kostrovitskii S. I., Yakovlev D. A., Alymova N. V. Kimberlitovyi vulkanizm Yakutskoi provintsii – tektonicheskii kontrol', mantiinye istochniki [Kimberlite volcanism of the Yakut province – tectonic control, mantle sources], *Vulkanizm i geotektonika. Materialy IV Vserossiiskogo simpoziuma po vulkanologii i paleovulkanologii. Tom 1 [Volcanism and geotectonics. Materials of the IV All-Russian Symposium on Volcanology and Paleovolcanology. Volume 1]*, Petropavlovsk-Kamchatsky, 2009, pp. 381–384.
11. Potekhina I. A., Makovchuk I. V., Gladkov A. S. Razryvnaya tektonika mestorozhdeniya trubka “Komsomol'skaya” [Fracture tectonics of the Komsomol'skaya pipe deposit], *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Bulletin of the Irkutsk State Technical University]*, 2008, No 4 (36), pp. 25–31. (In Russ.).
12. Potekhina I. A. Razlomno-blokovoe stroenie i kimberlitovye tela Alakit-Markhinskogo almazonosnogo polya (tektonofizicheskii analiz) [Fault-block structure and kimberlite bodies of the Alakit-Markha diamondiferous field (tectonophysical analysis): Extended abstract of candidate's thesis], Irkutsk, IZK SO RAN Publ., 2010, 163 p.
13. Poturoev A. A. O treshchinno-razryvnoi tektonike Daldyno-Alakitskogo raiona [About fracture-rupture tectonics of the Daldyn-Alakit region], *Magmaticheskie obrazovaniya severo-vostoka Sibirskoi platformy [Magmatic formations of the north-east of the Siberian platform]*, Yakutsk, YaF SO AN SSSR Publ., 1975, pp. 57–72.
14. Prusakova N. A. Geologo-geofizicheskaya prognoznopoiskovaya model' Zimneberezhnogo kimberlitovogo polya [Geological and geophysical forecasting and prospecting model of the Zimneberezhny kimberlite field: Extended abstract of candidate's thesis], Moscow, 2004, 167 p.
15. Prusakova N. A. Glubinnaya struktura Zimneberezhnogo kimberlitovogo polya, Arkhangel'skaya oblast' [Deep structure of the Zimneberezhny kimberlite field, Arkhangel'sk region], *Rudy i metally [Ores and Metals]*, 2006, No 2, pp. 53–64. (In Russ.).
16. Prusakova N. A. Lokalizatsiya ploshchadei pod poiskovye raboty na osnove geologo-geofizicheskikh predposylok korennoi almazonosnosti [Localization of areas for prospecting work on the basis of geological and geophysical prerequisites for indigenous diamond content], *Effektivnost' geologorazvedochnykh rabot na almazy: prognozno-resursnye, metodicheskie, innovatsionno-tekhnologicheskie puti ee povysheniya. Materialy V Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem, posvyashchennoi 50-letiyu Almaznoi laboratorii TsNIGRI – NIGP AK “ALROSA” (PAO) [Efficiency of geological exploration for diamonds: predictive resource, methodological, innovative and technological ways to increase it. Materials of the V All-Russian Scientific and Practical Conference with International Participation, dedicated to the 50th anniversary of the TsNIGRI Diamond Laboratory – NIGP PJSC ALROSA]*, Mirniy, 2018, pp. 152–156.
17. Prusakova N. A. Printsipy vydeleniya lokal'nykh uchastkov ranga kusta kimberlitovykh trubok na osnove strukturno-geofizicheskogo raionirovaniya [Principles of identifying local areas of the rank of a cluster of kimberlite pipes on the basis of structural-geophysical zoning], *Effektivnost' prognozirovaniya i*



*poiskov mestorozhdenii almazov: proshloe, nastoyashchee i budushchee (Almazy-50) [Efficiency of forecasting and prospecting for diamond deposits: past, present and future (Almazy-50)], St. Petersburg, 2004, pp. 272–274.*

18. Serokurov Yu. N., Kalmykov V. D., Zuev V. M. Distantionnyi prognos kimberlitovogo magmatizma [Re-

mote prediction of kimberlite magmatism], Moscow, Triumph Publ., 2017, 312 p.

19. Serokurov Yu. N., Kalmykov V. D., Zuev V. M. Kosmicheskie metody pri prognoze i poiskakh mestorozhdenii almazov [Space methods for forecasting and prospecting for diamond deposits], Moscow, Nedra-Biznestsentr Publ., 2001, 198 p.

## Авторы

### Прусакова Наталья Александровна

кандидат геолого-минералогических наук  
заведующий лабораторией  
prusakova@tsnigri.ru

### Громцев Кирилл Владимирович

кандидат геолого-минералогических наук  
старший научный сотрудник  
gromtsev@tsnigri.ru

### Лаптев Михаил Михайлович

старший научный сотрудник  
laptev@tsnigri.ru

ФГБУ «Центральный научно-исследовательский геологоразведочный институт цветных и благородных металлов», г. Москва

## Authors

### Prusakova Natalya Alexandrovna

PhD  
Head of laboratory  
prusakova@tsnigri.ru

### Gromtsev Kirill Vladimirovich

PhD  
Senior researcher  
gromtsev@tsnigri.ru

### Laptev Mikhail Mikhaylovich

Senior researcher  
laptev@tsnigri.ru

FSBI Central Research Institute of Geological Prospecting for Base and Precious Metals, Moscow, Russia

## Перспективы алмазоносности Чаро-Синской зоны разломов

### Prospects for diamond potential of the Charo-Sinskaya fault zone

**Толстов А. В., Максимкина Л. В.,  
Колесник А. Ю., Абрамов В. Ю.,  
Антонова Н. В.**

**Tolstov A. V., Maksimkina L. V.,  
Kolesnik A. Yu., Abramov V. Yu.,  
Antonova N. V.**

Приведены новые данные о геологическом строении Чаро-Синской зоны глубинных разломов, расположенной на южном борту Вилуйской синеклизы. На основе обработки результатов сейсморазведки проанализировано глубинное строение территории, выявлены грабенообразные структуры, аналогичные имеющимся вблизи известных кимберлитовых полей Якутии. С учётом результатов по минералогии индикаторных минералов кимберлита прогнозируется новое кимберлитовое поле и обозначено его местоположение.

Ключевые слова: Чаро-Синская зона, грабен, кимберлитовое поле, Вилуйская синеклиза.

New data on the geological structure of the Charo-Sinskaya zone of deep faults located on the southern side of the Vilyui syncline are presented. Based on the processing of the seismic survey results, the deep structure of the territory has been analyzed, and graben-like structures similar to those found near the known kimberlite fields of Yakutia have been identified. Taking into account the results on the mineralogy of the indicator minerals of kimberlite, a new kimberlite field location is predicted.

Key words: Charo-Sinskaya zone, graben, kimberlite field, Vilyui syncline.

---

Для цитирования: Толстов А. В., Максимкина Л. В., Колесник А. Ю., Абрамов В. Ю., Антонова Н. В. Перспективы алмазоносности Чаро-Синской зоны разломов. Руды и металлы. 2021. № 3. 46–58. DOI: 10.47765/0869-5997-2021-10017.

For citation: Tolstov A. V., Maksimkina L. V., Kolesnik A. Yu., Abramov V. Yu., Antonova N. V. Prospects for diamond potential of the Charo-Sinskaya fault zone. Ores and metals, 2021, № 3, 46–58. DOI: 10.47765/0869-5997-2021-10017.

*Введение.* Актуальность выделения новых перспективных площадей для поисков месторождений алмазов комплексом современных геолого-геофизических работ определяется необходимостью восполнения сырьевой базы за счёт вовлечения в опосредованное освоение новых, малоизученных в отношении алмазоносности территорий южного борта Вилуйской синеклизы. Чаро-Синская зона глубинных разломов, расположенная в этой зоне, по нашему мнению, прямой геологический аналог Вилуйско-Мархинской зоны (рис. 1), контролирующей местоположение богатейших алмазоносных кимберлитовых полей Западной Якутии. Как и Вилуйско-Мархинская, Чаро-Синская зона глубинных разломов представлена среднепалеозойским дайковым поясом базитов [4, 6, 7, 8, 9, 11]. При этом степень её геолого-геофизической изученности остаётся крайне низкой, поскольку полноценные площадные алмазопроисследовательские работы на данной территории фактически не проводились с 60-х гг. XX века, а её изученность ограничивается региональными исследованиями мелкого масштаба.

Для исследуемой территории (листы Р-50 и Р-51) степень геофизической изученности соответствует мелкомасштабной (1 : 1 000 000 – 1 : 500 000), реже среднемасштабной (1 : 200 000 – 1 : 100 000) стадиям геологоразведочных работ. Основные объёмы геофизических исследований выполнены в 50–60-е гг. прошлого столетия. За эти годы вся территория была покрыта аэромагнитными и гравиметрическими съёмками масштабов 1 : 1 000 000 и 1 : 200 000. Крупномасштабные работы (1 : 50 000 – 1 : 25 000) выполнены лишь на крайне ограниченных локальных периферийных участках в незначительных объёмах и существенного вклада в геологическую изученность территории не внесли. За последние десятилетия на территории Чаро-Синской зоны выполнен внушительный объём современных сейсморазведочных работ высокой кратности, нацеленных на поиски нефтегазовых месторождений. В данной статье результаты сейсмических данных, выполненных в пределах Чаро-Синской зоны, обработаны и проанализированы с позиций прогноза коренной алмазоносности [5, 6, 12, 13].

Площадное шлиховое опробование современного аллювия на всей территории Чаро-Синской зоны разломов также выполнено в 50–60-е гг. прошлого века преимущественно с отбором рядовых шлиховых проб, взятых в соответствии с масштабом съёмок, что полностью отражает качество и количество имеющихся результатов. Лишь после 2000 г. в междуречье Наманы и Синей при участии АК «АЛРОСА» (ПАО), ИГАБМ СО РАН, ИГМ СО РАН и ВСЕГЕИ начали проводиться единичные незначительные по объёму специализированные работы на алмазы на ключевых участках, направленные на выявление перспектив коренной алмазоносности, в ходе которых были получены новые данные о минералогии индикаторных минералов кимберлитов (ИМК) и сделаны выводы об их возможных источниках. Однако геологическая интерпретация геофизических (сейсморазведочных) съёмок, выполненных для повышения нефтегазовых перспектив с позиций прогноза коренной алмазоносности приводится здесь впервые.

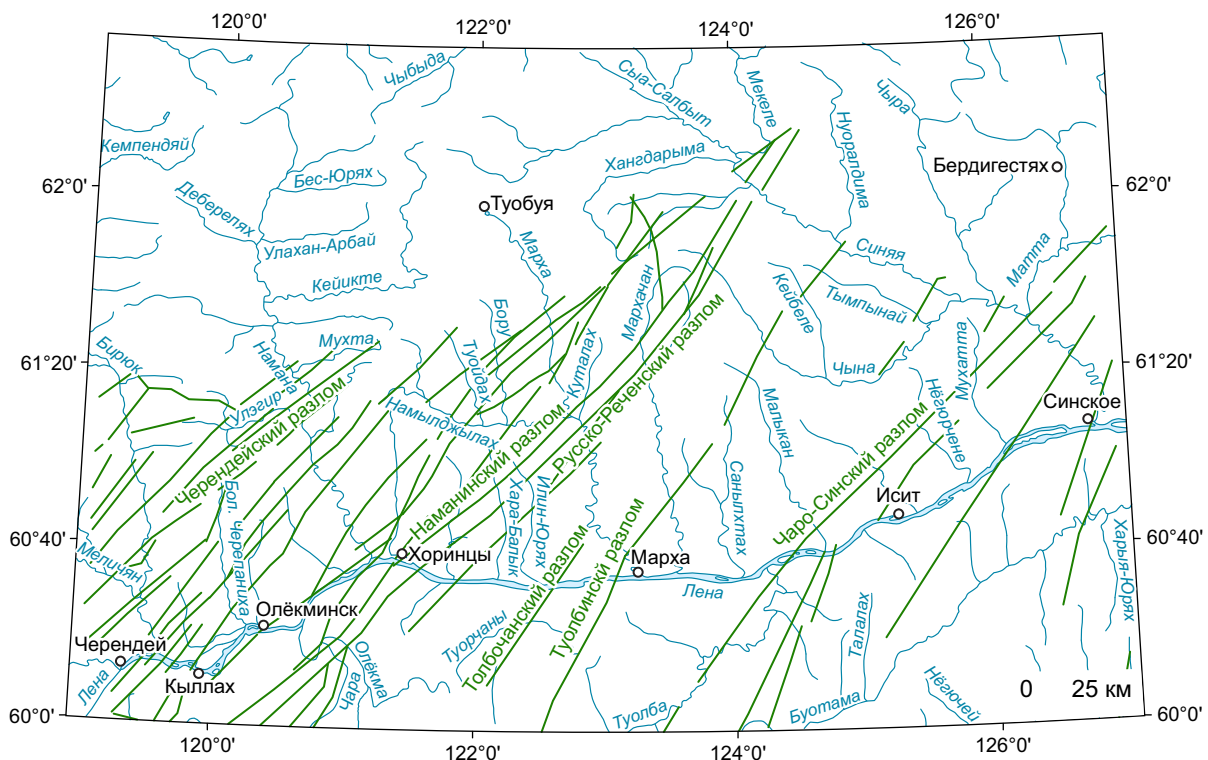
***Предпосылки проявления кимберлитового магматизма в пределах Чаро-Синской зоны глубинных разломов. Региональные (глубинные) предпосылки.***

Выделение локальных площадей, перспективных на обнаружение кимберлитового магматизма, базируется на комплексе благоприятных предпосылок и признаков. Их надёжность и достоверность определяется уровнем и качеством имеющейся геолого-геофизической информации. В результате анализа существующих на сегодняшний день геофизических данных на Чаро-Синской площади выделены элементы глубинного строения и геофизические параметры, имеющие прогнозное значение. К основополагающим (на примере Якутской алмазоносной провинции) относятся:

- повышенная мощность литосферы,
- депрессии и их склоны в рельефе поверхности Мохоровичича,
- низкий тепловой поток ( $< 30 \text{ мВт/м}^2$ ),
- области регионального разуплотнения земной коры.

Геологическое строение Чаро-Синской площади в системе региональных прогнозных кри-





**Рис. 1. Тектоническая схема Чаро-Синской площади (по данным АМС):**

тектонические нарушения по данным аэромагнитной съёмки: зелёные линии – линейные протяжённые магнитные аномалии различной интенсивности, связываемые с дайками долеритов среднепалеозойского возраста

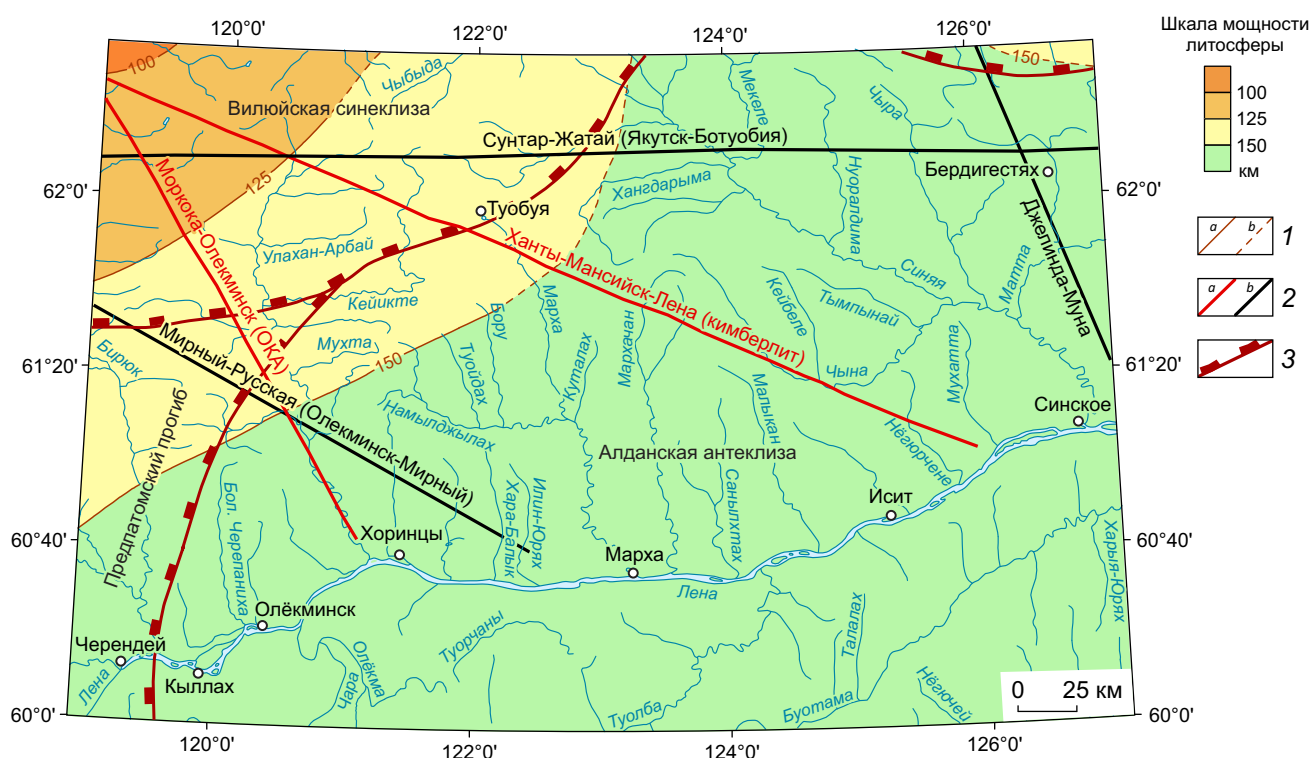
**Fig. 1. Tectonic scheme of the Charo-Sinskaya area (based on aeromagnetic survey data):**

tectonic faults indicated based on aeromagnetic survey data: green lines are linear extended magnetic anomalies of varying intensity associated with the Middle Paleozoic dolerite dikes

териев говорит о благоприятных условиях для локализации алмазоносных кимберлитов среднепалеозойского возраста, поскольку площадь располагается в пределах Алданского гранулит-гнейсового террейна архейского возраста [10, 12, 13]. Мощность кратонной литосферы террейна составляет 140–150 км (рис. 2), что немного меньше, чем на большей части территории Якутской алмазоносной провинции (ЯАП), где локализованы продуктивные кимберлитовые поля. Однако в данном случае речь идёт о мощности литосферы на современном временном уровне. При этом нельзя исключить, что она могла частично деляминировать (деградировать) на рубеже пермского – триасо-

вого периодов или позже, на рубеже юрского и каменноугольного, когда в пределах Сибирской платформы проявилась мощнейшая тектоно-магматическая активизация, сопровождавшая формирование Предверхоанского краевого прогиба. Свидетельство существования в среднем палеозое (на момент становления продуктивных кимберлитов) более мощной литосферы – её корреляционная связь с мощностью земной коры, установленная в ЯАП, где глубинным литосферным корням соответствуют области максимального прогибания поверхности Мохоровичича [11, 12, 13].

В пределах ЯАП кимберлитоносным зонам с мощностью литосферы более 200 км со-



**Рис. 2. Схема глубины залегания границы Мохоровичича Чаро-Синской площади:**

1 – изогипсы поверхности Мохоровичича; 2 – глубинные профили: *a* – глубинное сейсмическое зондирование (ГСЗ), *b* – точечное сейсмическое зондирование (ТСЗ); 3 – границы надпорядковых структур и их названия

**Fig. 2. Depth diagram of the Moho discontinuity within the Charo-Sinskaya area:**

1 – isohypses of the Moho discontinuity; 2 – depth profiles: *a* – structural zones boundaries, *b* – structural zones areas; 3 – boundaries of superorder structures and their names

ответствуют участки с мощной земной корой – более 40–42 км. На рассматриваемой Чаро-Синской площади по результатам региональных глубинных сейсмических исследований соотнесены участки с мощностью литосферы 140–150 км (см. рис. 2) и области максимального погружения поверхности Мохоровичича, то есть 44–46 км (рис. 3). Кроме того, рассматриваемая территория находится в пределах приповерхностной геотермы 30 мВт/м<sup>2</sup>, которая аппроксимируется со всеми известными алмазонасными кимберлитовыми полями Сибирской платформы (рис. 4). К положительным прогнозным региональным предпосылкам относятся также зоны разуплотнения и размагничивания консолидированной земной коры, вы-

деляемые в магнитном поле и поле силы тяжести, что свидетельствует о её повышенной проницаемости. Для алмазонасных кимберлитовых полей ЯАП эти зоны фиксируются низкоградиентными локальными магнитными и гравитационными минимумами. Таким образом, Чаро-Синская площадь характеризуется аномальными геофизическими свойствами, как на территориях, расположенных внутри ЯАП и характеризующихся известными кимберлитопроявлениями.

*Среднемасштабные предпосылки.* С учётом установленных на сегодняшний день минералогических признаков и выявленных нами в ходе настоящих исследований геолого-геофизических особенностей строения территории

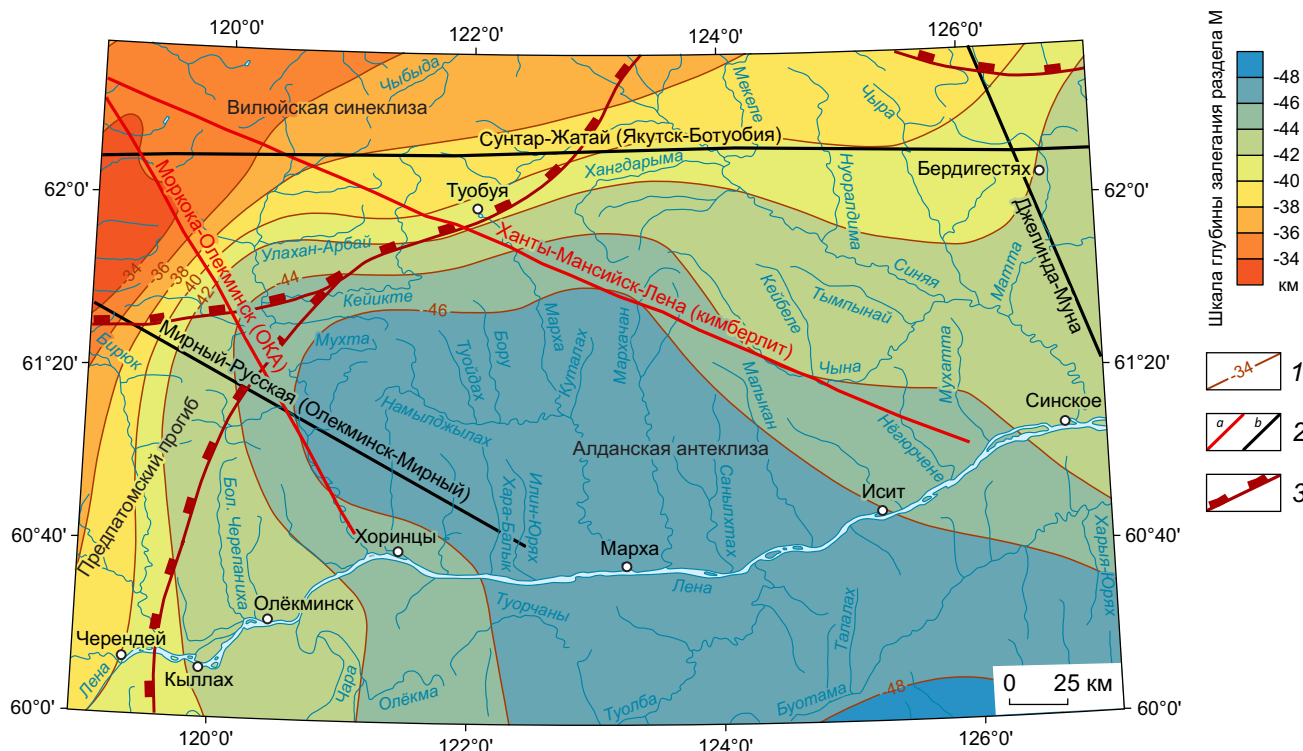


Рис. 3. Схема мощности литосферы Чаро-Синской площади:

1 – изолинии мощности литосферы: а – уверенные, б – неуверенные; 2 – глубинные профили: а – ГСЗ, б – ТСЗ; 3 – границы надпорядковых структур и их названия

Fig. 3. Diagram of the Charo-Sinskaya area lithosphere thickness:

1 – lithosphere thickness isolines: a – reliable, b – uncertain; 2 – depth profiles: a – structural zones boundaries, b – structural zones areas; 3 – boundaries of superorder structures and their names

Чаро-Синской зоны глубинных разломов в соответствии с геофизическими, геохимическими и минералогическими предпосылками возможно прогнозирование потенциально коренных источников ИМК в ранге «кимберлитовое поле» с оконтуриванием и локализацией их наиболее вероятного местоположения.

**Геофизические предпосылки.** Особенности структурно-тектонического строения площади определены на основе анализа и интерпретации аэромагнитных, гравиметрических и сейсмических данных. Материалы среднemasштабных геофизических исследований позволили создать основу для структурно-тектонического районирования территории. Для данной площади установлена благоприятная структурно-тектоническая обстановка, строе-

ние территории соответствует комплексу алмазопроискоковых критериев.

Анализ результатов свидетельствует, что основной вклад в аномальное поведение геофизических полей вносят глубинные разломы Чаро-Синской системы среднепалеозойского возраста и зоны их геодинамического влияния, поскольку именно они играют определяющую роль в формировании современного структурно-тектонического облика исследуемой территории. Основные представления о тектономагматическом строении площади получены по результатам аэромагнитных съёмки (АМС) масштаба 1:200 000. По данным АМС установлен характер поведения аномального магнитного поля: в пределах рассматриваемой территории оно закономерно изменяется с юга на се-

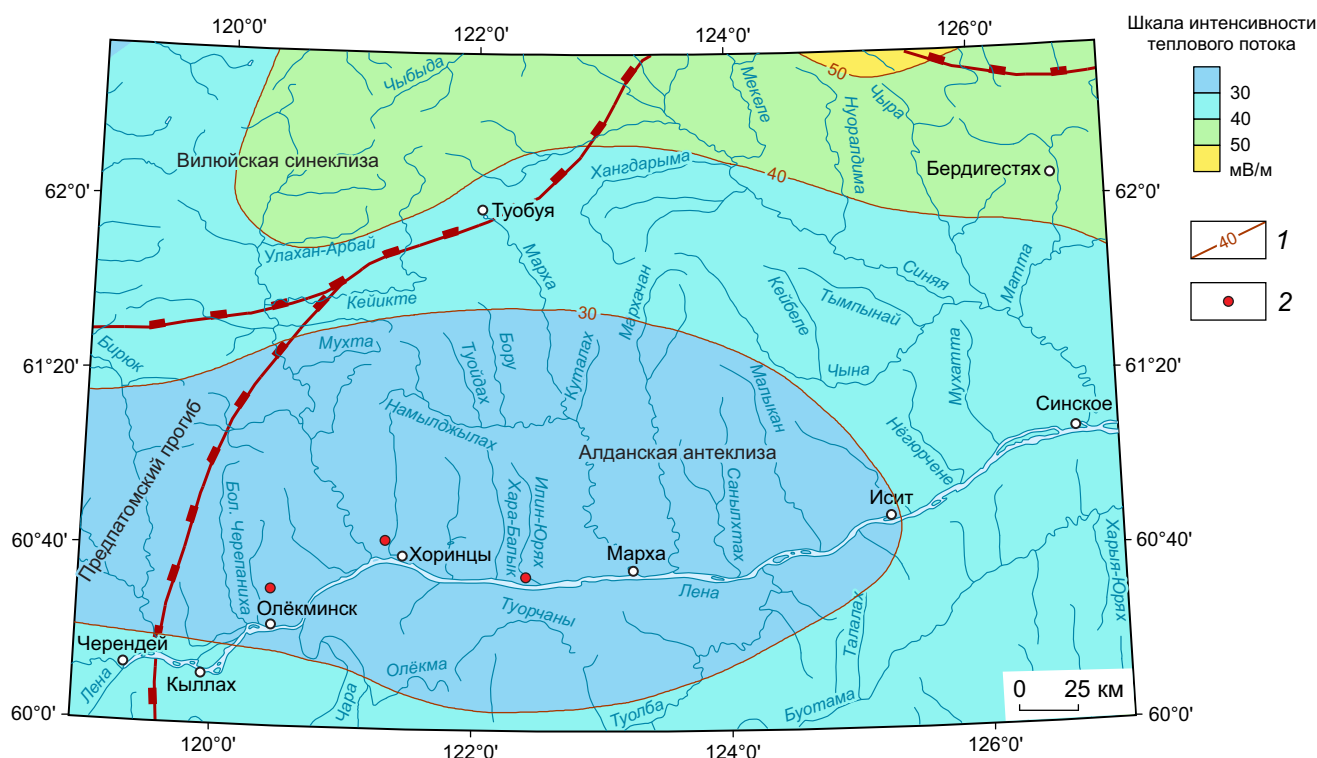


Рис. 4. Схема теплового потока Чаро-Синской площади:

1 – изотермы теплового потока; 2 – точки наблюдений; остальные усл. обозн. см. рис. 2

Fig. 4. Heat flow diagram of the Charo-Sinskaya area:

1 – heat flow isotherms; 2 – observation points. See Fig. 2 for other legend

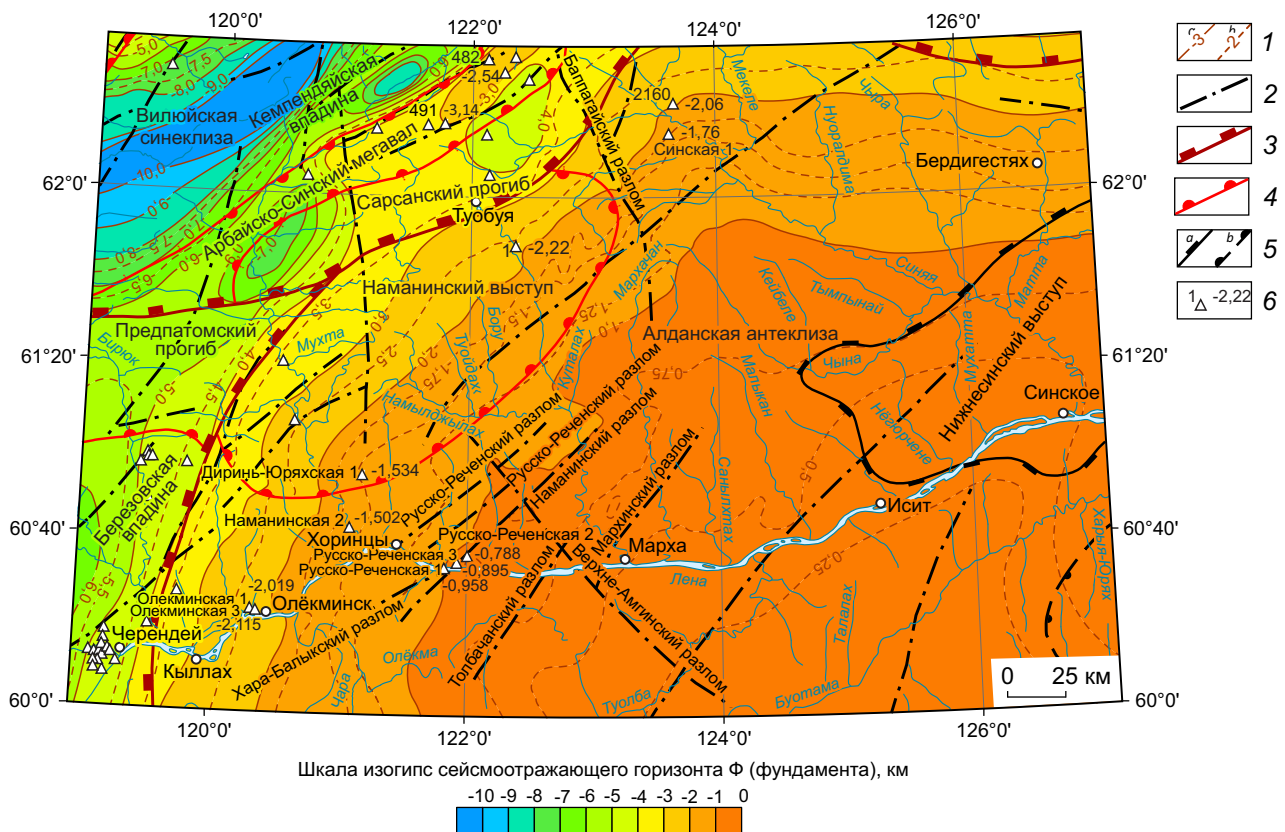
вер по мере увеличения мощности осадочного чехла.

Северная часть (южное обрамление Вилуйской синеклизы) характеризуется слабодифференцированным магнитным полем с чередованием обширных по площади и слабых по интенсивности положительных и отрицательных аномалий, оси которых преимущественно северо-северо-западного простирания. Эти аномалии отражают структуру архейского фундамента и свидетельствуют о присутствии в его составе магнитосодержащих комплексов.

Южная часть площади (Алданская антеклиза) характеризуется более высокой интенсивностью аномального магнитного поля и меньшими размерами вытянутых на северо-запад или в субмеридиональном направлении аномалий.

На юго-западе и в центре площади цепочками протяжённых и дискретных положительных высокочастотных магнитных аномалий прослежена серия даек основного, субщелочного и ультраосновного составов, обладающих повышенной магнитностью и трассирующих глубинные разломы. Протяжённость отдельных даек до 300 км, мощность их изменяется от нескольких метров до 100 м (Туолбинская, Чаро-Синская). Преобладают нарушения восточно-северо-восточного направления (азимут 30–45°) (см. рис. 1). Наиболее отчётливо дайки Чаро-Синской зоны прослеживаются в локальной составляющей магнитного поля. Возраст даек по данным U-Pb исследований цирконов, проведённых в центре изотопных исследований (ЦИИ) ФГБУ «ВСЕГЕИ» позднедевонский, составляет 371–364 млн [16, 17], что согласует-





**Рис. 5. Структурно-тектоническая схема фундамента (по материалам АО «Якутскгеофизика», НИГП АК «АЛРОСА» (ПАО)):**

1 – изогипсы кровли фундамента (сейсмоотражающий горизонт  $\Phi$ ): а – уверенные, б – неуверенные; 2 – разломы, выделяемые по данным сейсморазведки; границы: 3 – надпорядковых структур, 4 – структур 1–2 порядков; 5 – структуры 3–4 порядков: а – положительные, б – отрицательные; 6 – скважины глубокого бурения

**Fig. 5. Structural-tectonic basement diagram (based on research materials from Yakutskgeophysics, JSC ALROSA):**

1 – isohypses of seismic reflective horizon  $\Phi$ : a – reliable, b – uncertain; 2 – faults identified from seismic data; boundaries: 3 – superorder structures, 4 – 1st–2nd order structures; 5 – 3rd–4th order structures: a – positive, b – negative; 6 – deep wells

ся с возрастом подобных образований северного борта Вилюйской синеклизы.

По современным представлениям, в Малоботуобинском и Среднемархинском алмазодобывающих районах Вилюйско-Мархинской зоны дайки базитов формируют «раму», нормирующую размещение полей и кустов кимберлитовых тел. Это важная составляющая прогнозно-поисковых магматических предпосылок (рудоконтролирующих факторов), установленных на территории ЯАП. Потенциально кимберлитоконтролирующая Чаро-Синская зона разло-

мов сложена широким спектром тектонических нарушений, различающихся объёмом магматизма, морфологией и другими характеристиками. В целом же она симметрична рудоконтролирующей системе Вилюйско-Мархинской зоны глубинных разломов, трассирующих Накынское кимберлитовое поле. Ось симметрии совпадает с осью Вилюйской синеклизы. Глубинные разломы Чаро-Синской зоны, по аналогии с Накынским кимберлитовым полем, имеют первостепенное значение для возможного обнаружения кимберлитопроявлений.

Глубинные разломы Чаро-Синской зоны находят отражения и в волновом сейсмическом поле. Анализ результатов сейсморазведочных работ свидетельствует о высокой насыщенности осадочного чехла и фундамента разнородными тектоническими нарушениями, в том числе не связываемыми с дайками долеритов (так называемые сухие трещины). Дайки Чаро-Синской системы разломов, как и Вилюйско-Мархинской, на временных разрезах фиксируются зонами потери корреляции отражающих горизонтов [11, 13]. Насыщенность верхней части осадочного чехла Чаро-Синской площади тектоническими нарушениями пликативного и дизъюнктивного характера указывает на их повышенную проницаемость, что связано в том числе с проявлениями среднепалеозойской тектоно-магматической активизации [12, 13, 16].

Современное состояние поверхности кристаллического фундамента отражено на структурно-тектонической схеме, построенной по сейсмоотражающему горизонту Ф (рис. 5). Большая часть рассматриваемой площади приурочена к северо-западному крылу Алданской антеклизы, в рельефе фундамента фиксируется в виде полого погружающейся в сторону Патомско-Вилюйского авлакогена моноклинали. Осложняющие элементы – выступы и впадины более высоких порядков (Наманинский выступ, Сарсанский прогиб, Кемпендяйская, Берёзовская впадины, Арбайско-Синский мегавал). Глубина залегания фундамента изменяется от первых сотен метров (Алданская антеклиза) до первых десятков километров (Вилюйская синеклиза). Разломы, наиболее ярко выраженные на уровне горизонта Ф, направлены в верхнюю часть осадочного чехла.

К положительным структурно-тектоническим факторам, выделяемым на основе анализа структурных построений по фундаменту, относится наличие ступени (флексуры) в теле фундамента с гипсометрическим уровнем 2–3 км. К разряду гипотез о контроле кимберлитового магматизма тектоническими линейными зонами принадлежит точка зрения на то, что некоторые группы кимберлитовых полей приурочены к линейным грабенам осадочного чехла шириной в первые километры и про-

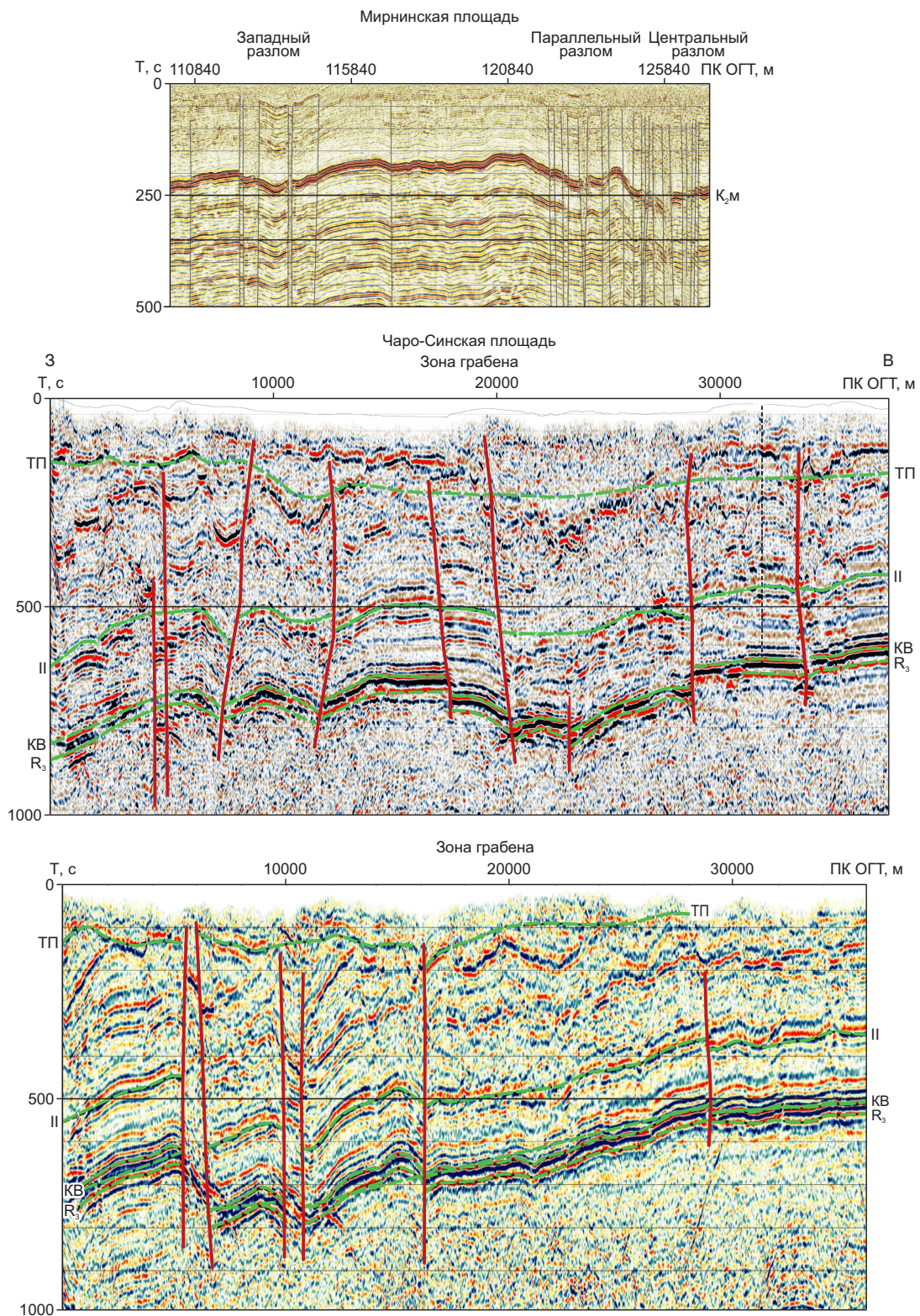
тяжённостью на многие десятки и даже первые сотни километров [6, 9, 11, 13].

Линейные грабенообразные структуры картируются в пределах известных (Мирнинское, Накынское) кимберлитовых полей, в плане совпадают с разломами Вилюйско-Мархинской зоны. Характерная особенность этих структур – их сложная морфология. Разломы, ограничивающие грабены, как правило, не имеют одного сместителя и фиксируются довольно широкой полосой (до 2 км и более). Основные грабены часто осложнены более мелкими горстами и гребневидными складками. Разломы в большинстве случаев представлены серией разрывных нарушений, зонами трещиноватости.

Грабенообразная структура, подобная Западному, Параллельному, Центральному грабенам Вилюйско-Мархинской зоны глубинных разломов в пределах Малоботуобинского алмазоносного района, фиксируется и на временных разрезах Чаро-Синской площади (рис. 6). Выявленный грабен в плане совпадает с разломами Чаро-Синской зоны (серия безымянных разломов севернее Наманинского разлома, в междуречье Наманы и Мархи). Положение осевой линии зафиксированной депрессии подчиняется общему структурному плану, а её ориентировка отвечает юго-западным и северо-восточным румбам. Грабен имеет сложную морфологию с разветвлениями и изгибами, наиболее ярко проявленной мощной погружённой зоной с множественными смещениями и разрывами в полосе шириной около 2 км, суммарная вертикальная амплитуда структуры составляет 150–170 м, на отдельных локальных участках около 200 м.

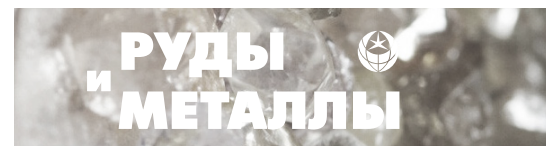
*Геохимические предпосылки.* Имеющиеся результаты геохимических исследований по долеритам Чаро-Синской зоны показывают в них концентрации  $TiO_2$ , типичные для среднепалеозойских пород данной серии, то есть варьирующиеся в пределах 1,3–3 % [9]. Однако при массовом опробовании базитов, предпринятом в разные годы исследователями, выявлены отдельные пробы, в которых концентрация  $TiO_2$  увеличивается аномально до 3,5–4,5 % (по данным исследований НИГП, ФГБУ «ВСЕГЕИ» и ИГАБМ) [9, 13].





**Рис. 6. Временные разрезы Мирнинского кимберлитового поля и Чаро-Синской площади**

Fig. 6. Temporal sections of the Mirny kimberlite field and Charo-Sinskaya area



Подобные аномально высокие концентрации  $TiO_2$  соответствуют анализам проб, отобранных из даек базитов Вилуйско-Мархинской зоны глубинных разломов, расположенных в непосредственной близости (первые километры) или внутри кимберлитовых полей. По нашему убеждению, это также надёжная геохимическая предпосылка прогнозирования новых кимберлитовых полей в пределах Чаро-Синской зоны [17]. Кроме того, при поисках кимберлитов в сложных геологических обстановках, к которым, несомненно, относятся закрытые территории Чаро-Синской зоны, необходима разработка новых принципов и подходов геохимических исследований [14, 15].

*Минералогические предпосылки.* Данные о распространённости, степени механического износа и химизме ИМК, полученные за последние 20 лет, свидетельствуют о том, что максимальные концентрации слабоизношенных ИМК с типичными для кимберлитов химическими составами наблюдаются в современном аллювии в верховьях рек Намана, Намыджылах и Марха [12, 15, 16]. При этом их количество увеличивается по мере приближения к выявленному нами грабену, что локализует площадь, перспективную на выявление нового кимберлитового поля [10, 12, 16].

Выявленные ИМК представлены преимущественно пикроильменитами, находки пиропов крайне редки, но, тем не менее, они обнаружены в достаточном количестве [1, 3]. Хромшпинелиды относятся к так называемому ку-

рунговскому типу, и их связь с кимберлитовым магматизмом достоверно не установлена [2]. Однако все пиропы имеют «признаки древности», подтверждающие их среднепалеозойский возраст. Таким образом, внешний облик и химические составы ИМК Чаро-Синской зоны свидетельствуют о потенциальной алмазонаосности прогнозируемых кимберлитов [1, 3].

*Заключение.* Наличие поисковых критериев, выявленных по геофизическим, геохимическим и минералогическим данным, – убедительное основание высоко оценивать перспективы выявления коренных источников алмазов кимберлитовой природы средней алмазонаосности в пределах Чаро-Синской зоны глубинных разломов.

По совокупности установленных геолого-геофизических предпосылок с учётом минералогических признаков на левобережье Лены (междуречье Наманы и Мархи) нами выделена перспективная площадь в ранге «кимберлитовый район», расположенная на правом берегу реки Намыджылах на отрезке субширотного течения, в непосредственной зоне влияния Наманинского разлома.

Выделенная перспективная площадь нуждается в первоочерёдной постановке специализированных геолого-геофизических работ с минерагеническим картированием и выделением перспективных локальных участков в ранге кимберлитового поля для последующего опосредованного поиска и оценки прогнозных ресурсов алмазов.

## Список литературы

1. Афанасьев В. П., Зинчук Н. Н., Избеков Э. Д., Подъячев Б. П. Перспективы алмазонаосности южного борта Вилуйской синеклизы // Отечественная геология. – 2007. – № 1. – С. 119–122.
2. Афанасьев В. П., Зинчук Н. Н., Похиленко Н. П. Поисковая минералогия алмаза. – Новосибирск: СО РАН, Гео, 2010. – 650 с.
3. Афанасьев В. П., Похиленко Н. П., Кулигин С. С., Самданов Д. А. О перспективах алмазонаосности южного борта Вилуйской синеклизы // Геология рудных месторождений. – 2020. – Т. 62, № 6. – С. 561–567. – DOI 10.31857/S0016777020040024.
4. Горев Н. И., Герасимчук А. В., Проценко Е. В., Толстов А. В. Тектонические аспекты строения Вилуйско-Мархинской зоны, их использование при прогнозировании кимберлитовых полей // Наука и образование. – 2011. – № 3. – С. 5–10.
5. Емельянов В. С., Толстов А. В., Борис Е. И. Новые данные о перспективах коренной алмазонаосности о перспективах коренной алмазонаосности Вилуйско-Мархинской зоны разломов // Вопросы методики прогнозирования и поисков месторождений полезных ископаемых (применительно к объектам геологоразведочных работ



- АК «АЛРОСА»). – Якутск : АЛРОСА ЯНИГП ЦНИГРИ, 2004. – С. 115–123.
6. *Игнатов П. А., Новиков К. В., Шмонов А. М., Еремеев Р. В., Лисковская Л. В., Ковальчук О. Е., Толстов А. В.* Оценка перспектив и локальное прогнозирование кимберлитов с помощью ГИС-технологий на закрытых территориях Накынского кимберлитового поля, Западная Якутия // Руды и металлы. – 2012. – № 4. – С. 54–60.
  7. *Избеков Э. Д., Подъячев Б. П., Афанасьев В. П.* Признаки симметричной алмазности восточной части Сибирской платформы (относительно оси Вилюйской синеклизы) // Доклады Академии наук. – 2006. – Т. 411, № 3. – С. 352–353.
  8. *Колодезников И. И., Левашов К. К., Мокшанцев В. К., Мишин В. М., Шкодзинский В. С.* Геология и перспективы алмазности юго-восточной окраины Сибирской платформы и Сетте-Дабана / под ред. К. К. Левашова. – М. : Недра, 1996. – 160 с.
  9. *Киселёв А. И., Константинов К. М., Ярмолук В. В., Иванов А. В.* Чаро-Синский дайковый рой в структуре среднепалеозойской Вилюйской рифтовой системы (Сибирский кратон) // Доклады Академии наук. – 2016. – Т. 471, № 2. – С. 209–213. – DOI 10.7868/S0869565216320220.
  10. *Мальцев М. В., Толстов А. В.* Критерии и проблемы прогнозирования и поисков месторождений алмазов в новых районах // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России. Материалы VIII Всероссийской научно-практической конференции. Т. 1. – Якутск : СВФУ ; ИГАБМ. – 2018. – С. 210–213.
  11. *Проценко Е. В., Горев Н. И.* Тектонические особенности размещения кимберлитовых тел и их использование при прогнозировании (на примере кимберлитовых полей Западной Якутии) // Руды и металлы. – 2017. – № 4. – С. 62–69.
  12. *Проценко Е. В., Толстов А. В., Горев Н. И.* Критерии поисков кимберлитов и новые перспективы коренной алмазности Якутии // Руды и металлы. – 2018. – № 4. – С. 14–23.
  13. *Розен О. М., Манаков А. В., Зинчук Н. Н.* Сибирский кратон: формирование, алмазность / АК «АЛРОСА» ; ЯНИГП ЦНИГРИ ; ГИН РАН. – М., 2006. – 212 с.
  14. *Симоненко В. И., Толстов А. В., Васильева В. И.* Новый подход к геохимическим поискам кимберлитов на закрытых территориях // Разведка и охрана недр. – 2008. – № 4–5. – С. 108–112.
  15. *Толстов А. В., Фомин В. М., Разумов А. Н., Гончаров Е. М.* Новые подходы к поискам месторождений алмазов в Якутской алмазной провинции // Збірник наукових праць Українського державного геологорозвідувального інституту. – 2013. – № 1. – С. 154–160.
  16. *Толстов А. В., Горев Н. И., Проценко Е. В.* Новые перспективы коренной алмазности Чаро-Синской зоны глубинных разломов (Южная Якутия) // Научно-методические основы прогноза, поисков, оценки месторождений алмазов, благородных и цветных металлов : сборник докладов VIII Международной научно-практической конференции (Москва, 16–18 апреля 2018 г.). – М. : ЦНИГРИ, 2018. – С. 21–22.
  17. *Tomshin M. D., Gogoleva S. S.* Behavior of TiO<sub>2</sub> in Dolerites as a Possible Search Sign for Kimberlites // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Prague, Czech Republic, September 07–11, 2020). – Prague : IOP Publishing, 2020. – P. 012073. – DOI 10.1088/1755-1315/609/1/012073.

## References

1. *Afanas'ev V. P., Zinchuk N. N., Izbekov E. D., Pod'yachev B. P.* Perspektivy almazonosnosti yuzhnogo borta Vilyuiskoi sineklizy [Prospects for diamond content of the southern flank of the Vilyui syncline], *Otechestvennaya geologiya [National Geology]*, 2007, No 1, pp. 119–122. (In Russ.).
2. *Afanas'ev V. P., Zinchuk N. N., Pokhilenko N. P.* Poiskovaya mineralogiya almaza [Prospecting mineralogy of diamond], Novosibirsk, SO RAN, Geo Publ., 2010, 650 p.
3. *Afanas'ev V. P., Pokhilenko N. P., Kuligin S. S., Samdanov D. A.* O perspektivakh almazonosnosti yuzhno-go borta Vilyuiskoi sineklizy [On the prospects for diamond content of the southern flank of the Vilyui syncline], *Geologiya rudnykh mestorozhdenii [Geology of Ore Deposits]*, 2020, V. 62, No 6, pp. 561–567, DOI 10.31857/S0016777020040024. (In Russ.).
4. *Gorev N. I., Gerasimchuk A. V., Protsenko E. V., Tolstov A. V.* Tektonicheskie aspekty stroeniya Vilyuiko-Markhinskoi zony, ikh ispol'zovanie pri prognozirovanii kimmerlitovykh polei [Tectonic aspects of the structure of the Vilyui-Markha zone, their use in predicting kimberlite fields], *Nauka i obrazovanie [Science and Education]*, 2011, No 3, pp. 5–10. (In Russ.).

5. Emel'yanov V. S., Tolstov A. V., Boris E. I. Novye dannye o perspektivakh korennoi almazonosnosti o perspektivakh korennoi almazonosnosti Vilyuisko-Markhinskoi zony razlomov [New data on the prospects of primary diamond content on the prospects of primary diamond content in the Vilyui-Markhinskaya fault zone], *Voprosy metodiki prognozirovaniya i poiskov mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh. (primenitel'no k ob'ektam geologorazvedochnykh rabot AK "ALROSA")* [Problems of methods of forecasting and prospecting for mineral deposits. (in relation to the objects of geological exploration of AK ALROSA)], Yakutsk, ALROSA YaNIGP TsNIGRI Publ., 2004, pp. 115–123.
6. Ignatov P. A., Novikov K. V., Shmonov A. M., Ereemeev R. V., Liskovaya L. V., Koval'chuk O. E., Tolstov A. V. Otsenka perspektiv i lokal'noe prognozirovanie kimberlitov s pomoshch'yu GIS-tekhnologii na zakrytykh territoriyakh Nakynskogo kimberlitovogo polya, Zapadnaya Yakutiya [Assessment of prospects and local forecasting of kimberlites using GIS technologies in the closed areas of the Nakyn kimberlite field, Western Yakutia], *Rudy i metally* [Ores and Metals], 2012, No 4, pp. 54–60. (In Russ.).
7. Izbekov E. D., Pod'yachev B. P., Afanas'ev V. P. Priznaki simmetrichnoi almazonosnosti vostochnoi chasti Sibirskoi platformy (otnositel'no osi Vilyuiskoi sineklizy) [Symmetric diamond content in the eastern part of the Siberian platform (relative to the axis of the Vilyui syncline)], *Doklady Akademii nauk* [Reports of the Academy of Sciences], 2006, V. 411, No 3, pp. 352–353. (In Russ.).
8. Kolodeznikov I. I., Levashov K. K., Mokshantsev V. K., Mishnin V. M., Shkodzinskii V. S. Geologiya i perspektivy almazonosnosti yugo-vostochnoi okrainy Sibirskoi platformy i Sette-Dabana [Geology and prospects of diamond content in the southeastern margin of the Siberian platform and Sette-Daban], Moscow, Nedra Publ., 1996, 160 p.
9. Kiselev A. I., Konstantinov K. M., Yarmolyuk V. V., Ivanov A. V. Charo-Cinskii daikovyj roi v strukture srednepaleozoiskoi Vilyuiskoi riftovoi sistemy (Sibirskii kraton) [Charo-Sin dike swarm in the structure of the Middle Paleozoic Vilyui rift system (Siberian craton)], *Doklady Akademii nauk* [Reports of the Academy of Sciences], 2016, V. 471, No 2, pp. 209–213, DOI 10.7868/S0869565216320220. (In Russ.).
10. Mal'tsev M. V., Tolstov A. V. Kriterii i problemy prognozirovaniya i poiskov mestorozhdenii almazov v novykh raionakh [Criteria and problems of forecasting and prospecting for diamond deposits in new regions], *Geologiya i mineral'no-syr'evye resursy Severo-Vostoka Rossii. Materialy VIII Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii. Tom 1.* [Geology and mineral resources of the North-East of Russia. Materials of the VIII All-Russian Scientific and Practical conferences. Volume 1], Yakutsk, SVFU, IGABM Publ., 2018, pp. 210–213.
11. Protsenko E. V., Gorev N. I. Tektonicheskie osobennosti razmeshcheniya kimberlitovykh tel i ikh ispol'zovanie pri prognozirovanii (na primere kimberlitovykh polei Zapadnoi Yakutii) [Tectonic features of the distribution of kimberlite bodies and their use in forecasting (on the example of kimberlite fields in Western Yakutia)], *Rudy i metally* [Ores and Metals], 2017, No 4, pp. 62–69. (In Russ.).
12. Protsenko E. V., Tolstov A. V., Gorev N. I. Kriterii poiskov kimberlitov i novye perspektivy korennoi almazonosnosti Yakutii [Criteria for prospecting for kimberlites and new prospects for primary diamond content in Yakutia], *Rudy i metally* [Ores and Metals], 2018, No 4, pp. 14–23. (In Russ.).
13. Rozen O. M., Manakov A. V., Zinchuk N. N. Sibirskii kraton: formirovanie, almazonosnost' [Siberian craton: formation, diamond content], Moscow, AK "ALROSA", YaNIGP, TsNIGRI, GIN RAN Publ., 2006, 212 p.
14. Simonenko V. I., Tolstov A. V., Vasil'eva V. I. Novyi podkhod k geokhimicheskim poiskam kimberlitov na zakrytykh territoriyakh [A new approach to geochemical prospecting for kimberlites in closed areas], *Razvedka i okhrana nedr* [Prospect and protection of mineral resources], 2008, No 4–5, pp. 108–112. (In Russ.).
15. Tolstov A. V., Fomin V. M., Razumov A. N., Goncharov E. M. Novye podkhody k poiskam mestorozhdenii almazov v Yakutskoi almazonosnoi provintsii [New approaches to prospecting for diamond deposits in the Yakutsk diamond province], *Zbirnik naukovikh prats' Ukraïns'kogo derzhavnogo geologorozviduval'nogo institute* [Collection of Science Practices of the Ukrainian State Geological and Exploration Institute], 2013, No 1, pp. 154–160.
16. Tolstov A. V., Gorev N. I., Protsenko E. V. Novye perspektivy korennoi almazonosnosti Charo-Sinskoi zony glubinykh razlomov (Yuzhnaya Yakutiya) [New perspectives of the primary diamond content of the Charo-Sinskaya deep fault zone (South Yakutia)], *Nauchno-metodicheskie osnovy prognoza, poiskov, otsenki mestorozhdenii almazov, blagorodnykh i tsvetnykh metallov: sbornik dokladov VIII Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii (Moskva, 16–18 aprelya 2018 g.)* [Scientific and methodo-

*logical foundations for forecasting, prospecting, evaluating deposits of diamonds, noble and non-ferrous metals: a collection of reports of the VIII International Scientific and Practical Conference (Moscow, April 16–18, 2018)*], Moscow, TsNIGRI Publ., 2018, pp. 21–22.

17. Tomshin M. D., Gogoleva S. S. Behavior of TiO<sub>2</sub> in Dolerites as a Possible Search Sign for Kimberlites, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Prague, Czech Republic, September 07–11, 2020)*, Prague, IOP Publishing, 2020, pp. 012073, DOI 10.1088/1755-1315/609/1/012073.

## Авторы

### Толстов Александр Васильевич

доктор геолого-минералогических наук  
директор<sup>1</sup>  
TolstovAV@alrosa.ru

### Максимкина Лидия Викторовна

инженер-геолог I категории<sup>2</sup>  
MaksimkinaLV@alrosa.ru

### Колесник Александр Юрьевич

заведующий лабораторией<sup>1</sup>  
прогнозно-методического сопровождения ГПП  
KolesnikAYu@alrosa.ru

### Абрамов Вадим Юрьевич

старший научный сотрудник<sup>2</sup>  
AbramovVY@alrosa.ru

### Антонова Наталья Владимировна

ведущий инженер-геолог<sup>2</sup>  
AntonovaNV@alrosa.ru

<sup>1</sup> Научно-исследовательское геологическое предприятие  
АК «АЛРОСА» (ПАО), Мирный

<sup>2</sup> Научно-исследовательское геологическое предприятие  
АК «АЛРОСА» (ПАО), Санкт-Петербург

## Authors

### Tolstov Alexander Vasil'evich

Dr Sci  
Director<sup>1</sup>  
TolstovAV@alrosa.ru

### Maksimkina Lidiya Viktorovna

engineer/geologist<sup>2</sup>  
MaksimkinaLV@alrosa.ru

### Kolesnik Alexander Yur'evich

Head of geological<sup>1</sup>  
prospecting laboratory  
KolesnikAYu@alrosa.ru

### Abramov Vadim Yur'evich

Senior researcher<sup>2</sup>  
AbramovVY@alrosa.ru

### Antonova Natal'ya Vladimirovna

Leading engineer/geologist<sup>2</sup>  
AntonovaNV@alrosa.ru

<sup>1</sup> JSC ALROSA (PJSC)  
Mirny, Russia

<sup>2</sup> JSC ALROSA (PJSC)  
Saint-Peterburg, Russia



## О специфике изучения алмаза при прогнозно-поисковых работах (на примере Сибирской платформы)

### Diamond study features in forecasting and prospecting (Siberian platform)

Зинчук Н. Н., Бардухинов Л. Д.

Zinchuk N. N., Bardukhinov L. D.

Существование индикаторных признаков алмаза на всех уровнях его нахождения, от кимберлитовых провинции, субпровинции, поля, диатремы до рудных столбов утверждается по результатам исследований и обобщения материалов по свойствам алмазов из коренных и россыпных месторождений Сибирской платформы. Совокупность разновидностей алмаза в кимберлитовых породах образует не парагенетические, а парастерические ассоциации, связанные их сонахождением в кимберлитах. В статье сформулированы морфологические критерии алмазоносности кимберлитов в зависимости от количественного содержания в них округлых алмазов. Не отмечено значимых различий в алмазоносности кимберлитов на разведанную глубину диатрем. Охарактеризованы основные методы изучения алмаза с акцентом на их эффективность. Отсутствует зональность в изменении типоморфных особенностей алмазов.

Ключевые слова: алмазы, кимберлиты, алмазоносные районы, россыпи, Сибирская алмазоносная провинция.

Based on the completed research and data summary on diamonds specific features (an example from the Siberian platform), conclusions were made that indications exist at all levels of their location: from kimberlite-related provinces, subprovinces, fields, diatremes to ore shoots. Population of diamond varieties in kimberlite rocks forms parasteric, rather than paragenetic, associations related to their coexistence in kimberlites. Morphological criteria of kimberlite diamond potential were defined depending on rounded diamonds content in them. Significant differences in kimberlites diamond potential were not revealed to the explored depth of diatremes. A conclusion about the absence of horizontal concentric zonality in the change of diamond typomorphic features was made.

Key words: diamonds, kimberlite, diamondiferous regions, placers, Siberian diamond-province.

---

Для цитирования: © Зинчук Н. Н., Бардухинов Л. Д. О специфике изучения алмаза при прогнозно-поисковых работах (на примере Сибирской платформы). Руды и металлы. 2021. № 3. с. 59–75. DOI: 10.47765/0869-5997-2021-100018.

For citation: © Zinchuk N. N., Bardukhinov L. D. Diamond study features in forecasting and prospecting (Siberian platform). Ores and metals, 2021, № 3, pp. 59–75. DOI: 10.47765/0869-5997-2021-100018.



За многолетнюю историю алмазопромысловых работ на древних платформах открыты многочисленные различные по содержанию алмазов коренные и россыпные месторождения или небольшие проявления. Собранные при этом коллекции охватывают почти всё разнообразие природных алмазов и содержат неопределимую научно-производственную информацию, так как характеризуют все территории, где обнаружены эти уникальные природные образования.

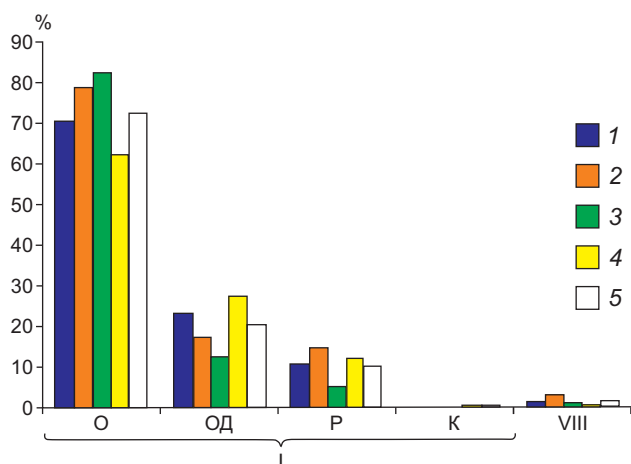
Алмаз – полигенный минерал, образующийся не только в условиях земных недр, но и при сверхскоростном соударении космических тел с землей. В настоящее время в мире известны [1–4, 12–16, 21–27] четыре геолого-генетических типа коренных месторождений алмазов: кимберлитовый, лампроитовый, импактный, метаморфогенный. Наиболее значимы в практическом отношении кимберлитовый и лампроитовый типы, приуроченные в основном к трубкам взрыва (диатремам). В некоторых довольно редких случаях экономически рентабельные концентрации алмазов наблюдаются в дайках, тесно связанных с трубками кимберлитов. Два других типа коренных месторождений алмазов локализуются в коровых породах. Алмазы в них обычно мелкие (преобладают индивиды размером сотые или десятые доли миллиметра). Они могут быть использованы только для технических целей. Форма месторождений импактных алмазов – изометрическая.

Очень важным является комплексное изучение алмаза – минерала с широким комплексом физико-химических, кристалломорфологических и других особенностей, отражающих своеобразие термодинамических и геохимических условий образования, которые могут быть использованы в качестве типоморфных [5–11, 17–21]. Алмазы из отдельных кимберлитовых тел (а нередко и из различных минерало-петрографических разновидностей кимберлитов в одном из месторождений) довольно существенно различаются по ряду типоморфных особенностей. Зная свойства алмазов из кимберлитовых тел, можно с большой долей уверенности определить коренной

источник изучаемой россыпи или группы россыпей.

Современные методы исследования алмазов дают возможность получить большой объём информации об условиях их образования, последующего существования и изменения, что важно при прогнозировании, поисках и оценке алмазных месторождений. Из широкого спектра этих особенностей наиболее информативными и относительно легко диагностируемыми являются [4, 15–17, 24]: морфология, фотолюминесценция, распределение оптически активных и водородных центров, электронный парамагнитный резонанс, химический состав твёрдых включений в алмазах и др. При этом главнейший признак – принадлежность алмазов к определённой минералогической разновидности по комплексу взаимосвязанных признаков и свойств. В результате многолетних исследований алмазов из россыпей и кимберлитовых тел Сибирской алмазодобывающей провинции – САП (Якутия, Красноярский край и Иркутская область) – с применением минералогической классификации алмазов, предложенной Ю. Л. Орловым [20], по которой выделяются 11 генетических разновидностей алмазов (с дополнительным разделением кристаллов отдельных разновидностей по габитусу и морфологическим типам), нами накоплен значительный фактический материал по типоморфным особенностям алмазов из кимберлитовых тел, современных отложений и разновозрастных вторичных коллекторов Сибирской платформы (СП), что позволяет провести районирование территории.

Алмазы разновидности I наиболее распространены в природных объектах (рис. 1). В кимберлитовых месторождениях их выход составляет 80–90 % и падает до 50 % с ростом размеров кристаллов. В россыпях северо-востока САП их содержание уменьшается. Основная форма кристаллов – октаэдр. По внешнему виду к этой разновидности относят плоскогранные октаэдры, часто со слоистостью на рёбрах. Обычно эти алмазы прозрачные и бесцветные. В разных месторождениях содержание алмазов разновидности I различных габитусных форм и окрашенных индивидов изменяется.

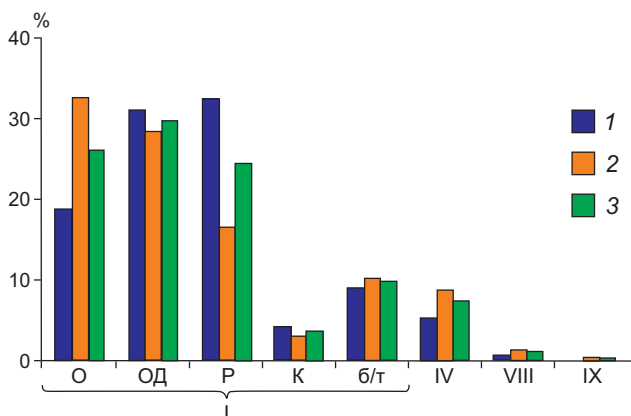


**Рис. 1. Типоморфные особенности алмазов из кимберлитовых тел Мирнинского поля:**

римские цифры – разновидности алмазов, по Ю. Л. Орлову (О – октаэдры, ОД – переходные формы, P – ламинарные ромбододекаэдры, К – кубы); трубки: 1 – Интернациональная (число изученных алмазов  $n = 184$ ), 2 – Дачная ( $n = 129$ ), 3 – им. XXIII съезда КПСС ( $n = 150$ ), 4 – Мир; 5 – среднее по полю

**Fig. 1. Typomorphic features of diamonds from kimberlite bodies of the Mirny field:**

roman numerals – diamond varieties after Yu. L. Orlov (O – octahedra, ОД – transitional forms, P – laminar rhombic dodecahedrons, К – cubes); pipes: 1 – Internationalnaya (the number of studied diamonds  $n = 184$ ), 2 – Dachnaya ( $n = 129$ ), 3 – XXIII CPSU Congress ( $n = 150$ ), 4 – Mir; 5 – field average



Среди них чаще, чем среди алмазов других монокристаллических разновидностей, встречаются обломки и кристаллы со сколами. Среди алмазов разновидности I по своим свойствам выделяются безазотные и полупроводниковые алмазы типов Ia и Ib.

Для алмазов разновидности II характерна кубическая форма роста, их окраска обычно янтарно-жёлтая и жёлто-оранжевая, иногда с зеленоватым оттенком. В отдельных случаях кристаллы в результате эпигенетических процессов имеют кофейно-коричневый или бурый цвет. По физическим свойствам к этой разновидности отнесены также непрозрачные чёрные с металлическим блеском алмазы. В процессе растворения кубические кристаллы изменяют облик, приобретая кривогранные формы. Алмазы разновидности II в небольших (менее 3 %) количествах устанавливаются в некоторых кимберлитовых телах Далдыно-Алакитского алмазоносного района – ДААР (трубки Юбилейная, Удачная, Комсомольская, Иреляхская и др.) – и составляют значительную часть (5–50 %) в россыпях северо-востока САП, коренные источники которых не выявлены.

К алмазам разновидности III относится полупрозрачные и непрозрачные кристаллы кубической формы, которая усложняется развитием других основных граней. Габитус часто искажается вследствие срастания нескольких кристаллов по {100} или образования двойников прорастания. Алмазы этой разновидности окрашены в серый цвет, который может

**Рис. 2. Типоморфные особенности алмазов из кимберлитовых тел Накынского поля:**

б/т – осколки; трубки: 1 – Ботуобинская ( $n = 5404$ ), 2 – Нюрбинская ( $n = 5814$ ); 3 – среднее по полю, остальные усл. обозн. см. рис. 1

**Fig. 2. Typomorphic features of diamonds from kimberlite bodies of the Nakyn field:**

б/т – fragments; pipes: 1 – Botuobinskaya ( $n = 5404$ ), 2 – Nyurbinskaya ( $n = 5814$ ); 3 – field average, see Fig. 1 for other legend

изменяться до тёмно-серого и даже чёрного. Все градации окраски объясняются тем, что внешние зоны кристалла насыщены микроскопическими включениями и мелкими трещинами. Алмазы разновидности III встречаются только в некоторых месторождениях и россыпях, главным образом среди крупных разновидностей кристаллов.

*Алмазы разновидности IV* известны давно и описаны в литературе как «алмазы в оболочке». Этим названием подчёркивается, что такие алмазы имеют структурно различимые части с чёткой границей разделения на ядро и оболочку, которые на сколах кристаллов хорошо видны невооружённым глазом и уверенно определяются в природных выборках минерала (рис. 2). Необходимо отметить повышенное (до 10 % и более) содержание алмазов в оболочке в уникальных по продуктивности кимберлитовых телах Накынского кимберлитового поля – НКП (трубки Ботуобинская и Нюрбинская), диатремах Айхал, Комсомольская и Юбилейная ДААР, где у них есть признаки природного растворения [2, 7, 16–18]. Обычно ядром алмазов этой разновидности выступают бесцветные прозрачные кристаллы с октаэдрическими гранями и со всеми особенностями реальной структуры, присущими разновидности I. Окраска алмазов данной разновидности обусловлена оптическими свойствами оболочек. В зависимости от насыщенности микровключениями оболочки могут быть полупрозрачными и непрозрачными.

*Алмазы разновидности V* на САП обычно встречаются в россыпях (рис. 3), в отдельных случаях их содержание достигает 40–50 %, в то время как среди кимберлитовых алмазов оно обычно не превышает долей процента. К ним относятся тёмные, серые, иногда почти чёрные алмазы, имеющие переходные между октаэдром и ромбододекаэдром формы. Их окраска определяется большим количеством включений (прежде всего графита), находящихся во внешней зоне кристалла в виде хлопьев или точечных образований. Присутствуют также сростки из двух–трёх кристаллов с общей оболочкой. Центральная часть кристаллов этой разновидности бесцветная и про-



**Рис. 3. Алмазы разновидности V россыпи Усунку-Юрэх (Приленский алмазоносный район СП)**

**Fig. 3. Diamonds of V variety, the Usunku-Yurekh placer (Prilensky diamondiferous region of the Siberian Platform)**

зрачная. В целом отмечается резкое отличие алмазов разновидности V из кимберлитовых тел от алмазов той же разновидности из россыпей САП.

*Алмазы разновидности VI* (баллас) в России встречаются в незначительном количестве только в россыпях, но в виде поликристаллических шаровидных образований характерны для россыпей Бразилии и Южной Африки. Есть сведения о находке балласов в кимберлитовой трубке Премьер (Африка).

К алмазам разновидности VII относятся сростки из нескольких достаточно крупных (до 4–5 мм) кристаллов, которые обычно полупрозрачны из-за множества включений, внутренних трещин и каналов травления, развитых по трещинам и границам срастания отдельных кристаллов. Форма их роста – октаэдр, который в результате растворения может принимать додекаэдрический облик. Их значительную часть составляют циклические сложные двойники. Все кристаллы имеют каналы травления («шрамы»). Существуют переходы между алмазами разновидностей VII и V, причём часто в сростках отдельные индивиды представлены серыми кристаллами разновидности V. К разновидности VII также относят-





**Рис. 4.** Алмазы разновидности XI из россыпи Эбелях (Эбеляхское поле СП)

Fig. 4. Diamonds of XI variety from the Ebelyakh placer (Ebelyakh field of the Siberian Platform)

ся сложно деформированные двойники и сростки додекаэдров из россыпей северо-востока САП, часто полициклические, близкие по своим особенностям к разновидности V, но почти без включений графита. Комплекс типоморфных особенностей алмазов разновидностей V и VII из указанных россыпей свидетельствует об их принадлежности к одному генетическому типу, происходящему из коренных источников неизвестного типа.

Алмазы разновидности VIII представляют собой друзоподобные сростки многочисленных хорошо огранённых мелких алмазов одинакового размера (до 1 мм). Кристаллы наружной части сростка представлены октаэдрами, часто со ступенчато-пластинчатым характером развития граней, бесцветными и прозрачными. В центральной части агрегата просматривается тёмное ядро неправильной формы. Алмазы разновидностей VIII и IX в месторождениях обычно встречаются вместе, иногда достигая в отдельных трубках до 20 %.

К алмазам разновидности IX относятся поликристаллические сростки в виде кусков неправильной формы, образованных из зёрен размером 0,02–0,1 мм, иногда неоднородных по размеру и не имеющих кристаллографической огранки. Агрегаты непрозрачны, окраше-

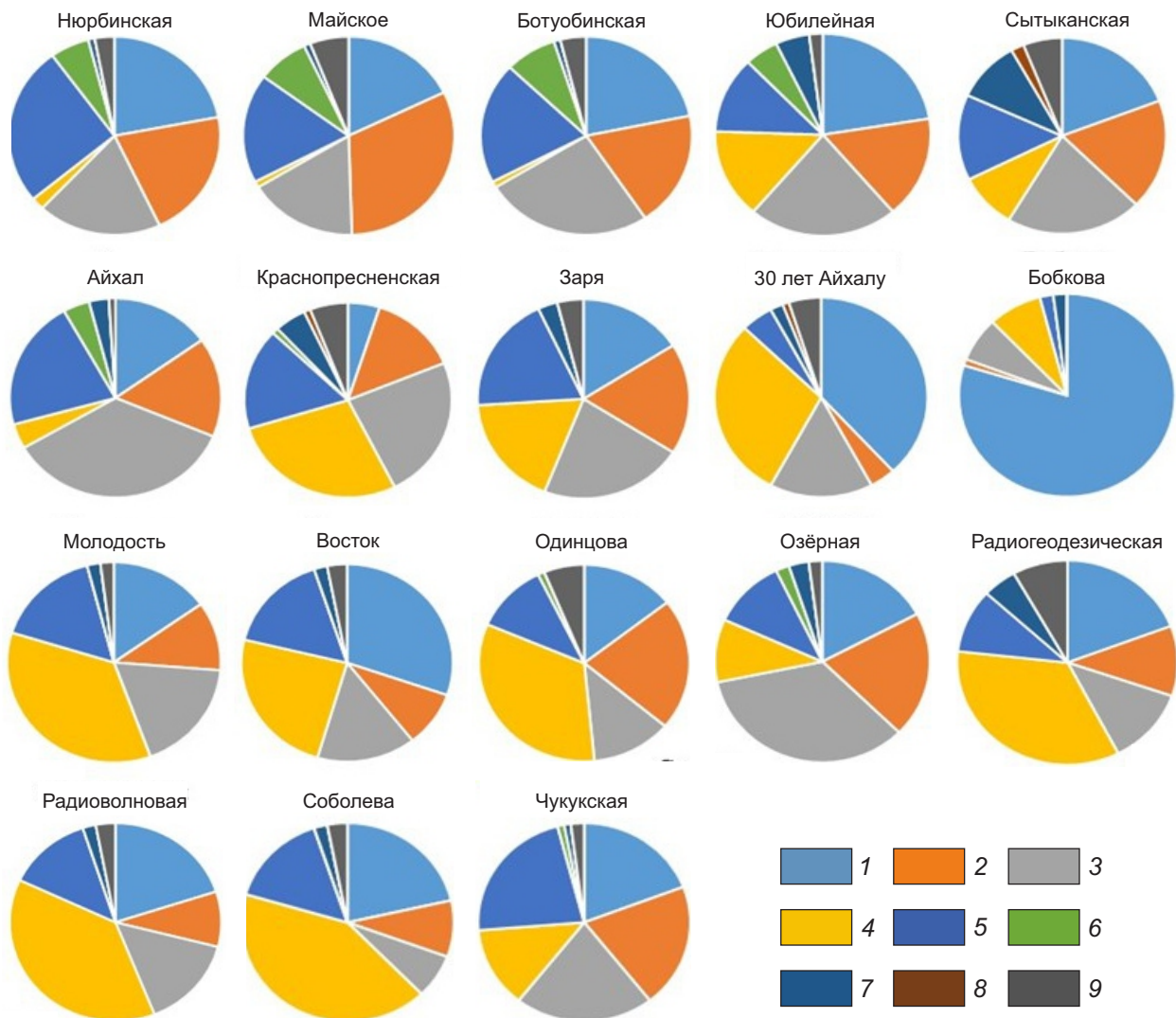
ны в цвета от тёмно-серого до совершенно чёрного.

Алмазы разновидности X (карбонадо) известны давно. Они были найдены в россыпях Бразилии, Венесуэлы и Центральной Африки. На САП карбонадо практически отсутствуют. Единичные образцы отнесены к этой разновидности только по рентгеноструктурным исследованиям.

К алмазам разновидности XI относятся поликристаллические и синтетические алмазы, содержащие в структуре три известные модификации углерода – алмаз, лонсдейлит и графит, поскольку условия их образования являются следствием динамических нагрузок, сопровождающихся соответствующим разогревом. В природе алмазы разновидности XI встречаются в метеоритных кратерах и метеоритах. В россыпях северо-востока САП обнаружены бесформенные, нередко пластинчатые зёрна от тёмно-бурого до стально-серого цвета, внешне видом напоминающие шлак (рис. 4). Рентгенографическими исследованиями они определены как карбонадо, и с учётом их специфики для них было предложено название «якутит». Коренными источниками таких зёрен служат метеориты и ударно-метаморфизированные породы.

В природе мы видим смесь отдельных разновидностей алмазов (рис. 5). Так, в кимберлитовой трубке Интернациональная в Малоботуобинском алмазоносном районе (МБАР) преобладают бесцветные кристаллы октаэдрического габитуса разновидности I (71 %), реже переходного от октаэдрического к ромбододекаэдрическому (23 %) при пониженном (менее 1 %) содержании ламинарных ромбододекаэдров. В рядом находящейся кимберлитовой трубке им. XXIII съезда КПСС (МБАР), характеризующейся в верхней части чётко выраженной корой выветривания, также представлены бесцветными, реже эпигенетически окрашенными в лилово-коричневые цвета алмазами разновидности I [5, 12, 16, 19, 23]. Среди них резко преобладают (до 82 %) кристаллы октаэдрического габитуса при невысоком (до 13 %) содержании кристаллов переходного от октаэдрического к ромбододекаэдрическому габитусу.





**Рис. 5. Разновидности и габитус алмазов (%) в кимберлитовых телах Накынского и Алаakit-Мархинского полей:**

1 – октаэдры; 2 – переходные формы ряда октаэдр – ромбододекаэдр; 3 – ламинарные ромбододекаэдры; 4 – округлые ромбододекаэдры; 5 – без типа; 6 – разновидность IV; 7 – разновидность VIII; 8 – разновидность IX; 9 – прочие

**Fig. 5. Varieties and habit of diamonds (%) in kimberlite bodies of the Nakyn and Alakit-Markhinsky fields:**

1 – octahedron; 2 – transitional forms of the octahedron – rhombododecahedron series; 3 – laminary rhombododecahedrons; 4 – rounded rhombododecahedrons; 5 – no type; 6 – variety IV; 7 – variety VIII; 8 – variety IX; 9 – others

тусу. В свою очередь, в трубках Нюрбинская и Ботуобинская (НКП) отмечаются бесцветные, реже эпигенетически бледно окрашенные в лилово- и дымчато-коричневые цвета кристаллы разновидности I при повышенной доле (по сравнению с другими месторождениями САП)

алмазов разновидности IV с окрашенной в желтовато-зелёные и серые цвета оболочкой. В слабоэродированных диатремах с развитой в верхней части толщей вулканогенно-осадочных пород, ярким примером которых является самая большая на СП (59 га) кимберлитовая трубка

Юбилейная, среди бесцветных прозрачных и полупрозрачных кристаллов почти половину составляют разности, окрашенные в различные цвета. Среди них более 30 % – бледно-дымчато-коричневые, меньше – розово-лиловые и лилово-коричневые, окрашенные вследствие пластинчатой деформации. Характерно значительное количество индивидов с признаками природного травления – шрамами, матировкой, коррозией, кавернами и др. (25 % всех алмазов по месторождению). Таким же разнообразием характеризуется спектр алмазов из россыпей САП.

При всем разнообразии алмазов даже в пределах одной САП, по которой сделана применяемая классификация Ю. Л. Орлова [20], возможно выделить [9, 21, 24, 27] четыре типа источников алмазов.

*I тип первоисточника* – кимберлитовый, характерный для богатых кимберлитовых тел фанерозойского возраста, отличается резким преобладанием алмазов разновидности I, представленных ламинарными кристаллами октаэдрического, ромбододекаэдрического и переходного между ними габитусов и образующих непрерывный ряд, а также присутствием алмазов в оболочке разновидности IV, серых кубов разновидности III, поликристаллических агрегатов разновидностей VIII, IX, а в отдельных месторождениях (трубка Юбилейная) – равномерно окрашенных в жёлтый цвет кубоидов разновидности II.

*II тип первоисточника* – алмазы кимберлитового генезиса, характерные для кимберлитовых тел с убогой алмазноносностью и кимберлитовых жил; выделяется по преобладанию додекаэдроидов с шагренево́й поверхностью и полосами пластической деформации жильного типа, типичных округлых алмазов уральского (бразильского) типа и наличием бесцветных кубоидов разновидности I.

*III тип первоисточника* – алмазы невыясненного генезиса, характерные в основном для россыпей северо-востока САП, коренные источники которых до настоящего времени не обнаружены. Кристаллы этих источников представлены [1, 24–26] графитизированными ромбододекаэдрами разновидности V, сложными

ми двойниками и сростками додекаэдроидов разновидности VII с лёгким ( $\delta^{13}\text{C} = -23 \text{ ‰}$ ) изотопным составом углерода и равномерно окрашенными кубоидами разновидности II с изотопным составом углерода промежуточного ( $\delta^{13}\text{C} = -13,60 \text{ ‰}$ ) состава, образующими ассоциацию эбеляхского (нижнеленского) типа.

*IV тип первоисточника* – алмазы взрывных кольцевых структур импактного генезиса, представленные поликристаллами алмаза типа карбонадо с примесью гексагональной модификации углерода – лонсдейлита (якутит).

Полученные данные позволили разделить [14, 16] САП на четыре субпровинции: Центрально-Сибирскую (центральная часть платформы) с преобладанием I типа первоисточника; Лено-Анабарскую (северо-восток платформы) с преобладанием кристаллов III типа первоисточника невыясненного генезиса; Тунгусскую (юго-запад платформы) с преобладанием типичных округлых алмазов уральского (бразильского) типа, источником которых, возможно, были докембрийские терригенные формации платформы и её складчатого обрамления; Алданскую (юго-восток платформы) с находкой единичных округлых алмазов.

Всестороннее исследование алмазов из всех разновозрастных коллекторов и кимберлитовых диатрем позволили выработать систему анализа их типоморфных особенностей и провести кроме регионального ещё и среднемасштабное районирование. Так, в россыпях Центрально-Сибирской субпровинции отмечается высокое содержание кристаллов октаэдрического и ромбододекаэдрического габитусов. В пределах Лено-Анабарской субпровинции (ЛААСП) выделяются две алмазноносные области: Кютюнгинская (Приленская) и Анабаро-Оленёкская. В россыпях первой области устанавливаются кристаллы октаэдрического габитуса (ассоциация кютюнгинского типа), характерные для богатого типа первоисточника кимберлитового генезиса. В россыпях ЛААСП наблюдается резкое преобладание алмазов из первоисточника невыясненного генезиса (ассоциации эбеляхского типа) с преобладанием кристаллов разновидностей II, V и VII, типичных округлых алмазов во всех возрастных и ге-

нетических типах алмазоносных отложений. Тунгусская субпровинция (ТАСП) разделяется на две области: Байкитскую и Саяно-Тунгусскую. Для россыпей последней типичны доминирование округлых алмазов уральского (бразильского) типа и присутствие значительного количества (до 10 %) балласов. В россыпях Байкитской области преобладают кристаллы октаэдрического габитуса ассоциации мирнинского типа, характерной для богатых кимберлитовых трубок, но при значительных содержаниях типичных округлых алмазов (особенно в крупных классах), свойственной периферийным частям древних платформ.

Алмазоносность кимберлитов определяется многими факторами, главные из которых – геолого-тектонические особенности районов распространения кимберлитового магматизма; состав вещества верхней мантии, генерирующего кимберлитовые расплавы; глубина заложения корней магматических очагов; скорость миграции (подъёма) кимберлитового расплава в земную кору; сохранность алмазов в условиях земной коры (в диатремах); содержание «пустого» материала в кимберлитовых телах.

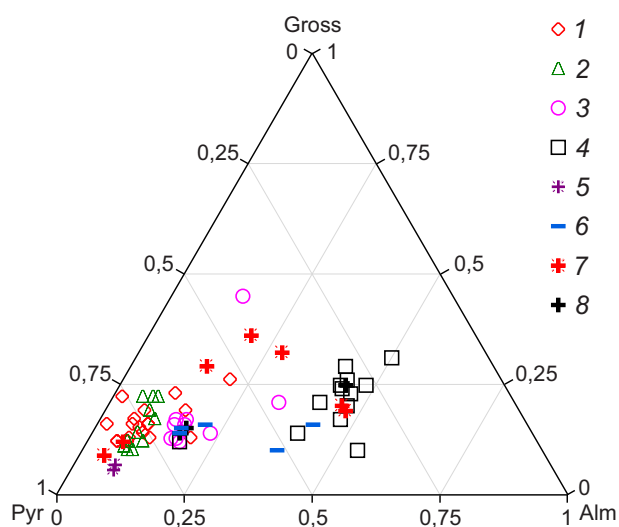
Состав глубинных (мантийных) минералов (пироп, пикроильменит, хромшпинелид и др.), кристалломорфология и физические свойства алмазов дифференцированы на уровне провинции, поля и каждой трубки. Индивидуальные особенности состава и физических свойств индикаторных минералов кимберлитов (ИМК) выявляются на статистическом уровне. Исследование алмазов из всех разновозрастных коллекторов и кимберлитовых диатрем позволили выработать систему анализа их типоморфных особенностей и провести районирование территорий, выделяя перспективные площади для проведения прогнозно-поисковых работ. Результаты такого районирования по алмазам и ИМК с учётом ряда критериев (морфологических, структурно-тектонических, палеогеографических и др.) служат основой для прогнозирования как новых богатых кимберлитовых тел, так и россыпей с невыявленными типами первоисточников, а также месторождений с повышенным качеством алмаз-

ного сырья. Анализ результатов изучения алмазов и ИМК различными исследователями подчёркивает актуальность и необходимость минералогических исследований комплексом современных методов с геологической привязкой находок минерала, позволяет решить ряд задач. Фундаментальные исследования, с одной стороны, уточняют условия генезиса алмазосодержащих пород, с другой – дают сведения чисто прикладной направленности для геолого-поисковых работ и технологического извлечения алмазов из кимберлитов. Установление связей вещественно-индикационных параметров кимберлитового магматизма различной продуктивности и геолого-структурного положения диатрем позволяет выявлять как региональные, так и локальные типоморфные особенности первичных минералов продуктивных пород, а также выяснять вопрос о коренных источниках полезного компонента в россыпях.

Алмаз является [4, 16–18, 24–27] носителем богатейшей информации об условиях своего формирования, изменениях в магматическом расплаве породы-транспортёра, преобразованиях разнообразных экзогенных обстановок в условиях седиментогенеза и дальнейших стадий литификации пород. Уникальность ряда свойств (исключительная твёрдость, высокий показатель преломления наряду с повышенной дисперсией, высочайшая теплопроводность и др.) делает алмаз незаменимым во многих отраслях экономики.

Исследования состоят из трёх блоков: 1-й – наблюдение (измерение), документация наблюдений; 2-й – обработка результатов наблюдений (формы хранения, классификации, способы сворачивания данных, статистическая обработка результатов, моделирование – математическое, натурное, графическое, экспериментальные и т. д.); 3-й – интерпретация результатов наблюдений и их обработка (формулирование выводов по проведённым работам, постановка новых исследовательских задач и т. д.). Каждый из этих блоков относительно независим, имеет свои задачи, методы и способы их решения, а часто и разных исполнителей. В то же время они взаимосвязаны; развитие наиболее мобильного из них, 1-го, требует со-





**Рис. 6. Соотношение минералов во включениях гранатов в алмазах из кимберлитовых трубок Якутии (по данным КР-спектроскопии):**

трубки: 1 – Юбилейная ( $n = 19$ ), 2 – Удачная ( $n = 12$ ), 3 – Комсомольская ( $n = 10$ ), 4 – Комсомольская-Магнитная ( $n = 13$ ), 5 – Мир ( $n = 2$ ), 6 – Спутник ( $n = 5$ ), 7 – Заполярная ( $n = 7$ ), 8 – Майская ( $n = 3$ )

**Fig. 6. Mineral ratio in garnet inclusions in diamonds from Yakutian kimberlite pipes (based on spectroscopy data):**

pipes: 1 – Yubileynaya ( $n = 19$ ), 2 – Udachnaya ( $n = 12$ ), 3 – Komsomolskaya ( $n = 10$ ), 4 – Komsomolskaya-Magnitnaya ( $n = 13$ ), 5 – Mir ( $n = 2$ ), 6 – Sputnik ( $n = 5$ ), 7 – Zapolyarnaya ( $n = 7$ ), 8 – Mayskaya ( $n = 3$ )

ответствующих корректировок во 2-м и 3-м. Это касается исследований всех минералов, включая и алмаз. Существуют известные методы исследований (физиографические, физические и др.), которые постоянно развиваются, и одновременно появляются другие приёмы, дающие новые комплексы данных. Но диалектика исследований такова, что 2-й и 3-й блоки требуют некоторой стабильности, получения однородных данных для интерпретации сложных объектов, решения задач. Для этого необходимо использование стандартного комплекса исследовательских средств, способов обработки результатов наблюдений. В этом нет про-

тиворечий, поскольку это – единство противоположностей, неразрывное сочетание высокодинамичного научно-исследовательского комплекса и более консервативного производственного.

Для алмаза (как и для других минералов) существует значительное количество методов изучения и регулярно появляются новые, но для массовых измерений и районирования по алмазам требуются однородные массивы данных, полученные на стандартном комплексе исследовательских средств. Такие комплексные исследования [3–5] позволяют определить парагенетическую принадлежность алмаза, параметры его образования; дополняют эти исследования [7, 8, 24] КР-спектроскопия включений и, в первую очередь, гранатов (рис. 6) и оливина. Перспективен метод аналитической электронной микроскопии, позволяющий извлекать и изучать наномикронные включения в алмазах, невидимые при оптических увеличениях. Многообещающими являются исследования магнитных свойств алмазов на уникальном оборудовании на постоянных магнитах. Для установления природы ферримагнетизма определяется микропримесный состав алмазов с помощью рентгенофлуоресцентного анализа при синхротронном излучении и с использованием методики LAM ICP-MS (масс-спектрометрический анализ с лазерной абляцией). Эти методы широко использовались до сих пор только в геохимических исследованиях минералов и горных пород, но их применение для алмазов вскрыло целый пласт новых возможностей. Фактически мы выходим на ранее не исследованный мезоуровень организации алмаза между микроуровнем, характеризующимся структурными примесями, собственными дефектами, изучаемыми с помощью оптико-спектроскопических, люминесцентных методов, ЭПР, изучения форм содержания азота, и макроуровнем, характеризующимся внешней морфологией кристаллов и макровключениями.

Для исследований на мезоуровне в настоящее время представляются перспективными упомянутый метод аналитической микроскопии, магнитность алмазов, исследования мик-





ропримесного состава, которые характеризуют отчасти структурные примеси (главным образом Ni), но в основном – наномикронные включения, невидимые в оптическом диапазоне увеличений, дифракционные методы, особенно с использованием синхротронного излучения, рентгеновская томография на синхротронном излучении, методы рассеяния света для обнаружения присутствия и оценки плотности распределения наномикронных включений. В ближайшее время эти методы будут бурно развиваться и дадут много новой информации. Можно полагать, что прежде всего будет получена информация генетического плана, дополняющая данные по типоморфизму алмазов, которые необходимо будет адаптировать для решения геолого-поисковых и разведочных задач.

Таким образом, анализ полученных данных и опубликованных материалов показывает, насколько велико разнообразие свойств алмаза как твёрдого тела. Эти общие сведения об алмазе необходимы для понимания методов исследований минерала. В действительности разнообразие свойств и особенностей алмаза неизмеримо шире, и это – основание для поиска новых методов исследований, подходящих для решения прогнозно-поисковых задач.

Для изучения морфологии алмазов и ИМК широко используется *сканирующая (растровая) электронная микроскопия (СЭМ)*, позволяющая получать объёмное изображение объекта. Микрофотографирование образцов минералов (в том числе алмазов) на электронном микроскопе преследует две цели: а) исследование поверхности, выявление и интерпретация элементов рельефа, обнаруживаемых или неинтерпретируемых с помощью оптической микроскопии; б) документация образца. Фиксация изображения поверхности на СЭМ осуществляется как на плёнку, так и с использованием цифровой системы записи изображения с выводом его на компьютер.

Поскольку *структура алмаза* – чувствительный индикатор и условий роста, и пост-ростовых изменений, её изучению уделяется большое внимание. Генетическую нагрузку несут различные отклонения от идеальной струк-

туры, которые выражаются в зональности и секториальности в связи с неравномерным распределением структурных примесей, напряжений и примесей вокруг минеральных и флюидных включений, пластических деформаций кристаллической решётки, а также в комплексе структурных изменений, связанных с релаксацией внутренних напряжений (полигонизация, рекристаллизация, хрупкое разрушение и т. д.).

Существует множество методов структурных исследований минералов, основные для алмаза – рентгеноструктурные (дифракционные). Из них наиболее значимыми являются полихроматический метод Лауэ или Лауэ-СИ с использованием «белого» синхротронного излучения; проекционный монохроматический метод Ланга и его специфические разновидности; асимметричный метод на отражение от поверхности (метод Вейсмана); метод двухкристалльного спектрометра и др. При этом необходимо отметить, что алмаз является богатным объектом для рентгеноструктурных исследований благодаря высокой прозрачности в рентгеновских лучах и относительной простоте дифракционной картины.

Высокую информативность показывает *метод аномального двупреломления*, характеризующийся технологической простотой и возможностью массовых наблюдений. Однако при этом надо помнить о разнообразии причин и форм аномального двупреломления в алмазах. Реальная картина двупреломления представляет собой суперпозицию, дифференциация которой для генетической интерпретации требует глубоких знаний и привлечения других методов структурных исследований (структурного травления, рентгеновских и др.).

*Исследование изотопного состава углерода алмазов* – важнейший метод изучения внутреннего строения минералов. Изотопный состав углерода характеризует отклонения от отношения  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  измеренного образца от стандарта. Большинство природных углеродсодержащих соединений имеет изотопный состав углерода от +10 до -90 ‰ относительно стандарта PDB. Знак (-) указывает на то, что образец содержит меньше тяжёлого изотопа, чем

стандарт (легче стандарта), знак (+) – больше (тяжелее стандарта). Углерод, поступивший из мантии в течение геологической истории, сформировал в конечном счёте углеродный резервуар коры и её осадочной оболочки. Усреднение изотопного состава форм углерода – с учётом их масс в осадочной оболочке даёт значение  $\delta^{13}\text{C} = -5 \text{ ‰}$ . Оно согласуется с наблюдаемыми значениями  $\delta^{13}\text{C}$  эндогенных форм углерода, прежде всего с основным количеством алмазов, изотопный состав которых  $\delta^{13}\text{C} = -4,5 \text{ ‰}$ . На протяжении геологической истории изотопный состав как мантийного, так и возрождённого в процессах метаморфизма осадочного углерода был близок к значению  $\delta^{13}\text{C} = -5 \text{ ‰}$ .

К настоящему времени опубликовано огромное количество результатов анализов изотопного состава углерода алмазов из большинства алмазоносных районов мира. Они позволили установить основной диапазон, в который укладывается большинство определений  $\delta^{13}\text{C}$ , разработать классификацию алмазов по изотопному составу, определить связь изотопного состава с парагенетической принадлежностью алмазов и др. Однако главный вопрос – причины различий изотопного состава алмазов – остаётся открытым. Тем не менее изотопный состав углерода, наряду с другими типоморфными особенностями алмазов, – один из признаков идентификации возраста коренных источников, что принципиально важно для оценки поисковой ситуации и выделения перспективных для поисков площадей, особенно если идентифицируются докембрийские источники [5–8, 16–18]. Алмазы эклогитовых парагенезисов демонстрируют максимальное разнообразие изотопного состава углерода. Поэтому следует подчеркнуть, что доля эклогитовых алмазов в северных россыпях значительно выше, чем в кимберлитах и связанных с ними россыпях центральных районов СП. Это коррелирует с повышенной долей в северных россыпях изотопически лёгких алмазов, для которых обосновывается докембрийский возраст.

Материалы проведённых исследований показали высокую информативность изотопных

исследований углерода алмазов как в генетическом, так и в геологоразведочном плане. Результаты исследований изотопии углерода (особенно для алмазов новых площадей) во многих случаях могут указать на парагенезис алмазов, даже когда характеристические минеральные включения не обнаружены, и способствуют выделению и генетической интерпретации разновидностей алмазов. Изотопия может указать на различия алмазов даже в случае конвергентности других их признаков, поэтому этот метод должен быть обязательным элементом в комплексе исследований алмазов для решения геологоразведочных задач, в первую очередь для идентификации россыпей.

Из множества методов оптической спектроскопии наиболее широкое применение в практике исследования алмазов получило изучение спектров оптического поглощения и люминесценции, причём возбуждение последней может быть реализовано различными методами: с использованием оптического (лазерного) излучения, рентгеновских лучей или пуска электронов. По аппаратурному оформлению (типы спектрометров, источников света и приёмников) и физическим принципам спектры оптического поглощения разделяются на два основных диапазона: 2–50 мкм (микрон), или  $5000\text{--}200 \text{ см}^{-1}$  (преимущественно колебательные процессы); 0,2–2 мкм, или  $50\,000\text{--}5000 \text{ см}^{-1}$  (электронные переходы, иногда с участием фононов). Достоинства адсорбционной спектроскопии в средней ИК-области при исследовании природных алмазов следующие:

- возможность количественно оценить концентрации одновременно нескольких азотных (C, A, B1, B2) центров, а также центров с участием бора и водорода, благодаря чему можно определить тип кристаллов в рамках физической классификации (Ia, Ib, IIa, IIb, III);
- достаточно высокая чувствительность;
- экспрессность;
- наличие коммерческих моделей спектрометров в комплексе с ИК-микроскопом.

В достаточной степени в настоящей статье охарактеризованы: адсорбционная спектроскопия в области электронных переходов (УФ-

ближняя ИК-область спектра); центры С, А, В1 с участием бора, простейшие собственные точечные дефекты, протяжённые собственные дефекты (дислокации), дополнительные дефекты и окраска природных алмазов.

Применение электронного (ЭПР), или спинового (ЭСР), парамагнитного резонанса наиболее эффективно, если в минерале имеются неспаренные электроны. Взаимодействие магнитных моментов этих электронов с приложенным магнитным полем создаёт условия для наблюдения ЭПР, который может наблюдаться и анализироваться во всех веществах и в любых агрегатных состояниях, если в них содержатся элементы с неспаренными спинами. К ним относятся [4, 7, 16–18]:

- атомы с нечётным числом электронов (N и H);
- ионы с частично заполненными электронными оболочками (ионы переходных групп):
  - 3d (группа железа) – Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu;
  - 4d (группа палладия) – Nb, Mo, Tc, Rr, Ru, Pd, Ag, Zr;
  - 5d (группа платины) – Hf, Ta, W, Re, Os, Ir, Pt, Au;
  - 4f (группа редких земель) – Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb;
  - 5f (группа актиноидов) – Th, Po, U, Np, Pu, Am, Cm, Bk;
- молекулы с нечётным числом электронов (NO);
- свободные радикалы (CH<sub>3</sub>);
- электронно-дырочные центры – электроны или дырки, локализованные в дефектных позициях кристаллической структуры.

Нижний предел концентраций парамагнитных центров в веществе определяет чувствительность приборов. Для современных спектрометров он составляет ~ 10<sup>13</sup> спинов на 1 см<sup>3</sup> вещества. Присутствие какого-либо иона в повышенных количествах препятствует наблюдению других ионов. При обзоре исследований дефектов в структуре алмаза методом ЭПР детально охарактеризованы примесные азотные парамагнитные центры в природных алмазах типа Ib, Ia, ионах никеля в структуре кристаллов, электронное состояние никелевых дефек-

тов и собственные дефекты структуры минерала. Из анализа природы собственных радиационных дефектов можно сделать заключение об особенностях процессов образования сложных собственных дефектов в алмазе с участием вакансий и межузлий, а также о температуре постростового пребывания кристаллов при радиационном воздействии и пластической деформации в природных условиях. Электронный парамагнитный резонанс алмазов – эффективное средство изучения примесных центров и собственных дефектов алмазов, дополняющее возможности оптической спектроскопии. Кроме того, этот метод даёт наиболее точную информацию о содержании структурной примеси донорного азота (форма С).

*Методика спектроскопии комбинационного рассеяния (КР)* основывается на использовании лазеров и заключается в том, что фотон лазерного излучения неупруго рассеивается в веществе с изменением частоты (энергии) и волнового вектора. Эта разность энергии и импульса (волнового вектора) фотона передаётся веществу с поглощением энергии в случае стоксовского рассеяния и с выделением энергии – в случае антистоксовского. При стоксовском рассеянии в веществе возбуждаются колебания атомов или электронов (электронное КР). При исследовании минералов методом КР обычно применяют стоксовское рассеяние первого порядка, при котором рассеянный фотон света возбуждает в кристалле один фотон, т. е. квант колебаний атомов определённой частоты. КР-спектроскопия широко используется для анализа как самого алмаза, так и различных включений в нём. Размеры доступных для изучения включений – 5–200 мкм. КР является удобным неразрушающим инструментом для анализа состава газовой-жидкостных включений в алмазе. Обычно определяется состав смеси CO<sub>2</sub>-N<sub>2</sub>-CO-CH<sub>4</sub>-C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>-C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>-C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>-H<sub>2</sub> и ряда других газов во включениях. Методом КР можно диагностировать твёрдые включения (графит, кварц, омфацит, оливин, коэсит, шпинель, гранат и другие минералы), а также состав газовой смеси во включениях в алмазе. Включения в алмазе могут быть использованы и для расчёта условий роста алмаза.

Визуальная идентификация включений в алмазе с использованием бинокулярного микроскопа не всегда даёт правильный результат в силу оптических особенностей минеральных включений в алмазе, а также субъективного подхода исследователя. Следовательно, спектроскопическое исследование минералов-включений позволяет исключить все недостатки, связанные с идентификацией включений визуально.

Один из современных и инновационных подходов в изучении включений в алмазе – метод рамановской спектроскопии. На основе использования конфокального рамановского микроскопа Invia (Renishaw) возможна диагностика минеральных включений в алмазе [7, 8]. Спектр комбинационного рассеяния алмаза имеет одну из самых интенсивных полос – около  $1332\text{ см}^{-1}$ , что, в свою очередь, усложняет процесс регистрации КР-спектра минерального включения. В то же время большое количество рамановских спектров известных минералов, находящихся в библиотеке WIRE, записаны в области от 0 до  $1200\text{ см}^{-1}$ , что даёт возможность регистрировать спектр включения алмаза до  $1200\text{ см}^{-1}$ , обходя высокоинтенсивную линию рамановского отражения алмаза. Стоит отметить, что характеристическая 41-я полоса комбинационного рассеяния включения графита расположена после алмазной линии около  $1600\text{ см}^{-1}$ .

Большое значение в опубликованных работах уделяется составу ИМК. Так, главными особенностями состава гранатов ультраосновных парагенезисов в кимберлитах являются широкий диапазон содержаний кальциевого компонента 1–85 мол. % для гранатов из кимберлитов и 2–65 мол. % – для гранатов из ксенолитов пород ультраосновных парагенезисов ( $f = \text{Fe} / (\text{Fe} + \text{Mg})$ ) меняется от 9 до 37 %, закономерно возрастая в такой последовательности ассоциаций и типов пород: гарцбургит-дуниты – зернистые лерцолиты – катаклазированные лерцолиты – ильменитовые лерцолиты + ильменитовые верлиты). В этом же ряду отмечена тенденция роста содержания андрадитового и титан-андрадитового минала – от первых до 17 мол. %. В комплексе магнезиаль-

ных гранатов в кимберлитовых концентратах резко преобладают пиропы лерцолитового парагенезиса. Малокальциевые хромсодержащие пиропы гарцбургит-дунитового парагенезиса в переменных количествах (0,1–21 отн. %) присутствуют обычно в алмазоносных кимберлитах, хотя имеются редкие исключения. Богатые кальциевым компонентом гранаты верлитового парагенезиса в количестве от долей до 6 отн. % встречаются как в алмазоносных (чаще), так и в неалмазоносных (реже) трубках. Результаты изучения комплекса гранатов ультраосновных парагенезисов из концентратов лампроитовых трубок Западной Австралии показывают присутствие в них всех типов парагенетических гранатов, характерных для кимберлитов, в том числе малокальциевых хромсодержащих пиропов гарцбургит-дунитового парагенезиса в алмазоносных лампроитах.

Значительное место в изучении алмаза занимают данные по *типоморфизму алмазов и ИМК* при решении геологоразведочных задач. Общеизвестно, что алмаз и его минералы-спутники – главные индикаторы при шлихо-минералогическом методе поисков коренных алмазных месторождений. Под типоморфизмом понимается способность минерала отражать в своих структурных, морфологических, физических, химических и других свойствах и особенностях условия среды, в которой он зарождался, рос, существовал на протяжении всей своей истории. Типоморфизм как отражение на минерале условий геологической среды и их изменений позволяет решать обратную задачу по реконструкции характера этих условий (типоморфный анализ), а онтогенический анализ типоморфных особенностей – задачу последовательности смены геологических условий на протяжении существования минерала. Известно, в каких морфологических особенностях ИМК отражаются условия гипергенеза, диагенеза, метасоматоза и метагенеза; имеются также сведения о связи степени механического износа минералов с характером литодинамической обстановки формирования ореолов. Решение обратной задачи – реконструкции геологических условий на основе типоморфизма минералов – требует предваритель-



ного решения прямой задачи, т. е. выявления взаимного соответствия той или иной особенности минералов конкретной геологической обстановке. Прямая задача решается либо фенологическим путём (через наблюдение эталонных объектов, в которых связь между типоморфной особенностью минералов и характером среды представляется очевидной), либо экспериментально, либо теоретически. Практика показывает, что она не всегда может быть решена с достаточной полнотой.

Одной из важнейших черт минералов является способность сохранять в своих типоморфных особенностях сведения о тех периодах геологической истории, документы о которых в форме геологических тел не сохранились. По типоморфизму ИМК удаётся воссоздать даже фациальный характер древних коллекторов, что иногда невозможно сделать чисто геологическими методами в связи с отсутствием объекта исследований – размытой осадочной толщи.

## Список литературы

1. *Афанасьев В. П., Елисеев А. П., Надолинный В. А., Зинчук Н. Н., Коптиль В. И., Рылов Г. М., Томиленко А. А., Горяйнов С. В., Юрьева О. П., Сонин В. М., Чепуров А. И.* Минералогия и некоторые вопросы генезиса алмазов V и VII разновидности (по классификации Ю. Л. Орлова) // Вестник Воронежского университета. Серия: Геология. – 2000. – № 5 (10). – С. 79–96.
2. *Афанасьев В. П., Зинчук Н. Н.* Минералогия древних россыпей алмазов восточного борта Тунгусской синеклизы // Геология и геофизика. – 1987. – № 1. – С. 90–96.
3. *Афанасьев В. П., Зинчук Н. Н.* Основные литодинамические типы ореолов индикаторных минералов кимберлитов и обстановки их формирования // Геология рудных месторождений. – 1999. – Т. 41, № 3. – С. 281–288.
4. *Афанасьев В. П., Зинчук Н. Н., Коптиль В. И.* Полигенез алмазов в связи с проблемой коренных россыпей северо-востока Сибирской платформы // Доклады Академии наук. – 1998. – Т. 361, № 3. – С. 366–369.
5. *Афанасьев В. П., Зинчук Н. Н., Логинова А. Н.* Особенности распределения россыпных алмазов, связанных с докембрийскими источниками // Записки Российского минералогического общества. – 2009. – Т. 138, № 2. – С. 1–13.
6. *Афанасьев В. П., Зинчук Н. Н., Тычков С. А.* Проблема алмазоносности Сибирской платформы // Вестник Воронежского госуниверситета. Серия: Геология. – 2002. – № 1. – С. 19–36.
7. *Бардухинов Л. Д.* Особенности алмазов и состав включений в них как поисковые признаки на примере Накынского и Алакит-Мархинского кимберлитовых полей : специальность 25.00.11 «Геология, поиски и разведка твёрдых полезных ископаемых, минерагения» : автореф. дис. на соискание учёного степеня кандидата геолого-минералогических наук / Бардухинов Леонид Данилович. – Улан-Удэ : ГИН СО РАН, 2020. – 21 с.
8. *Бардухинов Л. Д., Спеццус З. В., Липашова А. Н.* Структурные дефекты и минеральные включения в алмазах из кимберлитовых трубок Накынского и Алакит-Мархинского полей по данным КР- и ИК-спектроскопии // Руды и металлы. – 2018. – № 4. – С. 76–86.
9. *Василенко В. Б., Зинчук Н. Н., Кузнецова Л. Г.* Геодинамический контроль размещения кимберлитовых полей центральной и северной частей Якутской кимберлитовой провинции (петрохимический аспект) // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. – 2000. – № 3 (9). – С. 37–55.
10. *Василенко В. Б., Толстов А. В., Кузнецова Л. Г., Минин В. А.* Петрохимические критерии алмазоносности кимберлитовых месторождений Якутии // Геохимия. – 2010. – № 4. – С. 366–376.
11. *Зинчук Н. Н.* Сравнительная характеристика вещественного состава коры выветривания кимберлитовых пород Сибирской и Восточно-Европейской платформ // Геология и геофизика. – 1992. – № 7. – С. 99–109.
12. *Зинчук Н. Н., Борис Е. И., Яныгин Ю. Б.* Особенности минерагении алмаза в древних осадочных толщах (на примере верхнепалеозойских отложений Сибирской платформы). – М. : МГТ, 2004. – 172 с.
13. *Зинчук Н. Н., Зуев В. М., Коптиль В. И., Чёрный С. Д.* Стратегия ведения и результаты алмазопоско-



- вых работ // Горный вестник. – 1997. – № 3. – С. 53–57.
14. Зинчук Н. Н., Коптиль В. И., Борис Е. И., Липашова А. Н. Типоморфизм алмазов из россыпей Сибирской платформы как основа поисков алмазных месторождений // Руды и металлы. – 1999. – № 3. – С. 18–30.
15. Зинчук Н. Н., Мельник Ю. М., Серенко В. П. Апокимберлитовые породы // Геология и геофизика. – 1987. – № 10. – С. 66–72.
16. Зинчук Н. Н., Савко А. Д., Крайнов А. В. Труды НИИ геологии Воронежского государственного университета. Выпуск 68. Кимберлиты в истории Земли. – Воронеж : ВГУ, 2013. – 99 с.
17. Кедрова Т. В., Богоуш И. В., Зинчук Н. Н., Бардухинов Л. Д., Липашова А. Н. Алмазы укугутской свиты россыпи Нюрбинская, Накынское кимберлитовое поле Сибирской платформы // Руды и металлы. – 2020. – № 2. – С. 69–77.
18. Кедрова Т. В., Богоуш И. В., Зинчук Н. Н., Бардухинов Л. Д., Липашова А. Н. Типоморфные свойства алмазов из дяхтарской толщи россыпи Нюрбинская (Сибирская платформа) // Вестник Воронежского университета. Серия: Геология. – 2020. – № 3. – С. 45–54.
19. Котельников Д. Д., Зинчук Н. Н. Кристаллохимические и структурные особенности глинистых минералов в корах выветривания в зависимости от типа исходных пород // Бюллетень Московского общества испытателей природы. Отдел геологический. – 2001. – Т. 76, № 3. – С. 69–79.
20. Орлов Ю. Л. Минералогия алмаза. – 2-е изд. – М. : Наука, 1984. – 264 с.
21. Соболев Н. В., Соболев А. В., Томиленко А. А., Кузьмин Д. В., Граханов С. А., Батанов В. Г., Логвинова А. М., Бульбак Т. А., Костровицкий С. И., Яковлев Д. А., Фёдорова Е. Н., Анастасенко Г. Ф., Ниженко Е. И., Толстов А. В., Реутский В. Н. Перспективы поисков алмазоносных кимберлитов в Северо-Восточной части Сибирской платформы // Геология и геофизика. – 2018. – Т. 59, № 10. – С. 1701–1719.
22. Харьков А. Д., Зуенко В. В., Зинчук Н. Н., Крючков А. И., Уханов А. В., Богатых М. М. Петрохимия кимберлитов. – М. : Недра, 1991. – 304 с.
23. Хитров В. Г., Зинчук Н. Н., Котельников Д. Д. Применение кластер-анализа для выяснения закономерностей выветривания пород различного состава // Доклады Академии наук СССР. – 1987. – Т. 296, № 5. – С. 1228–1233.
24. Afanas'ev V. P., Zinchuk N. N., Griffin V. L. Diamond prospects in the Southwestern plinkt of the Tungusk Sineklise // Geology of ore Deposits. – 2005. – V. 47, № 1. – P. 45–62.
25. Grachanov S. A., Zinchuk N. N., Sobolev N. V. The age of Predictable primary diamond sources in the Northeastern Siberian platform // Doklady Eart Sciences. – 2015. – V. 465, № 2. – P. 1297–1301.
26. Kotelnikov D. D., Zinchuk N. N. Comparative analysis of clay Mineral evolution under the Conditions of humid and arid Lithogenesis // Russian Geology and Geophysics. – 2008. – № 10. – P. 121–144.
27. Serov I. V., Garanin V. K., Zinchuk N. N., Rotman A. Ya. Mantle Sources of the kimberlite Vorcanism of the Siberian Platform // Petrology. – 2001. – V. 9, № 6. – P. 576–588.

## References

1. Afanasiev V. P., Yeliseev A. P., Nadolinny V. A., Zinchuk N. N., Koptil V. I., Pilov G. M., Tomilenko A. A., Goryanov S. V., Yurieva O. P., Sonin V. M., Chepurov A. I. Mineralogiya i nekotorye voprosy genezisaalmazov V i VII raznovidnosti (po klassifikatsii Yu. L. Orlova) [Mineralogy and some issues of variety V and VII diamonds genesis (by classification of Y. L. Orlov)], *Vestnik Voronezhskogo universiteta. Seriya: Geologiya* [Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology], No 5 (10), pp. 79–96. (In Russ.).
2. Afanasiev V. P., Zinchuk N. N. Mineralogiya drevnikh rossypeialmazov vostochnogo borta Tunguskoi sineklizy [Minerageny of ancient placers of diamonds on the eastern side the Tunguska syneclise], *Geologiya i geofizika* [Russian Geology and Geophysics], 1987, No 1, pp. 90–96. (In Russ.).
3. Afanasiev V. P., Zinchuk N. N. Osnovnye litodinamicheskie tipy oreolov indikatornykh mineralov kимберлитов i obstanovki ikh formirovaniya [Main types of litodynamic tipe of kimberlite indication minerals and the conditions of their formation], *Geologiya rudnykh mestorozhdenii* [Geology of Ore Deposits], 1999, V. 41, No 3, pp. 281–288. (In Russ.).
4. Afanasiev V. P., Zinchuk N. N., Koptil V. I. Poligenezalmazov v svyazi s problemoi korennykh rossypei

- severo-vostoka Sibirskoi platformy [Poligines of diamonds in connection with the problem of primary placers of the north-east of the Siberian platform], *Doklady Akademii nauk [Reports of the Academy of Sciences]*, 1998, V. 361, No 3, pp. 366–369. (In Russ.).
5. Afanasiev V. P., Zinchuk N. N., Loginova A. N. Osobennosti raspredeleniya rossypnykhalmazov, svyazannykh s dokembriiskimi istochnikami [Distribution features of placer diamonds associated with the Precambrian source], *Zapiski Rossiiskogo mineralogicheskogo obshchestva [Notes of the Russian Mineralogical Society]*, 2009, V. 138, No 2, pp. 1–13. (In Russ.).
  6. Afanasiev V. P., Zinchuk N. N., Tichkov S. A. Problema almazonosnosti Sibirskoi platformy [The problem of dokembriy diamond content of the Siberian platform], *Vestnik Voronezhskogo gosuniversiteta. Seriya: Geologiya [Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology]*, 2002, No 1, pp. 19–36. (In Russ.).
  7. Barduchinov L. D. Osobennostialmazov i sostav vkladyucheniiv nikh kak poiskovyepriznaki na primere Nakynskogo i Alakit-Markhinskogo kimberlitovykh polei [Features of diamonds and the composition of inclusions in them as search signs on the example of the Nakyn and Alakit-Markhinsky kimberlite fields: abstract of candidate's thesis], Ulan-Ude, GIN SO RAN Publ., 2020, 21 p.
  8. Bardukhinov L. D., Spetsius Z. V. Strukturnye defekty i mineral'nye vklucheniya valmazakh iz kimberlitovykh trubok Nakynskogo i Alakit-Markhinskogo polei po dannym KR- i IK-spektroskopii [Structural defects and mineral inclusion in diamonds from kimberlite pipes of the Nakyn and Alakit-Markhinsky fields a KR- and IK-spectroscopy], *Rudy i metallu [Ores and Metals]*, 2018, No 4, pp. 76–86. (In Russ.).
  9. Vasilenko V. B., Zinchuk N. N., Kuznetsova L. G. Geodinamicheskii kontrol' razmeshcheniya kimberlitovykh polei tsentral'noi i severnoi chastei Yakutskoi kimberlitovoi provintsii (petrokhimicheskii aspekt) [Geodynamic control of kimberlite fields' allocation of central and northern part of Yakutian kimberlite province (petrochemical aspect)], *Vestnik Voronezhskogo gosuniversiteta. Seriya: Geologiya [Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology]*, 2000, No 3 (9), pp. 37–55. (In Russ.).
  10. Vasilenko V. B., Kuznetsova L. G., Minin V. A., Tolstov A. V. Petrokhimicheskie kriterii almazonosnosti kimberlitovykh mestorozhdenii Yakutii [Petrochemical evaluation of the Diamond potentials of Yakutian kimberlite fields], *Geokhimiya [Geochemistry International]*, 2010, V. 48, No 4, pp. 346–354. (In Russ.).
  11. Zinchuk N. N. Sravnitel'naya kharakteristika veshchestvennogo sostava kory vyvetrivaniya kimberlitovykh porod Sibirskoi i Vostochno-Evropeskoi platformy [Comparative characteristics of material composition of kimberlite rocks' crusts of weathering of the Siberian and East-European platforms], *Geologiya i geofizika [Russian Geology and Geophysics]*, 1992, No 7, pp. 99–109. (In Russ.).
  12. Zinchuk N. N., Boris E. I., Yanigin Yu. T. Osobennosti mineragenii almaza v drevnikh osadochnykh tolshchakh (na primere verkhnepaleozoiskikh otlozhenii Sibirskoi platformy) [Peculiarities of diamond mineralogene in ancient sedimentary talits by the example of the upper Paleozoic Sediments the Siberian platform], Moscow, MGT Publ., 2004, 172 p.
  13. Zinchuk N. N., Zuev V. M., Koptil V. I., Cherny S. D. Strategiya vedeniya i rezul'taty almazopoiskovykh rabot [Diamond management strategy and results], *Gornyi vestnik [Mountain Bulletin]*, 1997, No 3, pp. 53–57. (In Russ.).
  14. Zinchuk N. N., Koptil V. I., Boris E. I., Lipashova A. N. Tipomorfizmalmazov iz rossypei Sibirskoi platformy kak osnova poiskovalmaznykh mestorozhdenii [Typomorphism of diamonds from placers of the Siberian platform as the basis for prospecting of diamond deposits], *Rudy i metallu [Ores and Metals]*, 1999, No 3, pp. 18–30. (In Russ.).
  15. Zinchuk N. N., Melnik Yu. M., Serenko V. P. Apokimberlitovye porody [Apokimberlite rocks], *Geologiya i geofizika [Russian Geology and Geophysics]*, 1987, No 10, pp. 66–72. (In Russ.).
  16. Zinchuk N. N., Savko A. D., Krainov A. V. Trudy NII geologii Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Vypusk 68. Kimberlity v istorii Zemli [Kimberlites in the Earth history. Proceedings of VSU geological SRI. Tutorials. Is. 68], Voronezh, VGU Publ., 2013, 99 p.
  17. Kedrova T. V., Bogush I. N., Zinchuk N. N., Bardukhinov L. D., Lipashova A. N. Almazny ukgutskoi svity rossypi Nyurbinskaya, Nakynskoe kimberlitovoe pole Sibirskoi platformy [Diamonds from the Ukgut suite of the Nyurbinskaya placer (Nakyn kimberlite field)], *Rudy i metallu [Ores and Metals]*, 2020, pp. 69–77. (In Russ.).
  18. Kedrova T. V., Bogush I. N., Zinchuk N. N., Bardukhinov L. D., Lipashova A. N. Tipomorfnyesvoistvaalmazov iz dyakhtarskoi tolshchi rossypi Nyurbinskaya-





- ya (Sibirskaya platforma) [Typomorphic properties of Diamonds from the Nyurbinskaya placer (Siberians platform)], *Vestnik Voronezhskogo universiteta. Seriya: Geologiya* [Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology], 2020, No 3, pp. 45–54. (In Russ.).
19. Kotelnikov D. D., Zinchuk N. N. Kristallokhimicheskie i strukturnye osobennosti glinistyykh mineralov v korakh vyvetrivaniya v zavisimosti ot tipa iskhodnykh porod [Crystal-chemical and structural features of clay minerals in weathering crusts depending on the type of source rocks], *Byulleten' Moskovskogo obshchestva ispytatelei prirody. Otdel geologicheskii* [Bulletin of the Moscow Society of Nature Tests. Department Geological], 2001, V. 76, No 3, pp. 69–79. (In Russ.).
20. Orlov Y. L. Mineralogiya almaza [Mineralogy of diamond], Moscow, Nauka Publ., 1984, 264 p.
21. Sobolev N. V., Sobolev A. V., Tomilenko A. A., Kuzmin D. V., Grakhanov S. A., Batanov V. G., Logvinova A. M., Bulbak T. A., Kostrovitsky S. I., Yakovlev D. A., Fedorova E. N., Anastasenko G. F., Nikolenko E. I., Tolstov A. V., Reutsky V. N. Perspektivy poiskov almazonosnykh kimberlitov v Severo-Vostochnoi chasti Sibirskoi platformy [Prospects of search for diamondiferous kimberlites in the northeastern Siberian platform], *Geologiya i geofizika* [Russian Geology and Geophysics], 2018, V. 59, No 10, pp. 1701–1719. (In Russ.).
22. Charkiv A. D., Zuenko V. V., Zinchuk N. N., Krutchkov A. I., Uchanov A. V., Bogatich M. M. Petrokhimiya kimberlitov [Petrochemistry of kimberlite], Moscow, Nedra Publ., 1991, 304 p.
23. Chitrov V. G., Zinchuk N. N., Kotelnikov D. D. Primenenie klaster-analiza dlya vyyasneniya zakonmernosti vyvetrivaniya porod razlichnogo sostava [Application of cluster-analysis for clearing out regularities of various composition rocks' weathering], *Doklady Akademii nauk SSSR* [Reports of the USSR Academy of Sciences], 1987, V. 296, No 5, pp. 1228–1233. (In Russ.).
24. Afanas'ev V. P., Zinchuk N. N., Griffin V. L. Diamond prospects in the Southwestern plinkt of the Tungusk Sineklise, *Geology of ore Deposits*, 2005, V. 47, No 1, pp. 45–62.
25. Grachanov S. A., Zinchuk N. N., Sobolev N. V. The age of Predictable primary diamond sources in the Northeastern Siberian platform, *Doklady Earth Sciences*, 2015, V. 465, No 2, pp. 1297–1301.
26. Kotelnikov D. D., Zinchuk N. N. Comparative analysis of clay Mineral evolution under the Conditions of humid and arid Lithogenesis, *Russian Geology and Geophysics*, 2008, No 10, pp. 121–144.
27. Serov I. V., Garanin V. K., Zinchuk N. N., Rotman A. Ya. Mantle Sources of the kimberlite Vorcanism of the Siberian Platform, *Petrology*, 2001, V. 9, No 6, pp. 576–588.

## Авторы

### **Зинчук Николай Николаевич**

доктор геолого-минералогических наук  
профессор, академик АН РС (Я)  
главный научный сотрудник  
nnzinchuk@rambler.ru

### **Бардухинов Леонид Данилович**

кандидат геолого-минералогических наук  
заведующий лабораторией  
BardukhinovLD@alrosa.ru

Научно-исследовательское геологическое предприятие  
(НИГП) АК «АЛРОСА» (ПАО)»,  
г. Мирный

## Authors

### **Zinchuk Nikolay Nikolaevich**

PhD  
Professor, Academician  
Chief researcher  
nnzinchuk@rambler.ru

### **Bardukhinov Leonid Danilovich**

PhD  
Head of laboratory  
BardukhinovLD@alrosa.ru

JSC ALROSA (PJSC)  
Mirny, Russia



## Алмазы «полуночных земель» России

### Diamonds of Russia's «midnight lands»

**Каржавин В. К.**

Углерод и углеродсодержащие соединения установлены на всей территории Кольского полуострова. На основе петролого-геохимического исследования метаморфизма основных и ультраосновных пород сделано предположение о наличии алмазных проявлений в северо-западных районах Кольского полуострова.

Ключевые слова: углерод, органические соединения, трубки взрыва, алмаз, карбонаты, кимберлиты, метаморфические породы.

**Karzhavin V. K.**

Carbon and carbon-rich organics were identified throughout the Kola peninsula. Based on petrological and geochemical study of basic and ultrabasic rock metamorphism, diamond occurrences are assumed in the north-western Kola peninsula.

Keywords: carbon, organics, explosion pipes, diamond, carbonates, kimberlites, metamorphic rocks.

---

Для цитирования: © Каржавин В. К. Алмазы «полуночных земель» России. Руды и металлы. 2021. № 3. с. 76–81. DOI: 10.47765/0869-5997-2021-10019.

For citation: © Karzhavin V. K. Diamonds of Russia's «midnight lands». Ores and metals, 2021, № 3, pp. 76–81. DOI: 10.47765/0869-5997-2021-10019.

Кианитовые сланцы свиты кейв уникальны в геологическом, геохимическом и минералогическом аспектах [2], что определяется углеродом и основными минералами в их составе. Кейвы – это возвышенность в центральной части Кольского полуострова, протянувшаяся сплошной полосой на 200 км с запада на восток. Разнообразие руд одноимённой свиты, связанных с многообразием форм выделения кианита и граната (альмандин) свидетельствует о том, что они содержат минералы, чутко реагирующие на изменения геологических условий их образования. Глубокий региональный метаморфизм, при котором сформировались кианитовые сланцы Кейв, протекал в присутствии углеродсодержащих соединений. В кианит-силлиманитовых сланцах свиты кейв наряду с оксидами углерода и углеводородными газами парафинового ряда методом ДТА установлено одновременное присутствие двух различных модификаций углерода – аморфной и кристаллической. Тёмный цвет кианитовых сланцев связан именно с присутствием в них тонкодисперсного углеродистого вещества (графитоида). Его содержание достигает 3,43 % [6]. Наиболее обогащены им конкреционные образования кианитового сланца. На рис. 1 представлен двухцветный образец кианита, который был использован для проведения экспериментального исследования.

В связи со сложной процедурой разложения минералов группы  $Al_2SiO_5$  были предприняты два варианта кислотного вскрытия обоих (светлого и тёмного) образцов кианита после их измельчения. Первый – спеканием при 600 °С с содой и смесью кислот (плавиковой и серной в соотношении 1 : 1). После тщательной промывки образовавшихся осадков были получены несколько образцов, а высушенные остатки были подвержены мощному рентгеновскому облучению (рентгеновский комплекс Precision RXi). Были проведены исследования фракций образцов рентгеном различной мощности. Наличие люминесценции (слабого свечения) прослеживается после облучения только тёмного кианита. По нашему мнению, полученный результат показывает присутствие в тёмном кианите наноразмерных алмазов (рис. 2).

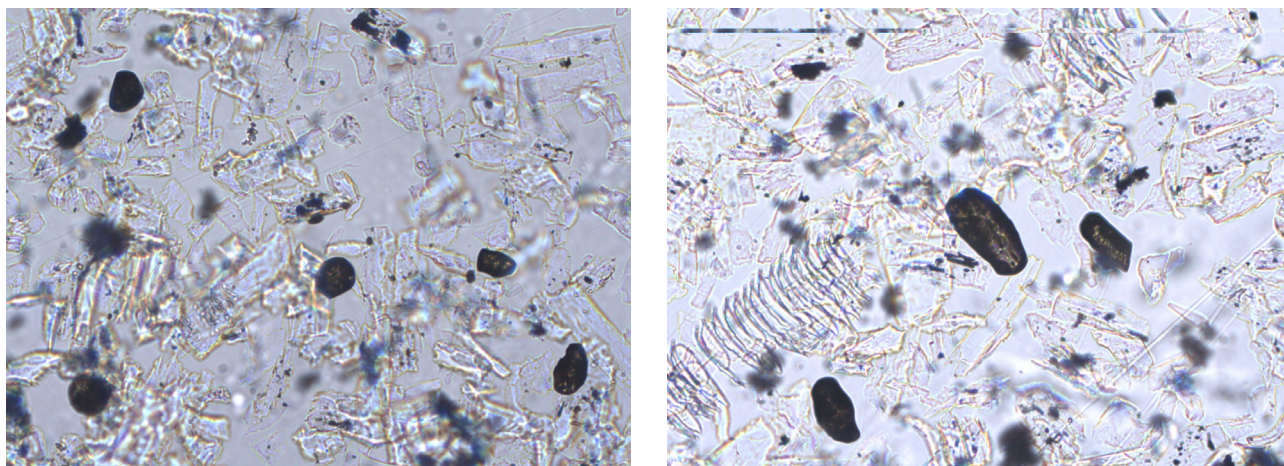


Рис. 1. Образец двухцветного кианита свиты кейв

Fig. 1. Dichromatic kyanite sample of the Cave Formation

На фотографиях представлены результаты кристаллооптического исследования образцов, у которых были зафиксированы слабые следы флюоресценции на рентгеновских плёнках. Концентрация тёмных (графитизированных) округлых частиц незначительная с величиной показателя преломления  $n \gg 1,90$  (для природного алмаза  $n \approx 2,41$ ), что значительно выше, чем значение данного параметра у кианитов. Это позволяет нам считать их наноалмазами в так называемых графитовых рубашках, с существованием которых у алмаза в настоящее время многие авторы согласны [9].

Графитовая оболочка образуется за счёт графитизации на регрессивном этапе метаморфизма. Это медленный процесс, который сопровождает выделение энергии величиной в 2,18 кДж/моль. Именно это явление отмечают многие исследователи алмазов различных месторождений, в которых встречаются кристаллы в «графитовых рубашках». В процессе медленного падения общего давления на определённых этапах метаморфизма в сложной природной системе происходит преобразование алмаза в графит. Проведённые нами эксперименты позволили оценить возможность присутствия в кианите наряду с углеродом и алмаза.



**Рис. 2. Результаты кристаллооптического исследования образцов, у которых были зафиксированы слабые следы флюоресценции на рентгеновских плёнках**

**Fig. 2. Results of crystal-optical examination of samples with minor fluorescence traces on X-ray films**

Для подтверждения полученных экспериментальных данных необходимо провести теоретические физико-химические исследования. На рис. 3 представлено совмещение  $P$ - $T$  диаграммы  $Al_2SiO_5$  с  $P$ - $T$  диаграммой фазового равновесия алмаз – углерод. Такое совмещение качественно указывает на интересные выводы для исследуемого природного объекта.

Из рисунка видно, что в системе кианит – силлиманит – андалузит области существования метастабильного алмаза, графита и алмаза с метастабильным графитом фазовой диаграммы алмаз – графит имеют аналогичные термодинамические параметры. Это означает, что в  $P$ - $T$  области существования кианита и метастабильного алмаза с графитом не исключена возможность кристаллизации и совместного существования обеих полиморфных модификаций углерода. Отсюда следует, что их совместная кристаллизация в алюмосиликатной системе свидетельствует об относительно низкотемпературных условиях их образования (при температуре ниже  $1000\text{ }^\circ\text{C}$ ).

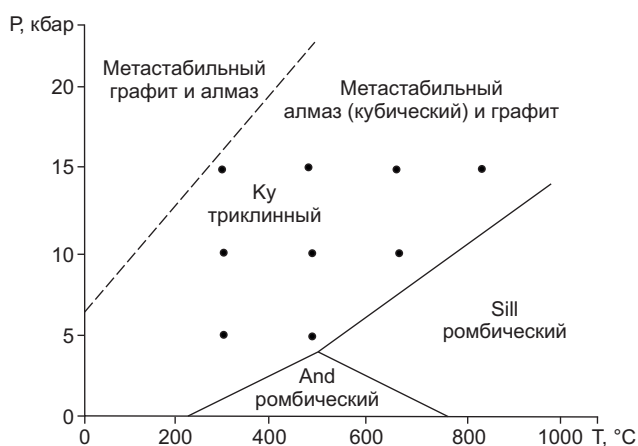
В связи с этим было проведено физико-химическое моделирование с использованием расчётных систем (векторов) с  $P$ - $T$  параметрами. Для теоретических расчётов основными компонентами алюмосиликатной системы в

составе твёрдой фазы приняты кианит, силлиманит, андалузит, а также гранат (альмандин, пироп) с углеродом и ряд газообразных соединений системы  $C - H - O$ . Теоретическое исследование было проведено в широких интервалах температуры и давления [8]. В зависимости от  $P$ - $T$  параметров исследуемой системы и концентрации углерода удалось установить некоторые характерные особенности и прийти к следующему выводу.

Из полученного расчётного материала следует, что в  $P$ - $T$  области существования кианита в системе кианит – силлиманит – андалузит и области метастабильного алмаза с графитом кристаллизация и совместное существование обеих полиморфных модификаций углерода возможна при температуре ниже  $1000\text{ }^\circ\text{C}$ . При этом основные минералы в составе твёрдой фазы исследуемых систем – кианит и гранат.

Присутствие углеродсодержащих соединений установлено для всей территории Кольского полуострова многими исследователями [7, 11]. В метаморфических комплексах северо-западной части Кольского полуострова известно более ста проявлений высокоуглеродистых пород и карбонатов с содержанием углерода от 5 до 90 % [1]. В районе северного контакта Лапландского гранулитового пояса установлены





**Рис. 3. Совмещенная  $P$ - $T$  диаграмма  $Al_2SiO_5$  с фазовой  $P$ - $T$  диаграммой состояния углерода:**

точки – расчётные систем (векторов) с  $P$ - $T$  параметрами; Ку – кианит; Sill – силлиманит; And – андалузит

**Fig. 3.  $P$ - $T$  diagram of  $Al_2SiO_5$ , combined with phase  $P$ - $T$  diagram of the state of carbon:**

points – design systems (vectors) with  $P$ - $T$  parameters; Ку – kyanite; Sill – sillimanite; And – andalusite

высокоуглеродистые породы, что не исключает присутствия в них алмазов.

Возможность открытия алмазов в «полуночных землях» России предсказал ещё основоположник русской горной науки, минералогии и химии М. В. Ломоносов в книге «О слоях земных»: «... в Севере... не можем сомневаться, что могли произойти алмазы... и могут отыскаться» (1763 г.), как предвидел и то, что Россия будет прирастать Сибирью и Севером, в том числе и за счёт алмазов.

Действительно, алмазы на Кольском полуострове впервые были обнаружены Ш. Веленом в конце 1891 г. в форме мелких кристалликов (0,25–1,25 мм) среди образцов песка, привезённых французским географом Шаленом Рабо (1885 г.) с реки Паз Печенгского района на границе с Норвегией [12]. Однако последующие детальные поиски алмазов в этом районе Кольского полуострова не дали положительных результатов.

В 80-х гг. в соседней с Мурманской областью, Архангельской, был открыт ряд алмазонасных трубок взрыва. А в 1986 г. на Терском берегу Белого моря (Кольский полуостров) также были найдены две алмазонасные кимберлитовые трубки [13]. В одной из них (Ермаковская-7) в отобранных двух технологических пробах был обнаружен 131 алмаз, в основном размером 0,1–0,2 мм. Данные кимберлитовые трубки имеют серпентин-карбонатный (магнезит, кальцит) состав. Также проведёнными исследованиями песчано-гравийных прибрежных осадков вдоль Терского берега Кольского полуострова были найдены два кристаллика алмаза размером до 0,5 мм [5].

Кольской полуостров является северо-восточной окраиной Балтийского щита – одного из крупнейших докембрийских образований в Евразии. Геологические процессы, происходящие в настоящее время, объясняют глубинную природу скоплений углеводородов, свободно выделяющихся по трещинам и порам пород ряда массивов полуострова [3].

Печенгская вулканогенно-осадочная тектоническая структура расположена на северо-западе Кольского полуострова. Она представляет собой синклиорий, осложнённый тектоническими разломами и надвигами, сложена раннепротерозойскими вулканогенно-осадочными породами, залегающими на архейском фундаменте [10]. Здесь преобладают сульфидные медно-никелевые руды Печенгского рудного поля первичного магматического происхождения, которые были подвергнуты метаморфизму и гидротермальному воздействию в восстановительных условиях. Углеродистое вещество в незначительных количествах присутствует в осадочных породах в виде пыли или мелких чешуек размером от 0,01 до 0,03 мм. В песчаниках установлены карбонаты, которыми сложены известковые сланцы, известняки, доломиты и мраморы, причём кальцит преобладает над доломитом.

Метаморфизм Печенгской структуры – кианит-силлиманитового типа. Прогрессивный региональный метаморфизм осадочно-вулканогенных толщ раннего протерозоя, слагающих Печенгскую структурную зону, развивал-



ся от пренит-пумпеллиитовой фации до низких и средних ступеней амфиболитовой в широком диапазоне термодинамических условий ( $T$  от 270 до 428 °С,  $P$  от 120 до 350 мПа) [4]. Печенгская структурная зона вмещает промышленные месторождения медно-никелевых руд и разнообразные непромышленные проявления других типов рудной минерализации, даже графитовой [1]. Это позволяет считать се-

веро-западные районы Кольского полуострова перспективными для поисковых работ.

На основании изложенного теоретического и экспериментального материала можно считать возможным синтез алмаза в природных условиях, отличающихся от высокобарических, а также связь алмазоносности с наличием газов, рудной минерализации и самородных металлов.

## Список литературы

1. Астафьев Б. Ю., Лохов К. И., Воинова О. А., Антонов А. В., Прасолов Э. М., Матуков Д. И. Возраст, масштаб и генезис постметаморфической графитовой минерализации докембрия Кольского полуострова (Лапландский гранулитовый пояс и его обрамление) // *Метаморфизм, космические, экспериментальные и общие проблемы петрологии. Материалы Международного X всероссийского петрографического совещания «Петрография XXI века»*. – 2005. – Т. 4. – С. 26–28.
2. Бельков И. В. Кианитовые сланцы свиты Кейв (геологическое строение, кристаллические сланцы и кианитовые руды). – М. – Л. [СПб.] : АН СССР, 1963. – 321 с.
3. Введенская А. Я., Дертев А. К. Современная геодинамика, битуминозность и газоносность Кольского полуострова // *Нефтегазовая геология. Теория и практика*. – 2007. – № 2. – С. 1–7.
4. Волошина З. М., Каржавин В. К. Термодинамические условия и флюидный режим регионально метаморфизованных осадочно-вулканогенных толщ Печенгской структурной зоны // *Отечественная геология*. – 2006. – № 3. – С. 53–57.
5. Гавриленко Б. В., Корсакова О. П., Зозуля Д. Р. О возможности формирования россыпей алмазов на юго-востоке Кольского полуострова // *Геология и полезные ископаемые Кольского полуострова*. Т. 2. Полезные ископаемые, минералогия, петрология, геофизика. – Апатиты : Полиграф, 2002. – С. 13–22.
6. Гинсбург И. В., Горшков А. И. О графите кианитовых сланцев Кейв (Кольский полуостров) // Труды Минералогического музея им. А. Е. Ферсмана. – 1961. – Вып. 12. – С. 171–176.
7. Дудкин О. Б., Минаков Ф. В., Кравченко М. П., Кравченко Э. В., Кулаков А. Н., Полежаева Л. И., Припачкин В. А., Пушкарёв Ю. Д., Рюнгенен Г. И. Карбонатиты Хибин. – Апатиты : КФАН, 1984. – 98 с.
8. Каржавин В. К. Бинарная природа происхождения алмазов. – М. : Русайнс, 2019. – 142 с.
9. Колокольцев С. Н., Корсаков А. В., Шацкий В. С. Механизм образования алмазов в графитовых «рубашках» в метаморфических породах сверхвысоких давлений // *Доклады академии наук*. – 2004. – Т. 399, № 2. – С. 232–235.
10. Кольская сверхглубокая. Исследование глубинного строения континентальной коры с помощью бурения Кольской сверхглубокой скважины / гл. ред. Е. А. Козловский. – М. : Недра, 1984. – 480 с.
11. Мележик В. А., Басалаев А. А., Предовский А. А. [и др.]. Углеродистые отложения ранних этапов развития Земли (геохимия и обстановки накопления на Балтийском щите). – Л. [СПб.] : Наука, 1988. – 197 с.
12. Мельников М. П. Заметки по розыску алмазов на реке Паз в принонорвежской Лапландии // *Горный журнал*. – 1892. – Т. 1, № 3. – С. 447–465.
13. Поляков И. В., Калинин М. М. Алмазы и минералы спутники в кимберлитах и рыхлых отложениях Терского берега Кольского полуострова // *Записки Всероссийского минералогического общества*. – 1993. – № 1. – С. 96–101.

## References

1. Astaf'ev B. Yu., Lokhov K. I., Voinova O. A. Antonov A. V., Prasolov E. M., Matukov D. I. Vozrast, mashtab i genezis postmetamorфической grafitovoi mi-  
neralizatsii dokembriya Kol'skogo poluostrova (Laplandkii granulitovyi po yas i ego obramlenie) [Age, scale and genesis of postmetamorphic graphite mi-



- neralization of the Precambrian of the Kola Peninsula (Lapland granulite belt and its framing)], *Metamorfizm, kosmicheskie, eksperimental'nye i obshchie problemy petrologii. Materialy Mezhdunarodnogo Kh vserossiiskogo petrograficheskogo soveshchaniya "Petrografiya XXI veka"* [Metamorphism, cosmic, experimental and general problems of petrology. Materials of the International X All-Russian Petrographic Conference "Petrography of the XXI century"], 2005, V. 4, pp. 26–28. (In Russ.).
2. Bel'kov I. V. Kianitovye slantsy svity Keiv (geologicheskoe stroenie, kristallicheskie slantsy i kianitovye rudy) [Kyanite shales of the Keiv Formation (geological structure, crystalline shales and kyanite ores)], Moscow, Leningrad, AN SSSR Publ., 1963, 321 p.
  3. Vvedenskaya A. Ya., Dertev A. K. Sovremennaya geodinamika, bituminoznost' i gazonosnost' Kol'skogo poluostrova [Modern geodynamics, bituminous content and gas content of the Kola Peninsula], *Neftegazovaya geologiya. Teoriya i praktika [Petroleum Geology – Theoretical and Applied Studies]*, 2007, No 2, pp. 1–7. (In Russ.).
  4. Voloshina Z. M., Karzhavin V. K. Termodinamicheskie usloviya i flyuidnyi rezhim regional'no metamorfizovannykh osadochno-vulkanogennykh tolshch Pechengskoi strukturnoi zony [Thermodynamic conditions and fluid regime of regionally metamorphosed sedimentary-volcanogenic strata of the Pechenga structural zone], *Otechestvennaya geologiya [National Geology]*, 2006, No 3, pp. 53–57. (In Russ.).
  5. Gavrilenko B. V., Korsakova O. P., Zozulya D. R. O vozmozhnosti formirovaniya rossypeialmazov na yugovostoke Kol'skogo poluostrova [On the possibility of the formation of diamond placers in the southeast of the Kola Peninsula], *Geologiya i poleznye iskopaemye Kol'skogo poluostrova. T. 2. Poleznye iskopaemye, mineralogiya, petrologiya, geofizika [Geology and useful minerals of the Kola Peninsula. V. 2. Minerals, mineralogy, petrology, geophysics]*, Apatity, Poligraf Publ., 2002, pp. 13–22.
  6. Ginsburg I. V., Gorshkov A. I. O grafite kianitovykh slantsev Keiv (Kol'skii poluostrov) [About graphite of kyanite shale Cave (Kola Peninsula)], *Trudy Mineralogicheskogo muzeya im. A. E. Fersmana [Proceedings of the Mineralogical Museum A. E. Fersman]*, 1961, V. 12, pp. 171–176. (In Russ.).
  7. Dudkin O. B., Minakov F. V., Kravchenko M. P., Kravchenko E. V., Kulakov A. N., Polezhaeva L. I., Pripachkin V. A., Pushkarev Yu. D., Ryungenen G. I. Karbonatity Khibin [Khibiny carbonatites], Apatity, KFAN Publ., 1984, 98 p.
  8. Karzhavin V. K. Binarnaya priroda proiskhozhdeniyaalmazov [The binary nature of the origin of diamonds], Moscow, Rusains Publ., 2019, 142 p.
  9. Kolokol'tsev S. N., Korsakov A. V., Shatskii V. S. Mekhanizm obrazovaniyaalmazov v grafitovykh "rubashkakh" v metamorficheskikh porodakh sverkhvysokikh davlenii [The mechanism of diamond formation in graphite "jackets" in ultrahigh-pressure metamorphic rocks], *Doklady akademii nauk [Reports of the Academy of Sciences]*, 2004, V. 399, No 2, pp. 232–235. (In Russ.).
  10. Kol'skaya sverkhglubokaya. Issledovanie glubinno-go stroeniya kontinental'noi kory s pomoshch'yu bureniya Kol'skoi sverkhglubokoi skvazhiny [Kola superdeep. Investigation of the deep structure of the continental crust using the drilling of the Kola superdeep well], Moscow, Nedra Publ., 1984, 480 p.
  11. Melezhik V. A., Basalaev A. A., Predovskii A. A. [et al.] Uglerodistye otlozhena rannikh etapov razvitiya Zemli (geokhimiya i obstanovki nakopleniyana Baltiiskom shchite) [Carbonaceous deposits of the early stages of the Earth's development (geochemistry and accumulation conditions on the Baltic Shield)], Leningrad, Nauka Publ., 1988, 197 p.
  12. Mel'nikov M. P. Zametki po rozyskualmazov na reke Paz v prinorvezhskoi Laplandii [Notes on tracing diamonds on the Pasvik river in the Norwegian Lapland], *Gornyi zhurnal [Mining magazine]*, 1892, V. 1, No 3, pp. 447–465. (In Russ.).
  13. Polyakov I. V., Kalinkin M. M. Almazы i mineraly sputniki v kimberlitakh i rykhlykh otlozheniyakh Terskogo berega Kol'skogo poluostrova [Diamonds and minerals satellites in kimberlites and loose sediments of the Tersk coast of the Kola Peninsula], *Zapiski Vserossiiskogo mineralogicheskogo obshchestva [Notes of the All-Russian Mineralogical Society]*, 1993, No 1, pp. 96–101.

## Автор

**Каржавин Владимир Константинович**

кандидат химических наук, старший научный сотрудник  
karzhavin@geoksc.apatity.ru

Геологический институт КНЦ РАН, Апатиты

## Author

**Karzhavin Vladimir Konstantinovich**

PhD, senior researcher  
karzhavin@geoksc.apatity.ru

Geological Institute, Kola research center of RAS, Apatity, Russia

## Складки волочения в осадочных породах, вещающих кимберлиты Западной Якутии

### Drag folds in sedimentary rocks hosting kimberlites, West Yakutia

Игнатов П. А., Зарипов Н. Р.,  
Новиков К. В., Толстов А. В.

Ignatov P. A., Zaripov N. R.,  
Novikov K. V., Tolstov A. V.

Складки волочения установлены в осадочных толщах нижнего палеозоя Мирнинского, Накынского и Слюдякарского алмазоносных полей Западной Якутии. Они представлены мелкими антиклинальными формами мощностью от 3–5 до 15–20 см и нарушают прослой мергелей, глинистых известняков и доломитов, расположенные между монолитными пластами карбонатных пород. Ряд складок в виде моноклиналей, флексур и S- или Z-образных складок отражает степень межслоевого смещения сдвиговой природы. Складки волочения входят в ансамбль проявлений сдвиговых зон, включающий микровзбросы, зеркала скольжения с горизонтальными плоскостями борозд скольжения и зоны рассланцевания. Складки волочения отражают места локального растяжения, а зоны рассланцевания – сжатия. По Слюдякарскому полю приведены результаты детального картирования складок волочения и зон рассланцевания в трёх масштабах: по сети наблюдений 20 × 20 м на локальном участке 2 км<sup>2</sup>; по сети 200 × 200 м на площади 20 км<sup>2</sup>; по сети 500 × 500 м в пределах территории ~ 100 км<sup>2</sup>. Во всех масштабах ореолы складок волочения ограничиваются зонами рассланцевания. На локальном участке вблизи кимберлитов складки волочения маркируют рудовмещающий разлом, контролирующей длинные оси площадных проекций кимберлитов. На больших площадях ореолы складок волочения составляют 1,2–2 км, что сопоставимо с площадными параметрами кимберлитовых кустов. Ореолы складок волочения отражают узлы пересечения сдвигов, часть которых вмещает кимберлиты. Локальные проявления складок волочения маркируют магистральный сдвиг, вмещающий кимберлитовое тело. Анализ складок волочения в совокупности с другими признаками следует использовать в качестве косвенного поискового признака скрытых сдвигов и участков локального растяжения, контролирующих кимберлиты.

Ключевые слова: складки волочения, зеркала скольжения, картирование, кимберлиты, микровзбросы, рассланцевание, сдвиги.

Drag folds were revealed in Lower Paleozoic sedimentary strata of Mirny, Nakyn and Syuldyukar diamondiferous fields, West Yakutia. They consist of minor anticlinal forms (3–5 to 15–20 cm thick) and cut marl, clayey limestone and dolomite bands located between monolith seams of carbonate rocks. Some folds as monocline, flexures and S- or Z-shaped folds reflect the degree of shear-related interlayer offset. Drag folds are among shear zone occurrences including microfaults, slickensides with slip groove horizontal planes, and schistosity zones. Drag folds reflect local extension points while schistosity zones indicate compression points. For Syuldyukar field, detailed mapping results for drag folds and schistosity zones are provided at 3 scales: across 20 × 20 m observation grid within a local 2 km<sup>2</sup> site; across 200 × 200 m grid within 20 km<sup>2</sup> area; across 500 × 500 m grid within ~100 km<sup>2</sup> territory. For all scales, drag fold halos are restricted to schistosity zones. Within a local site adjacent to kimberlites, drag folds mark ore-hosting fault controlling long axes of kimberlite areal projections. Within large areas, drag fold halos are 1,2–2 km, which compares with kimberlite group areal parameters. Drag fold halos reflect shear junctions, with some of them hosting kimberlites. Local occurrences of drag folds mark a major shear hosting a kimberlite body. Drag fold analysis combined with other evidence should be used as an indirect prospecting indicator of concealed shears and local extension areas controlling kimberlites.

Keywords: drag folds, slickensides, mapping, kimberlites, microfaults, schistosity, shears.

Для цитирования: Игнатов П. А., Зарипов Н. Р., Новиков К. В., Толстов А. В. Складки волочения в осадочных породах, вмещающих кимберлиты Западной Якутии. Руды и металлы. 2021. № 3. 82–91. DOI: 10.47765/0869-5997-2021-10020.

For citation: Ignatov P. A., Zaripov N. R., Novikov K. V., Tolstov A. V. Drag folds in sedimentary rocks hosting kimberlites, West Yakutia. Ores and metals, 2021, № 3, pp. 82–91. DOI: 10.47765/0869-5997-2021-10020.

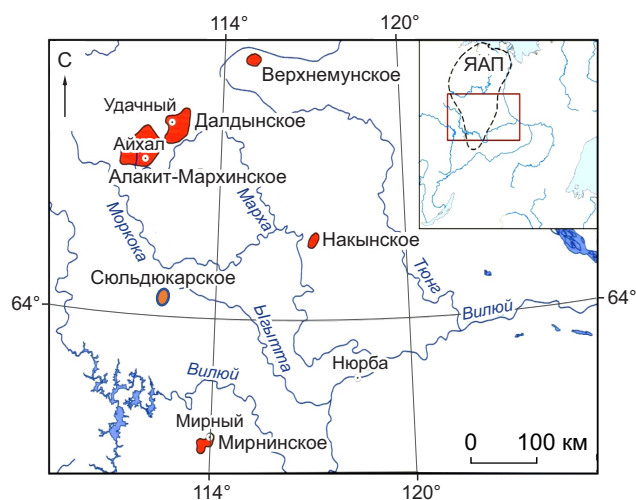


*Введение.* Складки волочения – типичный признак пластических деформаций, происходящих в осадочных и метаморфических породах при их горизонтальных смещениях. Они распространены в складчатых областях и часто встречаются в слоях глинисто-сланцевых пород, заключённых в песчаниках и кварцитах [9]. В осадочных породах чехла древних и молодых платформ складки волочения практически не систематизированы и лишь упоминаются.

Вместе с тем складки волочения являются характерным признаком сдвиговых структур. Последние в алмазоносных районах Якутии контролируют положение коренных алмазных месторождений [2, 4, 6, 7]. В этой связи картирование складок волочения может быть дополнительным признаком рудоконтролирующих структур. Такие складки явно указывают на горизонтальные смещения блоков горных пород, что важно для палеотектонических реконструкций. Они относятся к мелким формам с мощностью от 3–5 до 15–30 см и содержат слюдисто-глинистый материал. В естественных обнажениях такие мелкие дислокации в глинистых слоях, как правило, закрыты осыпями, а в карьерах на расстоянии в 2 м практически не видны. Но они отчётливо фиксируются по результатам изучения керн с его полным выходом [6].

Характеристике разновидностей складок волочения, распространённых в алмазоносных полях Западной Якутии, и закономерностям их распространения посвящена данная статья. Складки волочения изучены в терригенно-карбонатных толщах кембрия и ордовика, вмещающих алмазоносные кимберлиты Мирнинского, Накынского и Слюдякарского полей.

*Фактический материал и методы исследования.* Складки волочения зафиксированы в мирнинской и холомолохской свитах кембрия и олдондинской свите ордовика, входящих в состав осадочного чехла Мало-Ботуобинского, Ыгыаттинского и Средне-Мархинского алмазоносных районов Западно-Якутской провинции Восточно-Сибирской древней платформы. В частности, они встречаются в разрезах,



**Рис. 1. Схема расположения кимберлитовых полей южной части Якутской провинции, [11]:**

границы Якутской алмазоносной провинции (ЯАП) во врезке приведены по данным А. Д. Харькина и др. [18]

**Fig. 1. Layout of kimberlite fields in the southern part of the Yakutian province [11]**

boundaries of the Yakutian diamondiferous province (YDP) shown in the inset are based on the data by A. D. Kharkiv et al. [18]

вскрытых бурением в пределах Мирнинского, Слюдякарского и Накынского кимберлитовых полей отмеченных районов (рис. 1). Названные поля хорошо изучены. Многочисленные разрезы этих свит вскрыты поисковыми вертикальными скважинами, в абсолютном большинстве которых был практически стопроцентный выход керн.

В разрезе платформенного чехла рассматриваемых районов с преимущественным горизонтальным залеганием пластов выделяется несколько структурных ярусов снизу вверх: терригенно-карбонатный венд-нижнепалеозойский; лимнический угленосный карбон-пермский, карбонатно-терригенно-угленосный юрский. В Слюдякарском поле широко распространены туфы и силлы пермо-триасовой трапповой формации.



Складки волочения и другие тектонические нарушения изучены по единой методике одними исследователями [6] по керну более 8 тыс. скважин, вскрывших разрезы нижнего палеозоя. Они вместе с рядом других признаков учтены в базе данных, по которой созданы геоинформационные проекты, что позволило провести корректный анализ их распространения. На примере Сюльдюкарского поля приведены результаты картирования складок волочения и сопутствующих деформаций. В его центральной части в пределах 100 км<sup>2</sup> исследован керн 400 скважин, по которым изучены разрезы верхней части холомолохской свиты кембрия мощностью от 30 до 300 м с разной плотностью сети: 500 × 500, 200 × 200, 20 × 20 м. Практически во всех скважинах выход керна по кембрийской холомолохской свите был 90–100 %.

При диагностике тектонических признаков учитывался литогенетический состав морских отложений и седименто-диагенетические нарушения горизонтальной слоистости.

*Результаты исследований.* Складки волочения представляют собой подворот и складчатую деформацию слоя в зоне разрыва, возникшие из-за воздействия касательных напряжений на верхнюю и нижнюю поверхности слоя, испытавших тектоническое перемещение по разрыву [1]. Кроме того, эти формы отражают существенно более низкую вязкость слоя, который испытывает деформацию, относительно более хрупких покрывающих и подстилающих пород.

Складки волочения и основы сдвигового механизма их образования рассмотрены во многих работах по структурному анализу [3, 9, 10, 16, 23 и др.]. В осадочно-метаморфических породах докембрийского фундамента древних платформ они описаны в работах [19, 22, 24–26] и изучены на ряде рудных месторождений, поскольку связаны с формированием локальных структурных ловушек, рудных столбов и гнезд [2, 14, 16, 20, 21 и др.]. В рассматриваемых случаях складки волочения отмечены в тонких прослоях горизонтально-слоистых глинистых известняков, залегающих в однородных пластах доломитов и известняков. Мощ-

ность слоёв, затронутых складками волочения, составляет от 3–5 до 20 см, их протяжённость по данным бурения по сети 20 × 20 м можно предполагать до десятков метров.

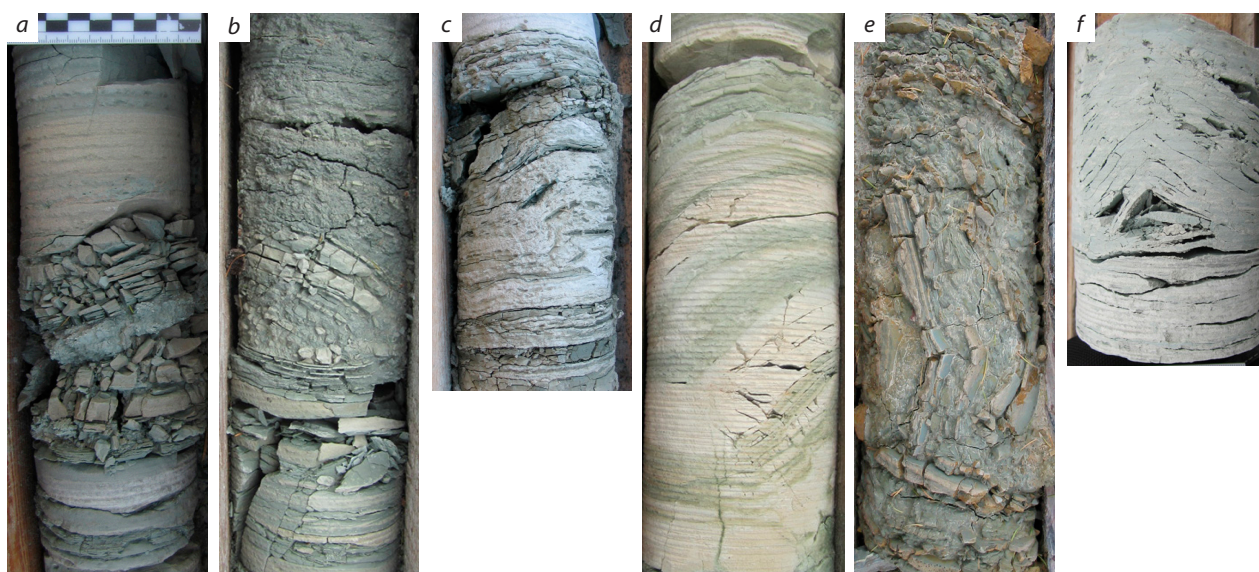
По керну выделяются следующие межслоевые дислокации, которые следует относить к складкам волочения: моноклираль (рис. 2, *a, b*); флексура (рис. 2, *c, d*); симметричная клиновидная антиклиналь (рис. 2, *e*); *S*- или *Z*-образная (рис. 2, *f*).

Во всех случаях складки волочения затрагивают практически один литогенетический тип глинисто-карбонатных горизонтально-слоистых мелководно-морских отложений с затишными от волнения обстановками седиментации. Они, очевидно, накапливались на выровненном дне, где не могли сформироваться оползни и оплывины, с которыми их в первом приближении можно было бы спутать. Надо заметить, что пластические внутрислоевые деформации могут отражать и палеосейсмогенные нарушения слаболитофицированных раннепалеозойских осадков, поскольку они весьма схожи с описанными сейсмогенными нарушениями современных осадков [15].

Показанные формы складок представляются не случайными, поскольку они логично отражают последовательный ряд дислокаций по степени сдвигового смещения верхнего и нижнего жёстких слоёв (рис. 3).

Несомненно, максимально изогнутые слоики типов *S* и *Z* наиболее приближены к источнику тектонических движений – осевой части сдвига или магистральному разлому зоны сдвига. Магистральные разломы выделены и по их моделированию [16]. Также можно предположить, что следующими деформациями в показанном ряду могут быть микровзбросы, которые формируются в относительно хрупких породах. В случаях менее вязких сред и при больших напряжениях в осевой части сдвигов могут образоваться межслоевые тектонические брекчии и милониты.

Собственно, поверхность магистрального разлома сдвиговой зоны маркируется зеркалами скольжения с горизонтальными бороздами. Они задокументированы как в горизонтальной межпластовой плоскости, так и в вер-

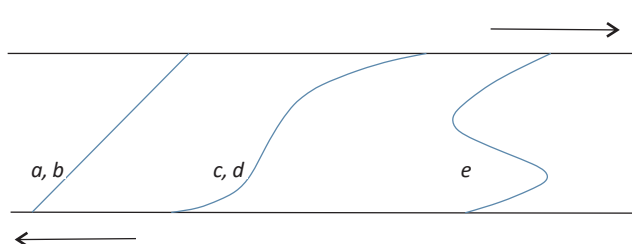


**Рис. 2. Различные складки волочения, встреченные в горизонтально залегающих кембрийских и ордовикских терригенно-карбонатных толщах Мирнинского, Накынского и Сюльдюкарского алмазоносных полей Западной Якутии:**

складки: простые моноклиальные: *a* – скв. 140-103,25, глуб. 49,2 м, *b* – скв. 141-99,5, глуб. 31 м, Сюльдюкарское поле; флексурные: *c* – скв. 518-445, глуб. 130,5 м, *d* – скв. Vtem 1-15f, глуб. 95 м, Накынное поле; *e* – S- или Z-образная (скв. 288-213, глуб. 24 м, Мирнинское поле); *f* – симметричная клиновидная (скв. 142-102, глуб. 67,5 м, Сюльдюкарское поле); во всех примерах диаметр керна 10 см

**Fig. 2. Various drag folds found in lateral Cambrian and Ordovician terrigenous-carbonate strata of the Mirny, Nakyn and Syuldyukar diamondiferous fields of Western Yakutia:**

folds: simple monoclinical: *a* – borehole 140-103.25, depth 49,2 m, *b* – hole 141-99,5, depth 31 m, Syuldyukar field; flexure: *c* – hole 518-445, depth 130,5 m, *d* – hole Vtem 1-15f, depth 95 m, Nakyn field; *e* – S- or Z-shaped (hole 288-213, depth 24 m, Mirny field); *f* – symmetric wedge-shaped (hole 142-102, depth 67.5 m, Syuldyukar field); in all examples, the core diameter is 10 cm



**Рис. 3. Схематический ряд присдвиговых складок волочения:**

*a, b, c, d, e* – примеры складок, приведённых на рис. 2

**Fig. 3. Schematic series of pull-apart drag folds:**

*a, b, c, d, e* – examples of folds shown in Fig. 2

тикальной, соответствующей крутопадающему нарушению. В случае литологического выклинивания относительно пластичного слоя две плоскости межслоевого скольжения объединяются в одну. При этом противоположные горизонтальные напряжения могут формировать симметричные антиклинали. Пример такой складки приведён на рис. 2, *f*.

В ансамбль хрупких и вязких деформаций, сопровождающих сдвиги, в рассматриваемых толщах терригенно-карбонатных пород входят зоны расланцевания, которые представлены серией сближенных криволинейных субпараллельных трещин, слагающих плоскую скорлуповатую форму (рис. 4).



**Рис. 4. Зона рассланцевания в доломитах**

Накынское поле, скв. 840-5, глуб. 69 м, диаметр керна 10 см

Fig. 4. Dolomite-hosted schistosity zone

Nakyn field, borehole 840-5, 69 m depth, core diameter is 10 cm

Такие формы напоминают сближенные серии диаклазовых трещин без смещения. Представляется, что зоны рассланцевания находятся на окончании магистральных нарушений сдвигов (см. рис. 3). Собственно сдвиги имеют мощность до первых десятков метров и крутое падение. Это подтверждено данными картирования признаков сдвигов на Майском месторождении алмазов, Мархинском объекте и Озёрном рудопроявлении, где они вмещают дайки и жилы алмазоносных кимберлитов [4, 6–8]. Участки сдвигов, где находятся складки волочения, отражают локальные растяжения, а места с зонами рассланцевания – сжатия. Зоны рассланцевания широко распространены, складки волочения встречаются реже. Ещё реже обнаруживаются микровзбросы и очень редко – зеркала скольжения с горизонтальными бороздами. Межслоевые тектонические брекчии и милониты зафиксированы в единичных случаях.

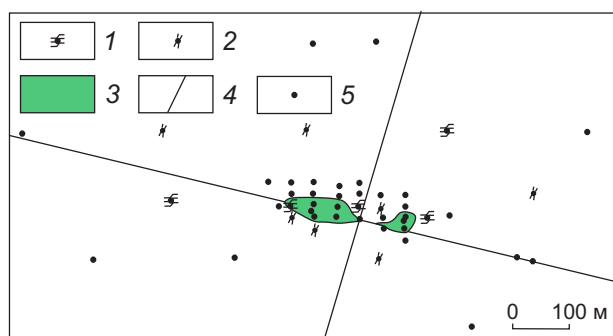
Закономерности распространения складок волочения и зон рассланцевания показаны на примере Сюльдюкарского кимберлитового поля, где в 2016 г. были обнаружены алмазоносные кимберлиты [12, 13]. Они прорывают мергели, известняки и доломиты холомолохской свиты кембрия и перекрываются среднекаменноугольно-пермскими угленосными песчаниками, алевролитами и аргиллитами. Площадь

с кимберлитами расположена в так называемом трапповом окне, за пределами которого широко распространены залегающие выше пермо-триасовые туфы и силлы долеритов.

Поисковым бурением вскрыта верхняя часть холомолохской свиты мощностью первые десятки метров в абсолютном большинстве случаев. На локальном участке с кимберлитами разрезы более представительны и достигают 300 м. На этом участке изучен керн 26 скважин, пройденных по сети  $20 \times 20$  м, а также серия скважен, расположенных до 250 м от кимберлитов (рис. 5). В пяти разрезах обнаружены складки волочения. В четырёх случаях складки волочения локализованы в зоне кимберлитовмещающего субширотного разлома сдвиговой природы. В этой зоне встречены микровзбросы и зеркала скольжения с горизонтальными бороздами, в том числе в двух разрезах, имеются и складки волочения. Этот узкий ореол складок волочения имеет ширину порядка 100 м, длину ~ 400 м.

На большей площади (~ 20 км<sup>2</sup>) имеет место кустовое распределение складок волочения (рис. 6). Выделение ореолов проведено по анализу керна скважин, пройденных по сети  $200 \times 250$  м. Здесь, как и на детальном участке, видно, что ореолы со складками волочения обрамляются скважинами, в которых вскрыты зоны рассланцевания. Это подтверждает отме-



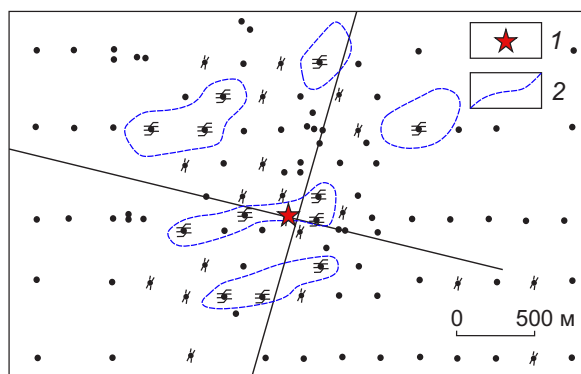


**Рис. 5. Распространение складок волочения в хололохской свите на участке Сьюльдюкарских кимберлитов:**

1 – складки волочения; 2 – зоны рассланцевания; 3 – проекция кимберлитов; 4 – осевые части сдвигов; 5 – устья скважин

**Fig. 5. Distribution of drag folds in the Holomolokh Formation within Syuldyukar kimberlites.**

1 – drag folds; 2 – shear zones; 3 – kimberlite projection; 4 – shear axes; 5 – wellheads



**Рис. 6. Распространение складок волочения и зон рассланцевания в породах хололохской свиты кембрия в пределах участка детализации в центральной части Сьюльдюкарского поля:**

1 – кимберлиты; 2 – контур ореолов складок волочения; остальные усл. обозн. см. рис. 5

**Fig. 6. Distribution of drag folds and shear zones in the rocks of Cambrian Kholomolokhskaya suite within the detalization area in the central part of the Syuldyukar field:**

1 – kimberlites; 2 – contour of of drag fold halos; see Fig. 5 for other legend

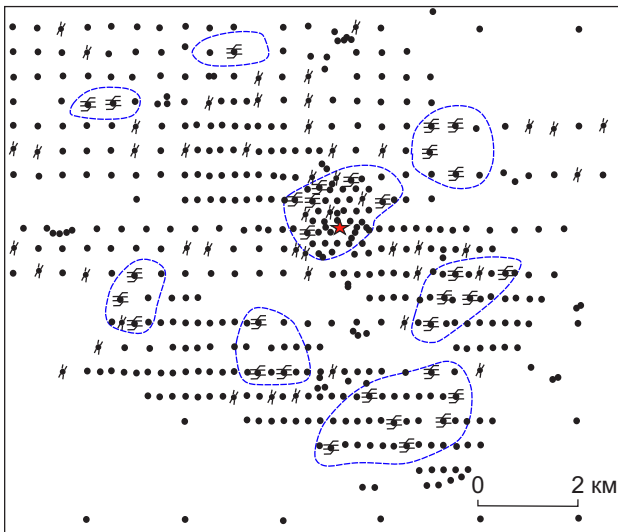
ченное выше модельное соотношение признаков сдвига, выраженное складками волочения (см. рис. 3). Надо отметить, что форма ореолов во многом определяется плотностью сети наблюдений. Ореолы складок волочения, закартированные по такой сети, составляют в поперечнике 500–600 м, что сопоставимо с площадными параметрами кимберлитовых трубок и протяжённостью кимберлитовых даек.

Участки распространения складок волочения выделены по анализу керн скважин, пройденных по сети бурения 500 × 500 м на площади примерно в 100 км<sup>2</sup> (рис. 7). Складки волочения и в таком масштабе имеют кластерное распространение. Очевидно, что они отражают узлы пересечения разломов. В поперечнике составляют 1,5–2,5 км, что соответствует площадным параметрам кустов кимберлитов. Важно отметить, что и по такой, относительно редкой, сети наблюдений распространение складок волочения также ограничивается зонами рассланцевания. Важно отметить, что из восьми выделенных ореолов складок волочения в двух имеются микровзбросы и зеркала скольжения с горизонтальными бороздами, указывающими на явные деформации сдвига. В одном из ореолов локализованы алмазоносные кимберлиты, второй участок представляется перспективным на их обнаружение.

Приведённые результаты картирования складок волочения и зон рассланцевания выполнены с учётом разной плотности поискового бурения.

**Закключение.** Впервые в осадочном чехле древней Восточно-Сибирской платформы, испытавшей среднепалеозойскую тектоно-магматическую активизацию, охарактеризованы межслоевые складки волочения, распространённые в терригенно-карбонатных толщах нижнего палеозоя, вмещающих алмазоносные кимберлиты Мирнинского, Накынского и Сьюльдюкарского полей Западной Якутии. Выделенные формы складок волочения отражают разную степень деформаций при затухании напряжений сдвига и различную пластичность пород слоев. S- и Z-образные складки максимально приближены к магистральным





**Рис. 7. Распространение складок волочения, зон рассланцевания, микровзбросов и зеркал скольжения с горизонтальными бороздами в центральной части Сьюльдюкарского поля:**

усл. обозн. см. рис. 5, 6

**Fig. 7. Distribution of drag folds, shistosity zones, microfaults and slickensides with horizontal grooves in the central part of the Syuldyukar field:**

see Fig. 5, 6 for legend

## Список литературы

1. *Геологический словарь* [в 3 томах]. – СПб. : ВСЕГЕИ, 2010. Т. 1. А–В. – 2010. – 412 с.
2. *Гладков А. С., Борняков С. А., Манаков А. В., Матросов В. А.* Тектонофизические исследования при алмазопромышленных работах. – М. : Научный мир, 2008. – 175 с.
3. *Гончаров М. А., Талицкий В. Г., Фролова Н. С.* Введение в тектонофизику : учебное пособие / отв. ред. Н. В. Короновский. – М. : КДУ, 2005. – 496 с.
4. *Игнатов П. А., Бушков К. Ю., Толстов А. В., Яныгин Ю. Т.* Картирование скрытых сдвиговых кимберлитоконтролирующих структур в Накынском поле // Проблемы прогнозирования и поисков месторождений алмазов на закрытых территориях. – Якутск : ЯНЦ СО РАН, 2008. – С. 325–331.
5. *Игнатов П. А., Зарипов Н. Р., Толстов А. В., Колесник А. Ю., Мальцев М. В.* Гидротермальная минерализация в осадочных породах кембрия как индикатор рудовмещающей структуры кимберлитов Сьюльдюкарского поля Якутии // Руды и металлы. – 2021. – № 1. – С. 93–105.
6. *Игнатов П. А., Новиков К. В.* Полевая диагностика тектонических нарушений и флюидоразрывных образований в кимберлитовмещающих отложениях нижнего палеозоя. Методическое руководство. – Мирный, 2019. – 76 с.
7. *Игнатов П. А., Бушков К. Ю., Штейн Я. И., Толстов А. В., Яныгин Ю. Т.* Геологические и минералого-геохимические признаки структур, контролирующих алмазоносные кимберлиты Накынского поля Якутии // Руды и металлы. – 2006. – № 4. – С. 59–67.

разломам сдвига. Они свойственны локальным участкам растяжения сдвиговых зон.

На примере Сьюльдюкарского поля показано, что картирование складок волочения по керну плотной сети бурения  $20 \times 20$  м маркирует магистральный разлом, контролирующий положение и длинные оси кимберлитовых тел. Ореолы складок волочения, установленные по сетям наблюдений  $200 \times 200$  и  $500 \times 500$  м, отражают узлы пересечения разломов и соотносятся с рангами кимберлитовых тел и их кустов.

Неравномерность распространения складок волочения в разных масштабах отражает фрактальность тектонических деформаций и повторяет элементы сдвигов разных рангов.

Анализ складок волочения в совокупности с другими минералого-геохимическими признаками следует использовать в качестве косвенного поискового признака скрытых зон сдвигов и участков их локального растяжения, контролирующих кимберлитовые кусты и вмещающих кимберлиты [5, 6, 8, 13, 17 и др.].

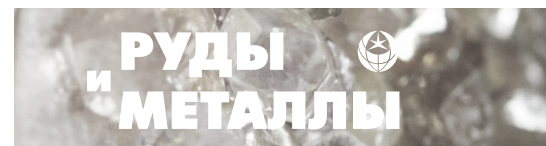
Выявленные складки волочения и предложенную модель их образования следует учитывать при анализе потенциально опасных смещений горнорудных масс по горизонтам более пластичных пород, находящихся внутри более хрупких горнорудных массивов.

8. *Игнатов П. А., Шмонов А. М., Новиков К. В., Кряжев С. Г., Ковальчук О. Е., Разумов А. Н.* Сравнительный анализ рудовмещающих структур Майского, Мархинского и Озёрного кимберлитовых тел Накынского поля Якутии // Геология рудных месторождений. – 2015. – Т. 57, № 2. – С. 125–131.
9. *Кирмасов А. Б.* Основы структурного анализа. – М.: Научный мир, 2011. – 368 с.
10. *Корсаков А. К., Межеловская С. В., Погребс Н. А., Межеловский А. Д., Журавлев А. Н., Лаптева А. М., Наравас А. К., Соколов С. А., Никитина М. И., Павлинова Н. В., Рыжова А. А., Филатова Л. К., Чернова А. Д.* Основные формы залегания горных пород: учебное пособие. – М.: ГЕОКАРТ; ГЕОС, 2017. – 280 с.
11. *Костровицкий С. И., Специус З. В., Яковлев Д. А., Фон-дер-Флаас Г. С., Суворова Л. Ф., Богуш И. Н.* Атлас коренных месторождений алмазов Якутской кимберлитовой провинции / отв. ред. Н. П. Похиленко; НИГПАК «АЛПРОСА» (ПАО). – Мирный: МГТ, 2015. – 480 с.
12. *Мальцев М. В., Толстов А. В., Фомин В. М., Старкова Т. С.* Новое кимберлитовое поле в Якутии и типоморфные особенности его минералов-индикаторов // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. – 2016. – № 3. – С. 86–94.
13. *Мальцев М. В., Толстов А. В., Бережнев И. И.* Условия локализации и критерии поисков кимберлитов (на примере Ыгыаттинского алмазоносного района, Западная Якутия) // Известия вузов. Геология и разведка. – 2018. – № 6. – С. 41–49.
14. *Некрасов Е. М., Дорожкина Л. А., Дудкин Н. В.* Особенности геологии и структуры крупнейших золоторудных месторождений эндогенного класса. – М.: Астрей-центр, 2015. – 191 с.
15. *Палеосейсмология* [в 2 томах] / под ред. Дж. П. МакКалпина. – М.: Научный мир, 2011. – 2 т.
16. *Семинский К. Ж., Гладков А. С., Лунина О. В., Тугарина М. А.* Внутренняя структура континентальных разломных зон. Прикладной аспект. – Новосибирск: СО РАН, филиал «ГЕО», 2005. – 244 с.
17. *Симоненко В. И., Толстов А. В., Васильева В. И.* Новый подход к геохимическим поискам кимберлитов на закрытых территориях // Разведка и охрана недр. – 2008. – № 4–5. – С. 108–112.
18. *Харькив А. Д., Зинчук Н. Н., Крючков А. И.* Коренные месторождения алмазов мира. – М.: Недра, 1998. – 555 с.
19. *Al-Doukhi, Hanadi Abulateef.* Precambrian evolution of the Salalah crystalline basement from structural analysis and  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  geochronology: doctoral dissertations. – 2014. – URL: [https://scholar.mst.edu/doctoral\\_dissertations/2238](https://scholar.mst.edu/doctoral_dissertations/2238).
20. *Corbett G. J.* Epithermal Au-Ag and porphyry Cu-Au exploration – short course manual: unpublished. – 2017.
21. *Cowan E. J.* Deposit-scale structural architecture of the Sigma-Lamaque gold deposit, Canada – insights from a newly proposed 3D method for assessing structural controls from drill hole data // Mineralium Deposita. – 2020. – № 55. – P. 217–240. – URL: <https://doi.org/10.1007/s00126-019-00949-6> (дата обращения: 04.08.2021).
22. *Giambiagi L., Ghiglione V., Cristallini E., Bottes G.* Kinematic models of basement/cover interaction: Insights from the Malargue fold and thrust belt, Mendoza, Argentina // Journal of Structural Geology. – 2009. – № 31. – P. 1443–1457.
23. *Mukherjee Soumyajit* Review on symmetric structures in ductile shear zones // International Journal of Earth Sciences / Indian Institute of Technology Bombay. – 2017. – № 106. – P. 1453–1468.
24. *Mc. Farlane H. B.* The geodynamic and tectonic evolution of the Palaeoproterozoic Sefwi Greenstone Belt, West African Craton // School of Earth, Atmosphere and Environment (Monash University, Australia); Géosciences Environnement, Toulouse, Université Paul Sabatier (Toulouse III), France). – 2017. – 297 p.
25. *Portella P., Annelsley I. R.* Paleoproterozoic thermotectonic evolution of the eastern sub-Athabasca basement, northern Saskatchewan: Integrated geophysical and geological data: in Summary of Investigations 2000. Volume 2. Saskatchewan Geological Survey / Saskatchewan Geological Survey, SEM // Miscellaneous Report 2000-4.2
26. *Wenbin Ji, Wei Lin, Michel Faure, Yang Chu, Lin Wu, Fei Wang, Jun Wang, Qingchen Wang.* Origin and tectonic significance of the Huangling massif within the Yangtze craton, South China // Journal of Asian Earth Sciences. – 2014. – V. 86. – P. 59–75. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1367912013003210> (дата обращения: 05.08.2021).

## References

1. Geologicheskii slovar' v 3 tomakh. T. 1. A–V [Geological Dictionary in 3 volumes. V. 1], St. Petersburg, VSEGEI Publ., 2010, 412 p.
2. Gladkov A. S., Borneyakov S. A., Manakov A. V., Matrosov V. A. Tektonofizicheskie issledovaniya prialmazopiskovykh rabotakh [Tectonophysical research during diamond prospecting], Moscow, Nauchnyi mir Publ., 2008, 175 p.
3. Goncharov M. A., Talitskii V. G., Frolova N. S. Vvedenie v tektonofiziku [Introduction to tectonophysics], Moscow, KDU Publ., 2005, 496 p.
4. Ignatov P. A., Bushkov K. Yu., Tolstov A. V., Yanygin Yu. T. Kartirovanie skrytykh sdvigovykh kimberlitokontroliruyushchikh struktur v Nakynskom pole [Mapping of hidden strike-slip kimberlite-controlling structures in the Nakyn field], Problemy prognizirovaniya i poiskov mestorozhdenii almazov na zakrytykh territoriyakh [Problems of forecasting and prospecting for diamond deposits in closed areas], Yakutsk, YaNTs SO RAN Publ., 2008, pp. 325–331.
5. Ignatov P. A., Zaripov N. R., Tolstov A. V., Kolesnik A. Yu., Mal'tsev M. V. Gidrotermalnaya mineralizatsii v osadochnykh porodakh kembriya kak indikator rudovmeshchayushchei struktury kimberlitov Syul'dyukarskogo polya Yakutii [Hydrothermal mineralization in sedimentary rocks of the Cambrian as an indicator of the ore-bearing structure of kimberlites of the Syuldyukar field of Yakutia], *Rudy i metally* [Ores and Metals], 2021, No 1, pp. 93–105. (In Russ.).
6. Ignatov P. A., Novikov K. V. Polevaya diagnostika tektonicheskikh narushenii i flyuidorazryvnykh obrazovaniy v kimberlitovmeshchayushchikh otlozheniyakh nizhnego paleozoya. Metodicheskoe rukovodstvo [Field diagnostics of tectonic faults and fluid fractures in kimberlite-hosting deposits of the Lower Paleozoic. Methodical guidance], Mirnyi, 2019, 76 p.
7. Ignatov P. A., Bushkov K. Yu., Shtein Ya. I., Tolstov A. V., Yanygin Yu. T. Geologicheskie i mineralogo-geokhimicheskie priznaki struktur, kontroliruyushchikh almazonosnye kimberlity Nakynskogo polya Yakutii [Geological and mineralogical-geochemical signs of structures controlling diamondiferous kimberlites of the Nakyn field of Yakutia], *Rudy i metally* [Ores and Metals], 2006, No 4, pp. 59–67. (In Russ.).
8. Ignatov P. A., Shmonov A. M., Novikov K. V., Kryazhev S. G., Koval'chuk O. E., Razumov A. N. Sravnitel'nyi analiz rudovmeshchayushchikh struktur Maiskogo, Markhinskogo i Ozernogo kimberlitovykh tel Nakynskogo polya Yakutii [Comparative analysis of ore-bearing structures of the Maisky, Markhinsky and Ozernoye kimberlite bodies of the Nakyn field in Yakutia], *Geologiya rudnykh mestorozhdenii* [Geology of Ore Deposits], 2015, V. 57, No 2, pp. 125–131. (In Russ.).
9. Kirmasov A. B. Osnovy strukturnogo analiza [Fundamentals of Structural Analysis], Moscow, Nauchnyi mir Publ., 2011, 368 p.
10. Korsakov A. K., Mezhelovskaya S. V., Pogrebs N. A., Mezhelovskii A. D., Zhuravlev A. N., Lapteva A. M., Naravas A. K., Sokolov S. A., Nikitina M. I., Pavlina N. V., Ryzhova A. A., Filatova L. K., Chernova A. D. Osnovnye formy zaleganiya gornyykh porod [The main forms of bedding of rocks], Moscow, GEOKART Publ., GEOS Publ., 2017, 280 p.
11. Kostrovitskii S. I., Spetsius Z. V., Yakovlev D. A., Fonder-Flaas G. S., Suvorova L. F., Bogush I. N. Atlas korennykh mestorozhdenii almazov Yakutskoi kimberlitovoi provintsii [Atlas of primary diamond deposits of the Yakutsk kimberlite province], Mirnyi, MGT Publ., 2015, 480 p.
12. Mal'tsev M. V., Tolstov A. V., Fomin V. M., Starkova T. S. Novoe kimberlitovoe pole v Yakutii i tipomorfnye osobennosti ego mineralov-indikatorov [New kimberlite field in Yakutia and typomorphic features of its indicator minerals], *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya* [Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology], 2016, No 3, pp. 86–94. (In Russ.).
13. Mal'tsev M. V., Tolstov A. V., Berezhnev I. I. Usloviya lokalizatsii i kriterii poiskov kimberlitov (na primere Ygyattinskogo almazonosnogo raiona, Zapadnaya Yakutiya) [Localization conditions and criteria for prospecting for kimberlites (on the example of the Ygyattinsky diamondiferous region, Western Yakutia)], *Izvestiya vuzov. Geologiya i razvedka* [Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration], 2018, No 6, pp. 41–49. (In Russ.).
14. Nekrasov E. M., Dorozhkina L. A., Dudkin N. V. Osobennosti geologii i struktury krupneishikh zolotorudnykh mestorozhdenii endogenno klassa [Features of the geology and structure of the largest gold deposits of the endogenous class], Moscow, Astreya-tsentr Publ., 2015, 191 p.
15. Paleoseismologiya v 2 tomakh [Paleoseismology in 2 volumes], Moscow, Nauchnyi mir Publ., 2011.
16. Seminskii K. Zh., Gladkov A. S., Lunina O. V., Tugarina M. A. Vnutrennyaya struktura kontinental'nykh





- razlomnykh zon. Prikladnoi aspect [Internal structure of continental fault zones. Applied aspect], Novosibirsk, SO RAN, filial "GEO" Publ., 2005, 244 p.
17. Simonenko V. I., Tolstov A. V., Vasil'eva V. I. Novyi podkhod k geokhimicheskim poiskam kimberlitov na zakrytykh territoriyakh [A new approach to geochemical prospecting for kimberlites in closed areas], *Razvedka i okhrana nedr [Prospect and protection of mineral resources]*, 2008, No 4–5, pp. 108–112. (In Russ.).
18. Khar'kiv A. D., Zinchuk N. N., Kryuchkov A. I. Korennye mestorozhdeniya almazov mira [Primary diamond deposits of the world], Moscow, Nedra Publ., 1998, 555 p.
19. Al-Doukhi, Hanadi Abulateef. Precambrian evolution of the Salalah crystalline basement from structural analysis and  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  geochronology, *Doctoral Dissertations*, 2014, available at: [https://scholar.mine.mst.edu/doctoral\\_dissertations/2238](https://scholar.mine.mst.edu/doctoral_dissertations/2238), (Accessed: 05.08.2021).
20. Corbett G. J. Epithermal Au-Ag and porphyry Cu-Au exploration – short course manual: unpublished, 2017.
21. Cowan E. J. Deposit-scale structural architecture of the Sigma-Lamaque gold deposit, Canada – insights from a newly proposed 3D method for assessing structural controls from drill hole data, *Mineralium Deposita*, 2020, No 55, pp. 217–240, available at: <https://doi.org/10.1007/s00126-019-00949-6> (Accessed: 04.08.2021).
22. Giambiagi L., Ghigliione V., Cristallini E., Bottes G. Kinematic models of basement/cover interaction: Insights from the Malargue fold and thrust belt, Mendoza, Argentina, *Journal of Structural Geology*, 2009, No 31, pp. 1443–1457.
23. Mukherjee Soumyajit. Review on symmetric structures in ductile shear zones, *International Journal of Earth Sciences*, 2017, No 106, pp. 1453–1468.
24. Mc. Farlane H. B. The geodynamic and tectonic evolution of the Palaeoproterozoic Sefwi Greenstone Belt, West African Craton, *School of Earth, Atmosphere and Environment (Monash University, Australia; Géosciences Environnement, Toulouse, Université Paul Sabatier (Toulouse III), France)*, 2017, 297 p.
25. Portella P., Anncsley I. R. Paleoproterozoic thermotectonic evolution of the eastern sub-Athabasca basement, northern Saskatchewan: Integrated geophysical and geological data: in Summary of Investigations 2000. Volume 2, Saskatchewan Geological Survey, *Miscellaneous Report*, 2000-4.2
26. Wenbin Ji, Wei Lin, Michel Faure, Yang Chu, Lin Wu, Fei Wang, Jun Wang, Qingchen Wang. Origin and tectonic significance of the Huangling massif within the Yangtze craton, South China, *Journal of Asian Earth Sciences*, 2014, V. 86, pp. 59–75, available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1367912013003210> (Accessed: 05.08.2021).

## Авторы

### Игнатов Пётр Алексеевич

доктор геол.-минерал. наук, профессор, зав. кафедрой<sup>1</sup>  
геологии месторождений полезных ископаемых  
[petrignatov@gmail.com](mailto:petrignatov@gmail.com)

### Зарипов Наиль Ринатович

кандидат геолого-минералогических наук, геолог<sup>2</sup>  
[nail750@mail.ru](mailto:nail750@mail.ru)

### Новиков Константин Валерьевич

кандидат геолого-минералогических наук, главный геофизик<sup>3</sup>  
[geofizik@gmail.com](mailto:geofizik@gmail.com)

### Толстов Александр Васильевич

доктор геолого-минералогических наук, директор<sup>4</sup>  
[TolstovAV@alrosa.ru](mailto:TolstovAV@alrosa.ru)

<sup>1</sup> МГРИ, Москва

<sup>2</sup> ООО «ГеоСолюшнс», Москва

<sup>3</sup> ФГУП «Гидроспецгеология», Москва

<sup>4</sup> НИГП АК «АЛРОСА» (ПАО), Мирный

## Authors

### Ignatov Petr Alekseevich

PhD, Professor  
Head of mineral deposit geology department  
[petrignatov@gmail.com](mailto:petrignatov@gmail.com)

### Zaripov Nail Rinatovich

PhD, geologist  
[nail750@mail.ru](mailto:nail750@mail.ru)

### Novikov Konstantin Valer'evich

PhD, chief geophysicist  
[geofizik@gmail.com](mailto:geofizik@gmail.com)

### Tolstov Alexander Vasil'evich

PhD, Director  
[TolstovAV@alrosa.ru](mailto:TolstovAV@alrosa.ru)

<sup>1</sup> MGRI, Moscow, Russia

<sup>2</sup> LLC GeoSolutions, Moscow, Russia

<sup>3</sup> FSUE Hydrospecgeology, Moscow, Russia

<sup>4</sup> JSC ALROSA (PJSC), Mirny, Russia

## Многофазность образования трубки им. В. Гриба и её выраженность в палеомагнитных свойствах пород и ситовых характеристиках алмазов

### Polyphase nature of Grib pipe formation and its manifestation in paleomagnetic rock properties and sieve diamond characteristics

Пенделяк Р. Н.

Pendelyak R. N.

Рассматриваются палеомагнитные свойства пород трубки и ситовые характеристики алмазов. Для установления палеомагнитных характеристик в 2019–2020 гг. из пород трубки было отобрано 59 ориентированных образцов кимберлитов и ксенотуфобрекчий. По результатам анализа и сопоставления полученных данных сделаны выводы о причинах смещения эпицентра магнитной аномалии и приведены доводы, указывающие на многофазность образования трубки им. В. Гриба. Полученные результаты свидетельствуют о сложном строении трубки им. В. Гриба, в пределах которой выделяется участок кимберлитов с аномально высокими значениями магнитных параметров. Он мог проявить себя в качестве основной аномалии, с выделения которой начались поисковые работы, приведшие к открытию трубки. А его расположение преимущественно в центре и на востокетрубки и преобладающее восточное направление остаточной намагниченности могут объяснить причину смещения аномалии на восток, в том числе частично за контур самой трубки. Многофазность трубки также подтверждается разными ситовыми характеристиками алмазов из различных участков рудного тела.

Ключевые слова: месторождение, палеомагнитные свойства, алмаз, ситовые характеристики, магнитная аномалия.

Paleomagnetic pipe rock properties and sieve diamond characteristics are discussed. To determine paleomagnetic characteristics, 59 samples (41 kimberlites and 18 xenotuff breccias) were taken from pipe rocks in 2019–2020. Based on analysis results and the obtained data comparison, reasons of magnetic anomaly epicenter shift are validated and polyphase nature of Grib pipe formation is proved. The results suggest complex pipe structure with abnormally magnetized kimberlites. They could be the main anomaly, a focus of early prospecting, which resulted in the pipe discovery. Their location, mostly in the central and eastern pipe combined with primarily east-trending residual magnetization, can account for the eastward anomaly shift and partly beyond the pipe contour. Polyphase pipe nature is also confirmed by various sieve characteristics of diamonds from the orebody.

Keywords: deposit, paleomagnetic properties, diamond, sieve characteristics, magnetic anomaly.

Для цитирования: Пенделяк Р. Н. Многофазность образования трубки им. В. Гриба и её выраженность в палеомагнитных свойствах пород и ситовых характеристиках алмазов. Руды и металлы. 2021. № 3. 92–100. DOI: 10.47765/0869-5997-2021-10021.

For citation: Pendelyak R. N. Polyphase nature of Grib pipe formation and its manifestation in paleomagnetic rock properties and sieve diamond characteristics. Ores and metals, 2021, № 3, 92–100. DOI: 10.47765/0869-5997-2021-10021.

Изучение и анализ истории открытия месторождения им. В. Гриба говорят о смещении эпицентра магнитной аномалии на 200 м от геометрического центра трубки в восточном (аэромагнитная аномалия) и северо-восточном (наземная магнитная аномалия) направлениях. Смещение эпицентра аномалии привело к тому, что первая скважина была пробурена в 100 м к востоку от трубки, а открытие состоялось в результате повторной заверки аномалии № 441 лишь через девять лет, в 1996 г. Повторной заверке предшествовали геофизические исследования – наземная магнитная съёмка м-ба 1 : 5000 в комплексе с электроразведкой методом дипольного индуктивного профилирования (ДИП). По их результатам выявлено, что эпицентр магнитной аномалии оказался смещённым на 200 м в северо-восточном направлении от центра открытой впоследствии трубки, и был выделен проводящий объект глубинного залегания размером ~ 100 x 150 м [1].

Предполагалось (Е. М. Веричев и др., 2005), что основная причина смещения магнитной аномалии на земной поверхности – восточное (под углом 75°) направление вектора намагниченности пород, слагающих трубку, однако никаких документированных свидетельств этому найдено не было. В связи с этим было принято решение изучать магнитные свойства пород трубки, чтобы понять причину и природу её особенностей для возможного применения полученных данных при поисковых работах, направленных на обнаружение коренных месторождений алмазов.

Для установления палеомагнитных характеристик и использования полученных результатов при проведении поисковых работ в 2019–2020 гг. с горизонтов -113...-131 из пород трубки были отобраны 59 ориентированных образцов: 41 представлен кимберлитами, 18 – ксенотуфобрекчиями. Из каждого образца были изготовлены по два-три кубика размером 2 x 2 x 2 см для необходимых исследований. Всего изготовлено 143 кубика. Лабораторные палеомагнитные исследования и обработка полученных результатов проводились по общепринятой методике [2] в АО «ВНИГРИ».

Предполагалось, что полученные результаты дадут некую единую обобщённую характеристику палеомагнитных свойств пород трубки, которая подтвердит сделанные ранее выводы, а также дифференцирует характеристики кимберлитов и ксенотуфобрекчий. Однако результаты выполненных работ оказались намного более интересными и не только подтвердили теоретические представления о сложном строении трубки им. В. Гриба, но и косвенно указали на многофазность её образования и дали ответ на вопрос о возможной причине смещения магнитной аномалии. Далее приводятся результаты анализа некоторых из палеомагнитных свойств пород трубки.

*Значения склонений ( $D^\circ$ ) средних направлений компонент естественной остаточной намагниченности горных пород ( $J_n$ )* показали большой разброс. При этом результаты исследования каждого кубика, выпиленного из отдельного образца, в целом сходны. Для удобства анализа и получения читаемой и понятной картины склонения сгруппированы по восьми направлениям сторон света – румбам (рис. 1). Результаты приведены в табл. 1.

Кимберлиты характеризуются широким диапазоном полученных значений, при этом значительную долю (суммарно 47 %) занимают восточные направления остаточной намагниченности (северо-восток, восток, юго-восток), каждое из остальных направлений составляет менее 15 %.

Образцы из ксенотуфобрекчий разделяются на две группы, в которых южные направления (юг и юго-запад) характерны для 43 % образцов, северные – для 37 %, доля остальных направлений незначительна.

Распределение склонений по трубке довольно хаотичное (рис. 2), при этом определённые образцы можно сгруппировать в отдельные поля по 3–8 образцов, но достоверность в этом случае будет невысокой, так как часть расположенных рядом образцов нередко показывает противоположные значения.

Для определения типов магнитных минералов, являющихся основными носителями естественной остаточной намагниченности горных пород, были изучены зависимости измене-



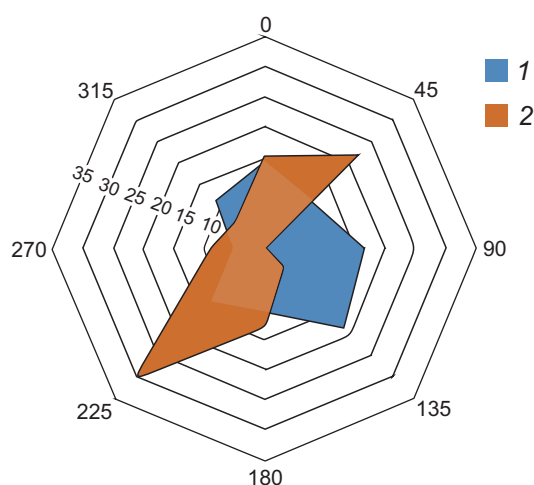


Рис. 1. Склонения ( $D^\circ$ ) средних направлений компонент  $J_n$ :

1 – кимберлит; 2 – ксенотуфобрекчия

Fig. 1. Deviation ( $D^\circ$ ) of the  $J_n$  component mean directions:

1 – kimberlite, 2 – xenotuff breccia

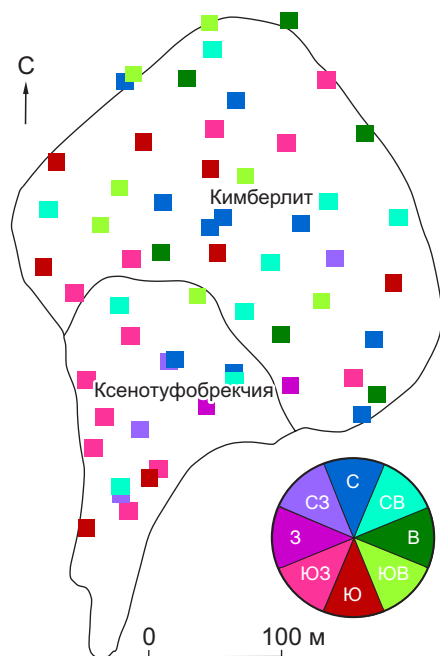


Рис. 2. Распределение склонений ( $D^\circ$ ) средних направлений компонент  $J_n$  по трубке

Fig. 2. Distribution of  $J_n$  component mean direction deviation ( $D^\circ$ ) along the pipe

ния магнитной восприимчивости от температуры в процессе нагрева и охлаждения  $K_m(T)$ . Преобладающими магнитными минералами – носителями  $J_n$  – являются гидроксиды железа, титаномагнетит и магнетит, а в трёх образцах – вторичный гематит.

Отношение Кенигсбергера (фактор  $Q$ ) является одной из наиболее широко используемых величин для оценки вклада в магнитные аномалии остаточной естественной и индуктивной намагниченности. Оно может применяться для примерной оценки магнитной стабильности (так как слабо зависит от концентрации магнитных минералов в образце).

Величина фактора  $Q$  может колебаться в очень широких пределах (от десятых долей единицы до многих сотен единиц) и выражается следующей формулой:

$$Q = J_n / (K_m \cdot H_T),$$

где:  $J_n$  – естественная остаточная намагниченность горных пород;  $K_m$  – магнитная восприимчивость горных пород, ед. СИ;  $H_T$  – полный вектор напряжённости геомагнитного поля.

При анализе результатов выполненных работ контрастно выделяется аномальная группа образцов кимберлитов, среднее значение фактора  $Q$  в которых в 2,6 раза выше среднего по трубке и в 20 раз больше, чем в кимберлитах с низким значением фактора  $Q$ . В поле кимберлитов эти образцы образуют компактную группу № 6, вытянутую от центра в юго-восточном направлении (рис. 3) и с некоторыми допусками (ввиду невыдержанности значений в отдельных пробах) простирающуюся до юго-восточной границы трубки. По словам исполнителя работ, несмотря на то что индуктивная намагниченность ( $J_i$ ) по отношению к естественной остаточной намагниченности  $J_n$  мала, в сумме они могли бы создать магнитную аномалию. Но при этом направления полной естественной остаточной намагниченности по данной группе образцов (как и в целом по остальным образцам трубки) различны (прямая и обратная полярности), что затрудняет корректную оценку  $J_i$ .

Помимо аномальной группы кимберлитов выделяется участок кимберлитов с относительно высокими значениями фактора  $Q$ . Он

## 1. Склонения средних направлений компонент естественной остаточной намагниченности

### 1. Deviations of the natural remanent magnetization component mean directions

Румбы	$D^\circ$	$D^\circ_{\text{cp}}$	Кимберлиты		Ксенотуфобрекчии	
			Число проб	%	Число проб	%
С	337,5–22,5	0	14	15	7	15
СВ	22,5–67,5	45	11	11	10	22
В	67,5–112,5	90	16	17	0	0
ЮВ	112,5–157,5	135	18	19	2	4
Ю	157,5–202,5	180	10	10	6	13
ЮЗ	202,5–247,5	225	12	12	14	30
З	247,5–292,5	270	5	5	4	9
СЗ	292,5–337,5	315	11	11	3	7
Всего 143 кубика, в том числе:			97		46	

локализован в северной и восточной частях кимберлитового поля и как бы опоясывает его. Остальные кимберлиты, которые отнесены к группе с низкими значениями фактора  $Q$ , располагаются в западной части трубки, на границе с ксенотуфобрекчиями, и севернее аномальной группы, занимая при этом существенную площадь.

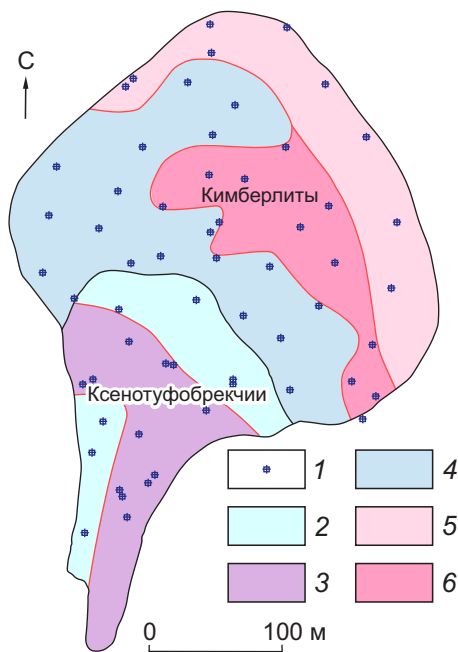
Ксенотуфобрекчии в целом характеризуются значительно меньшими значениями фактора  $Q$ , причём относительно как кимберлитов, так и среднего значения по трубке. При этом в них выделяются две группы, отличающиеся друг от друга по значению фактора  $Q$  в 2,8 раза, конфигурация которых проведена с некоторой долей условности ввиду малого числа проб и особенностей строения самого поля развития ксенотуфобрекчий. Однако на контакте с кимберлитами локализуется участок с низкими значениями фактора  $Q$ , который выделяется и по другим свойствам, о чём будет упомянуто ниже.

Здесь отдельно следует отметить, что выделение различных групп по фактору  $Q$  выполнено в пределах в целом слабомагнитной трубки, и в абсолютных значениях эти группы не столь контрастны (табл. 2), интересно именно их сравнение друг с другом. Также конфигурации выделенных участков при наличии большего числа образцов могут иметь несколько иной характер. Но при этом одно установлено

абсолютно точно: породы трубки существенно неоднородны по своим палеомагнитным свойствам, и в связи с этим можно уверенно утверждать, что именно аномальная группа кимберлитов (в большей степени) и опоясывающая её с восточной и северной сторон группа кимберлитов (в меньшей степени) могли дать слабоконтрастную магнитную аномалию, расположенную именно на востоке трубки и за её восточной границей.

*Прочностные характеристики.* Безусловно, на все эти построения можно смотреть с определённой долей скептицизма, но есть ещё один заслуживающий внимания факт. Он не относится к палеомагнитным параметрам, а косвенно, но с удивительной точностью указывает на общую верность выполненных построений. Дело в том, что при отработке месторождения им. В. Гриба проводится эксплуатационная разведка и при документации каждой скважины, не более чем через 6 м, породам присваивается условный код, который отражает их прочностные характеристики. Это не прочность, указанная в МПа. В обычной полевой документации, простой, но безотказной, при помощи рук, ножа и геологического молотка породы разделены на пять категорий прочности, где «0» соответствует породам с очень низкой прочностью, а «4» – с очень высокой.

По результатам такой кодировки построена блочная модель, которая используется при

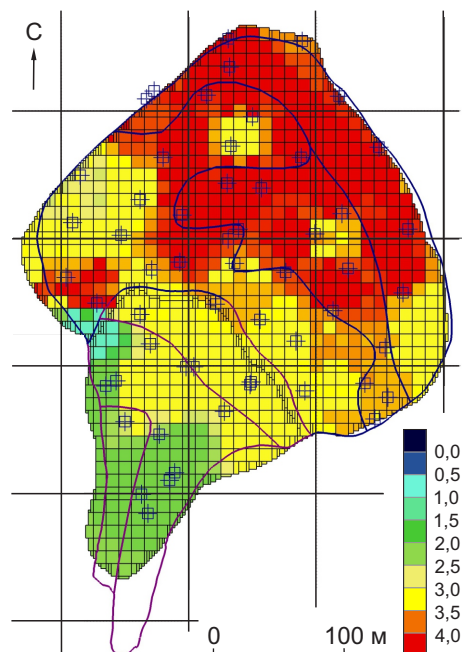


**Рис. 3. Поля локализации по значениям отношения Кенигсбергера (фактор Q):**

1 – точки отбора проб на палеомагнитные исследования; 2 – участки низких значений магнитных параметров в ксенотуфобрекчиях (0,47); 3 – участки высоких значений магнитных параметров в ксенотуфобрекчиях (1,86); 4 – участки низких значений магнитных параметров в кимберлитах (0,26); 5 – участки высоких значений магнитных параметров в кимберлитах (1,76); 6 – участки аномально высоких значений магнитных параметров в кимберлитах (5,3)

**Fig. 3. Fields of localization by the Koenigsberger ratio value (Q factor):**

1 – sampling points for paleomagnetic research vania; 2 – areas of low values of magnetic fields dimensions in xenotephobrecia (0,47); 3 – areas of high values of magnetic parameters in xenotephobrecias (1,86); 4 – areas of low values of magnetic parameters in kimberlites (0,26); 5 – areas of high values of magnetic parameters in kimberlites (1,76); 6 – areas of anomalously high values of magnetic parameters in kimberlites (5,3)



**Рис. 4. Блочная модель условной прочности пород трубки**

**Fig. 4. Block model of pipe rocks conventional strength**

отработке месторождения для выделения участков повышенной прочности, так как применяемая технология не предусматривает проведение буровзрывных работ. На рис. 4 приведена блочная модель по прочности пород на горизонте -119, и на ней чётко видно, что конфигурации участков повышенной прочности кимберлитов во многом сходны с конфигурациями участков, которые могли вызвать магнитную аномалию. В ксенотуфобрекчиях также наблюдается различие в прочностных характеристиках, причём это заметно не только на приложенном рисунке, но и ощущается при обогащении руды на обогатительной фабрике. Помимо этого, в карьере задокументирован контакт различных типов туфо- и ксенотуфобрекчий, из которых более прочные и с более высоким содержанием алмазов располагаются в полосе шириной 5–40 м вдоль контакта с кимберлитом.

*Ситовые характеристики алмазов.* Чтобы подкрепить полученные выводы, которые косвенно могут указывать на то, что трубка харак-





## 2. Значения фактора Q в различных типах пород

### 2. Q factor value in different types of rocks

Типы пород	Характеристика магнитных параметров	Число проб	Значения фактора Q		
			min	max	среднее
Кимберлит	Аномально высокие	12	2,5	26,3	6,0
	Высокие	9	0,6	6,3	2,8
	Низкие	20	0,01	1,3	0,3
Ксентуфобрекчия	Высокие	11	0,75	2,5	1,7
	Низкие	7	0,1	1,5	0,6
Итого / среднее		59	0,8	7,6	2,3

## 3. Данные проведённых опробований руд

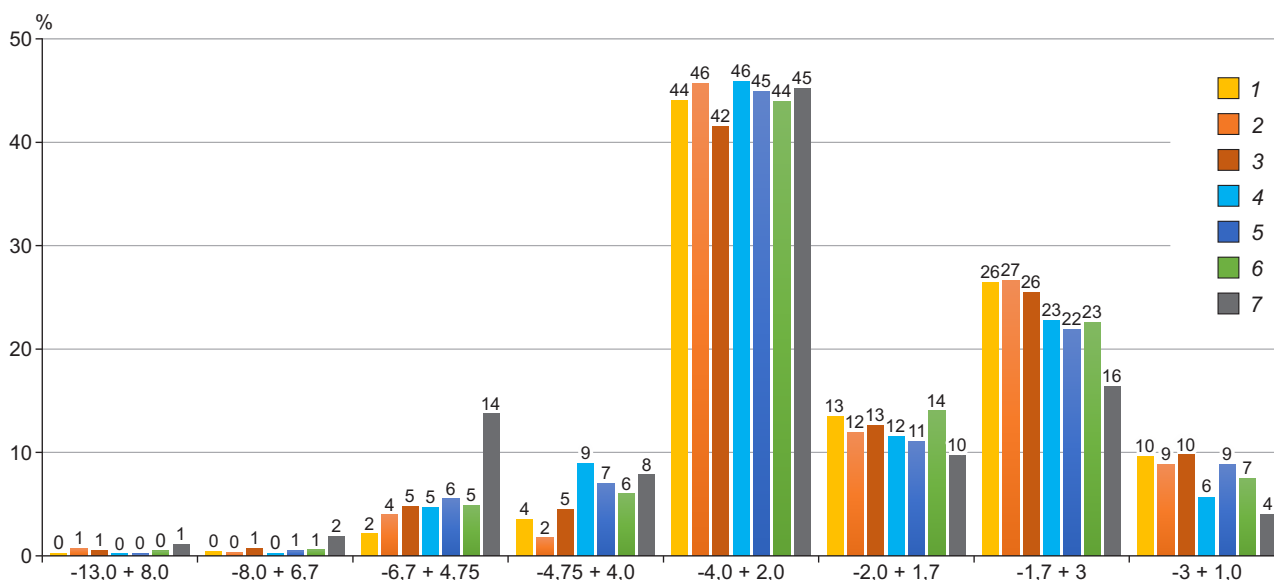
### 3. Data of the conducted ore sampling

Горизонты	Типы руды	Периоды опробования, г.	Масса алмазов, кар
-80	Кимберлит «северный»	2017	5376
-115	Кимберлит «северный»	11.2019	2676
-110	Кимберлит «южный»	08.2019	14 624
-115	Кимберлит «южный»	11.2019	5939
-74	Кимберлит «западный»	2017	5018
-114	Ксенотуфобрекчия «центр»	2019	3613
	Породы верхней части кратера	2020	2102

теризуется более сложным строением, чем изначально предполагалось, так как может иметь больше двух фаз внедрения, были проанализированы все имеющиеся данные по ситовым характеристикам алмазов из её разных частей. Отдельно следует отметить, что руда подаётся на обогатительную фабрику в шихте, которая обеспечивает оптимальный режим работы оборудования при выполнении плановых показателей, поэтому любое опробование руд некоторых типов – это, скорее, исключение. Тем не менее такие опробования периодически проводятся, и результаты анализа ситовых характеристик алмазов однозначно показывают, что действительно имеются различные кимберлиты, которые отличаются не только по набору палеомагнитных свойств между собой и ксенотуфобрекчиями, но и, по всей ви-

димости, связаны с различными источниками алмазов. О представительности опробования говорит то, что минимальная масса алмазов из каждой пробы составляет более 2000 кар. Данные по проведённым опробованиям приведены в табл. 3.

На рис. 5 приведены ситовые характеристики алмазов, для удобства интерпретации которых результаты по различным участкам рудного тела даны сходными цветами. Положение участков опробования показано на рис. 6. Из диаграммы видно, что алмазы из «северных» и «южных» кимберлитов существенно отличаются по ситовым характеристикам: в классах  $-4,75+4,0$  и  $-4,0+2,0$  алмазы из «южных» кимберлитов преобладают над «северными» на 4–6 %, при этом в классе  $-1,7+3$  наблюдается обратная ситуация – здесь на 4 % больше алма-



**Рис. 5. Диаграмма распределения ситовых характеристик алмазов:**

алмазы: 1 – из кратера (2020), из кимберлитов: 2 – «северные» (11.2019), 3 – «северные» (12.2017), 4 – «южные» (11.2019), 5 – «южные» (08.2019), 6 – «западные» (2017); 7 – из ксенотуфобрекций «центр» (2019); в скобках – периоды отбора проб

**Fig. 5. Diagram of diamond sieve characteristics distribution (sampling periods are in brackets):**

diamonds from: 1 – crater, 2020); kimberlites: 2 – “northern” (11.2019), 3 – “northern” (12.2017), 4 – “southern” (11.2019), 5 – “southern” (08.2019), 6 – “western” (2017); 7 – xenotuff breccias (“center”, 2019); in brackets – sampling periods

зов из «северных» кимберлитов. Также обращает на себя внимание и то, что кимберлиты, отработанные в разный период времени с разных горизонтов, но со смежных участков, имеют очень близкие ситовые характеристики, при этом в классе  $-4,75+4,0$  в «северных» кимберлитах отмечается разница в 3 %, которая нивелируется в классе  $-4,0+2,0$ . Кимберлиты с «западных» участков трубки имеют ситовые характеристики, сходные с показателями «южных» кимберлитов, что хорошо видно на основе представительных классов  $-4,0+2,0$  и  $-1,7+3$ , при этом они имеют ряд отличий в непредставительных.

По ксенотуфобрекциям было проведено одно опробование, результаты которого не позволяют разделить эти породы на различные типы, но указывают на преобладание в них алмазов средних и крупных классов относительно содержащихся в кимберлитах. Так, если в классе  $-4,0+2,0$  алмазы ксенотуфобрекций сходны с

алмазами «южных» кимберлитов, то содержание алмазов класса  $-1,7+3$  значительно ниже, а класса  $-6,7+4,75$  – значительно выше, чем в кимберлитах.

Также информативны данные по ситовым характеристикам алмазов из пород кратера. Несмотря на сходство полученных результатов с результатами по «северным» кимберлитам, использовать эти данные для полноценного сравнения не рекомендуется, так как они считаются непредставительными в связи с тем, что пробы были отобраны из песчаников с магматическим материалом, реже туфопесчаников, но в них полностью отсутствовали туффиты и туфы.

Подводя итог выполненных работ, обратим внимание на рис. 6, на котором как основа использована карта аэромагнитной съёмки м-ба 1 : 10 000, осуществлённой в 1986 г. (Г. М. Левин и др., 1986). На ней нанесён актуальный контур трубки им. В. Гриба на горизонте  $-125$



**Рис. 6. Положение полей локализации по значению фактора  $Q$  и участков опробований на аэромагнитной съёмке 1986 г.:**

усл. обозн. см. рис. 3, 5

Fig. 6. Position of localization fields according to  $Q$  factor value and sampling areas in aeromagnetic survey performed in 1986.:

see Fig. 3, 5 for legend

м, выделены поля локализации по значению фактора  $Q$  и участки проведённых опробований. Последние на рисунке показаны цветами, соответствующими таковым на диаграмме (см. рис. 5). Краткие выводы по выполненным работам следующие:

1. В кимберлитах преобладающее направление остаточной намагниченности – восточных румбов (северо-восток, восток, юго-восток – 47 %), в ксенотуфобрекчиях – южных (юг, юго-запад – 43 %) и северных (37 %).

2. Образцы из кимберлитов группируются в три отдельных поля, при этом в центральной и юго-восточной частях трубки выделяется участок с аномально высокими значениями маг-

нитных параметров, который мог создать магнитную аномалию.

3. Образцы из ксенотуфобрекчий группируются в два поля, причём эти поля соответствуют различным типам пород, наблюдаемым визуально в карьере и отличающимся по содержанию алмазов, цвету, прочности, размеру и количеству магматического материала, а также по обогатимости на фабрике.

4. Ориентировка участков с высокими и аномально высокими значениями магнитных параметров совпадает с простираем аэромагнитной аномалии (1986), также аномалия в юго-западной части осложнена незначительным выступом, который может быть связан с ксенотуфобрекчиями.

5. Ситовые характеристики алмазов указывают на преобладание (на 4–6 %) кристаллов крупных и средних классов «южных» кимберлитов над «северными». Кимберлиты с «западных» участков трубки имеет ситовые характеристики, сходные с «южным».

Полученные результаты в целом говорят о верности изначальных предположений о причине смещения эпицентра магнитной аномалии трубки им. В. Гриба, указывая на её сложное строение. При этом участок кимберлитов с аномально высокими значениями магнитных параметров мог проявить себя в качестве основной аномалии, с выделения которой начались поисковые работы, завершившиеся открытием трубки. А его расположение преимущественно в центре и на востоке трубки с преобладающим восточным направлением остаточной намагниченности в кимберлитах может объяснить причину смещения аномалии на восток, в том числе частично за контур самой трубки.

На сложное строение трубки и, возможно, на её многофазность прямо указывают различные ситовые характеристики алмазов из различных участков рудного тела. При этом при их изменении по площади трубки на смежных участках не наблюдается существенного изменения характеристик с глубиной, однако для подтверждения или опровержения этого требуется дальнейшее опробование. Предполагается наличие пяти фаз внедрения (двух в ксе-



нотуфобрекчиях и трёх в кимберлитах), но, чтобы эти предположения обосновать, необходимы дополнительные исследования.

Исходя из полученных результатов нужно отчётливо понимать, что каждая отдельная (особенно многофазная) трубка имеет присущие только ей особенности, которые характе-

ризуют историю её становления и развития, и применять эталонные модели при проведении поисковых работ следует очень вдумчиво и осторожно. Помимо этого, имеет смысл проанализировать фонд уже заверенных аномалий, в особенности тех, на которых пробурена всего одна скважина.

## Список литературы

1. Пенделяк Р. Н., Морозов А. В., Могутова В. А. Геологическое строение трубки им. В. Гриба и её индикаторные особенности в геофизических полях // Отечественная геология. – 2019. – № 5. – С. 53–59.
2. Храмов А. Н., Гончаров Г. И., Комиссарова Р. А. [и др.]. Палеомагнитология / под ред. А. Н. Храмова. – Л. [СПб.]: Недра, 1982. – 312 с.

## References

1. Pendelyak R. N., Morozov A. V., Mogutova V. A. Geologicheskoe stroenie trubki im. V. Griba i ee indikatornye osobennosti v geofizicheskikh polyakh [The geological structure of the tube them. V. Griba and its indicator features in geophysical fields], *Otechestvennaya geologiya* [National Geology], 2019, No 5, pp. 53–59. (In Russ.).
2. Khramov A. N., Goncharov G. I., Komissarova R. A. [et al.]. Paleomagnitologiya [Paleomagnetology], Leningrad, Nedra Publ., 1982, 312 p.

## Автор

**Пенделяк Роман Николаевич**

главный геолог ГОКа  
a-mas81@yandex.ru

АО «АГД Даймондс»,  
г. Архангельск

## Author

**Pendelyak Roman Nikolaevich**

Chief geologist  
a-mas81@yandex.ru

JSC AGD Diamonds  
Arkhangelsk, Russia





## Неизменённый кимберлит трубки Интернациональная (Мирнинское поле)

### Unaltered kimberlite of Internationalnaya pipe (Mirny field)

**Помазанский Б. С., Монхоров Р. В.,  
Антонова Т. А., Мальковец В. Г., Кулагин А. Н.,  
Шалкина М. В., Батырь В. Я., Собакин А. Е.**

**Pomazansky B. S., Monkhorov R. V.,  
Antonova T. A., Malkovets V. G., Kulagin A. N.,  
Shalkina M. V., Batyr V. Ya., Sobakin A. E.**

Блок порфиривого кимберлита (интрузивного когерентного кимберлита по [31]) на глубоких горизонтах трубки Интернациональная характеризуется отсутствием серпентинизации макрокристов оливина, минимальной степенью постмагматических изменений минералов основной массы. Келифитизация граната, состав внешних зон оливина и флогопита обусловлены взаимодействием глубинных минералов и окружающего кимберлитового расплава в глубинных условиях. Быстрая кристаллизация расплава зафиксировала неоднородное строение магмы шлирами макрокристого (порфиривого) и афиривого строения.

Ключевые слова: кимберлит, трубка Интернациональная, Якутская алмазоносная провинция.

The porphyry kimberlite block (intrusive coherent kimberlite, after Scott-Smith, 2013) on the deep horizons of the Internationalnaya pipe is characterized by the lack of olivine macrocryst serpentinization, and the minimum degree of postmagmatic alteration in the matrix minerals. Garnet kelyphitization and the composition of olivine and phlogopite outer zones are due to the interaction of deep minerals and the surrounding kimberlite melt at depth. The rapid melt crystallization contributed to the heterogeneous magma structure represented by the macrocryst (porphyry) and aphyric schlieren.

Keywords: kimberlite, Internationalnaya pipe, Yakut diamond province.

---

Для цитирования: Помазанский Б. С., Монхоров Р. В., Антонова Т. А., Мальковец В. Г., Кулагин А. Н., Шалкина М. В., Батырь В. Я., Собакин А. Е. Неизменённый кимберлит трубки Интернациональная (Мирнинское поле). Руды и металлы. 2021. № 3. 101–113. DOI: 10.47765/0869-5997-2021-10022.

For citation: Pomazansky B. S., Monkhorov R. V., Antonova T. A., Malkovets V. G., Kulagin A. N., Shalkina M. V., Batyr V. Ya., Sobakin A. E. Unaltered kimberlite of Internationalnaya pipe (Mirny field). Ores and metals, 2021, № 3, 101–113. DOI: 10.47765/0869-5997-2021-10022.

*Введение.* Трубка Интернациональная находится на территории Республики Саха (Якутия) в 16 км к юго-западу от г. Мирный и месторождения алмазов «Трубка Мир». Объект расположен в Мирнинском кимберлитовом поле Малоботуобинского алмазоносного района в склоновой части Непско-Ботуобинской антеклизы. Антеклизой разделяются крупные Тунгусская и Вилюйская синеклизы.

Кимберлитовая трубка локализована в зоне Западного разлома, входящего в Вилюйско-Мархинскую систему глубинных разломов. Рудное тело состоит из диатремы и сопровождается серией маломощных даек. Длинная ось диатремы и простирание большинства жил ориентированы в северо-западном направлении. Трубка прорывает терригенно-карбонатные нижнепалеозойские породы и перекрыта нижнеюрскими отложениями мощностью до 9 м. Контакты трубки с вмещающими породами контрастные [19].

Диатремовая часть выполнена несколькими петрографическими разновидностями кимберлитов. В соответствии с принятыми в геологическом комплексе АК «АЛРОСА» (ПАО) подходами выделяются порфиновый кимберлит (ПК), автолитовая кимберлитовая брекчия (АКБ) и значительно реже кимберлитовая брекчия (КБ). Для порфиновых кимберлитов характерны порфировая структура, массивная текстура, низкое среднее содержание (до 5 %) ксенолитов вмещающих пород, наличие единичных включений глубинных ксенолитов и полное отсутствие автолитовых образований. Автолитовая кимберлитовая брекчия отличается порфировой структурой, более высоким содержанием (~ 10 %) ксенолитов вмещающих пород, присутствием ксенолитов мантийных пород, наличием различных по строению и количеству автолитовых образований, предопределяющих характеристическую автолитовую текстуру этой разновидности кимберлитов. В отдельных случаях при весьма высоком (> 50 %) содержании ксенолитов вмещающих пород и кимберлита в качестве связующего компонента выделяется кимберлитовая брекчия (КБ) или в крайних случаях карбонатные брекчии с инъекциями кимберлитового мате-

риала. Прослеживание объёмного распространения доминирующих ПК и АКБ, наличие контактов позволило исследователям создать модель двухфазного строения диатремовой части месторождения. Сопряжённые с ней кимберлитовые дайки относятся к дорудным [19].

Кимберлиты верхней части тр. Интернациональная существенно изменены наложенными постмагматическими процессами. Широко проявлены серпентинизация, карбонатизация, в меньшей мере хлоритизация силикатных минералов порфириновых вкрапленников, основной массы породы, присутствуют гипергенные сульфаты и хлориды.

В ходе разведочных и эксплуатационных работ на разных горизонтах диатремовой части тр. Интернациональная геологами установлены интервалы кимберлита с полным отсутствием признаков воздействия постмагматических процессов на первичную магматическую породу. Контакт с окружающим кимберлитом резкий, но без признаков взаимных термических и механических воздействий. Порода представлена исключительно порфириновым кимберлитом. Пространственное картирование свидетельствует, что неизменённым кимберлитом в приосевой части диатремы выполнено тело в плане округлой или овальной формы, которое в вертикальном разрезе прослеживается раздувами и пережимами вплоть до полного исчезновения с абсолютной отметки -219,0 м на глубину. Наблюдаемые характер контактов, выраженность формы, однородность вещественного состава, отсутствие проникающих извне участков интенсивных постмагматических изменений породы в объёме блоков неизменённого кимберлита дают основания рассматривать его в качестве отдельного геологического тела. Мнения специалистов о геологическом положении неизменённого кимберлита существенно расходятся.

Предшественниками в ходе исследований вещественного состава тр. Интернациональная были изучены основные аспекты минералогии, петрографии, химического состава неизменённого кимберлита. Охарактеризованы минеральный состав породы, а также химический состав вкрапленников и минералов ос-

новой массы. Неизменённый порфиновый кимберлит не выделялся из объёма порфировых кимберлитов трубки [9, 16].

В ходе уточнения состава, строения, генезиса неизменённого порфирового кимберлита в тр. Интернациональная получены новые данные по внутреннему строению и химическому составу породы, характеристики порфировых вкрапленников и минералов основной массы. Дополнительно к результатам предшественников установлены неоднородное структурно-текстурное строение, валовый химический и микропримесный состав породы, наличие Na-Ca карбонатов в основной массе и продуктов распада моносulfидного твёрдого раствора во вкрапленниках оливина.

*Образцы и методы исследований.* Для изучения вещественного состава неизменённого кимберлита тр. Интернациональная использован материал монолитного образца массой около 15 кг из блока текущей добычи на горизонте с абсолютной отметкой -825 м. Окраска кимберлита серая, тёмно-серая. Структура породы порфировая, текстура массивная.

В штуфах и пластинах под биноклем Leica MZ12.5 выполнены анализ текстурно-структурных особенностей и подсчёт макрокомпонентного состава породы. Петрографические особенности изучены в шлифах с использованием поляризационного микроскопа Olympus BX51 с цифровой камерой SIAMS-анализатор-SIMAGIS XS-3CU.

Минеральный состав кимберлита определён с помощью рентгенодифрактометрического и термографического анализов (аналитик Ю. Б. Черепяхин). Рентгеновская дифрактометрия проб выполнена на дифрактометре ARL XTRA. Условия съёмки: дифрактометр ARL X`TRA, CuKa-излучение,  $V = 40$  кВ,  $I = 40$  мА. Для расшифровки дифрактограм использована база данных PDF-2 (2013). Термографический анализ осуществлён на термоанализаторах DTG-60AH и DTG-60H (Shimadzu), скорость нагрева 20 °/мин,  $T = 1000$  °С.

Валовый химический и сокращённый микропримесный состав породы установлен с помощью атомно-эмиссионной масс-спектрометрии с эмиссией излучения индуктивно связан-

ной плазмой (AES-ICP-MS) по методике БГРЭ-МП5мод III класса точности. Измерения произведены на спектрометре iCAP 6300Duo (производитель Thermo Scientific, США) (аналитик М. В. Буроева).

В аншлифах и плоскополированных шлифах выполнены детальные локальные исследования морфологии, взаимоотношений, состава минералов основной массы и вкрапленников. Использованы электронный микроскоп Tescan Mira 3 LMU (Чехия) (аналитик Т. А. Антонова) и рентгеновский микроанализатор Jeol JXA-8230 (аналитик Т. В. Степанова). Химический состав минералов основной массы и вкрапленников на Tescan Mira 3 LMU (Чехия) определён с помощью энергодисперсионного спектрометра (ЭДС) на базе детектора X-MAX<sup>N</sup> (Oxford Instruments, Ltd). Конкретные параметры работы варьировались в зависимости от задач. Наиболее часто применяли режимы SE, BSE, ускоряющее напряжение SEM HV 15–20 кВ, фокусное расстояние 15,0 мм, калибровка спектрометра X-MAX<sup>N</sup> проводилась по эталону Co. При работе на микроанализаторе Jeol JXA-8230 использовались следующие условия съёмки для определения состава минералов:  $V = 15$  или  $20$  кВ,  $I = 100$  нА, время анализа в точке 60 с. Основная часть измерений выполнена с привлечением ЭДС с внутренним стандартом Cu. Для количественного анализа состава оливина применён паспортизированный ИГМ им. В. С. Соболева СО РАН (г. Новосибирск) лабораторный стандарт оливина.

*Результаты исследований.* Неизменённый кимберлит тр. Интернациональная – весьма крепкая монолитная порода серой, тёмно-серой окраски. Порфировая структура обусловлена наличием зелёных, темно-зелёных вкрапленников оливина, единичных крупных зёрен фиолетово-красного граната и коричневаточёрного флогопита на фоне однородной мелкозернистой тёмно-серой основной массы. Текстура породы массивная. Присутствуют единичные (0,12 лин. % на ед. площади штуфа) мелкие ксенолиты глубинных и вмещающих пород.

В породе прослеживается сложное чередование локальных участков без признаков воздействия постмагматических процессов и со

слабой серпентинизацией. В первом случае состав кимберлита, %: оливин – 63–65, карбонаты (кальцит, доломит) – до 3–7, слюда – до 6, апатит – 0–6, рудные минералы (ильменит и др.) – 0–6, единичные зёрна пироксенов (0–3), смектиты – 5–6, гидрослюда – 0–2, галит – 6–7, цеолиты – 0–5, серпентин не зафиксирован. В серпентинизированном кимберлите содержание оливина понижается до 47–51 %, появляется серпентин (11–18 %), повышается содержание цеолитов, отмечен кварц.

Валовый петрохимический состав изученного кимберлита соответствует неконтраминированным ([25], С. I. = 1,03) кимберлитам группы I Южной Африки и близок к высокомагнетизальному низкокалиевому типу ([8], при высоком содержании железа ( $\text{FeO}_{\text{общ.}} = 10,9 \text{ мас. \%}$ )). По имеющимся у нас данным все структурно-текстурные разновидности кимберлитов месторождения тр. Интернациональная являются неконтраминированными.

Химический состав неизменённого кимберлита изучаемой трубки характеризуется существенно более высокими, чем в других структурно-текстурных разновидностях, содержаниями  $\text{FeO}_{\text{общ.}}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{MnO}$ , а также микропримесных элементов Cr, Co, Ni, Sc, Cu, Ga, Nb, La, Ce, Sm, Pb, Dy, Er, Li. Незначительно повышено содержание  $\text{Na}_2\text{O}$ . Заметны более низкие содержания Ba и Sr (табл.).

В породе обнаружены шлиры порфировой (тип 1) и афировой (тип 2) структур. Согласованные и без взаимных пересечений контуры шлиров хорошо диагностируются в шлифах (рис. 1).

В шлирах порфировой структуры (тип 1) присутствуют многочисленные макрокристы оливина, единичные зёрна граната, флогопита, хромшпинелидов, фрагменты ксенолитов глубинных пород, отдельные прослои скопленных рудного минерала погружены в однородную мелкозернистую основную массу. Структура таких участков породы порфировая, текстура массивная. По ориентировке длинных осей вкрапленников устанавливаются признаки течения магматического расплава.

В шлирах афирового строения (тип 2) встречаются отдельные мелкие (до 0,2 мм) единич-

ные обломки силикатных минералов (в основном оливина), нет прослоев рудных минералов. Визуально порода афирового («базальтического») облика. Структура мелкозернистая, реже микролитовая. Микролиты выражены лейстами карбонатов и флогопита. Текстура породы массивная, но в отдельных участках ориентировкой микролитов зафиксирована директивная текстура течения расплава. Минеральный состав шлиров афировой структуры идентичен составу основной массы в шлирах с порфировыми вкрапленниками. Идентифицированы микрозернистые оливин (размерность до 0,08 мм), серпентин, карбонаты, флогопит, апатит, рудные и акцессорные минералы (циркон, перовскит). Установлено относительно повышенное содержание флогопита.

*Оливин* – доминирующий минерал среди вкрапленников и в основной массе всех типов шлиров. В количественном отношении в породе резко (77 % из 803 замеров по длинной оси зерна) доминируют индивиды менее 0,5 мм, 14 % занимают зёрна размерности  $-1,0+0,5$  мм. На зёрна оливина крупнее 1,0 мм приходится не более 9 % по количеству, но за счёт крупных вкрапленников в шлирах типа 1 они формируют 33,12–52,75 лин. % площади изученных штучков породы. В шлирах афирового строения преобладают зёрна существенно менее 0,1 мм при максимальном размере единичных обломков оливина до 0,25 мм.

Крупные ( $> 1,0$  мм) зёрна оливина целые или представлены обломками неправильной, овальной, округлой формы. Индивиды с идиоморфной огранкой не встречены. Среди мелкого оливина преобладают обломки, но много зёрен пяти-, шестиугольного сечения со скруглёнными вершинами. Независимо от размерности оливин существенно трещиноватый.

Зёрна крупного оливина характеризуются однородным или зональным распределением форстеритового (Fo) минала. В центральной части зональных вкрапленников более высокое ( $\text{Fo}_{93-95}$ ), чем во внешней области ( $\text{Fo}_{90-93}$ ), содержание минала. В некоторых случаях также обнаружена весьма узкая внешняя кайма с ультравысоким ( $\text{Fo}_{94-96}$ ) содержанием Fo. Состав однородных зёрен крупного оливина аналогич-



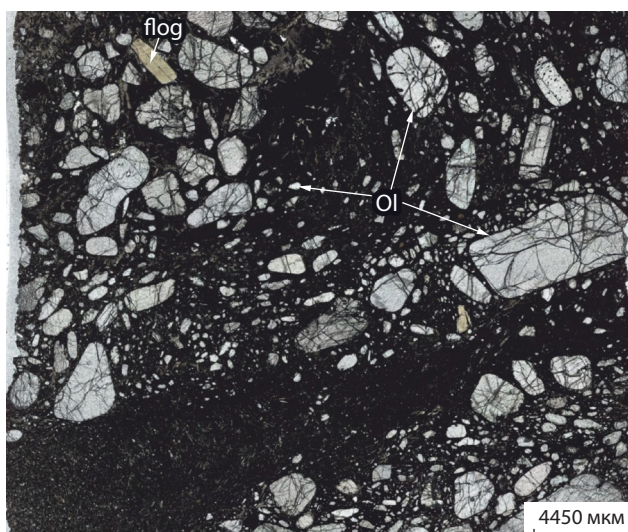


### Средний химический состав (мас. %) и содержание микропримесей (ppm) в основных структурно-текстурных разновидностях кимберлитов тр. Интернациональная

The average chemical composition (wt. %) and trace element content (ppm) in the main kimberlite structural and textural varieties, Internationalnaya pipe.

Компоненты/микроэлементы	АКБ (44)	ПК (36)	ПК (неизменённый кимберлит) (4)
SiO <sub>2</sub>	28,39	28,32	30,77
TiO <sub>2</sub>	0,38	0,44	0,84
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,44	2,22	1,82
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,43	4,89	10,9
CaO	7,41	7,41	8,02
MgO	29,85	30,23	31,82
MnO	0,11	0,11	0,19
K <sub>2</sub> O	0,87	0,82	0,94
Na <sub>2</sub> O	1,79	1,71	2,12
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,39	0,47	1,01
S	0,90	0,54	0,34
ППП	22,83	23,12	10,64
Сумма	100,79	100,28	99,41
Be	2,67	2,28	0,95
V	62,29	66,40	55,86
Cr	720,22	1069,06	2304,3
Co	50,73	45,95	78,88
Ni	968,7	1106,3	1380
Sc	9,98	12,91	22,45
Cu	13,87	22,32	39,06
Zn	66,01	31,31	76,51
Ga	5,16	5,84	12,05
Rb	25,94	29,9	20,37
Sr	3212,54	4787,47	1137,09
Y	10,07	10,35	10,37
Zr	110,58	145,02	293,3
Nb	86,01	116,51	192,07
Mo	2,52	1,78	4,11
Ba	858,54	954,52	444,44
La	101,96	107,58	117,14
Ce	156,37	174,22	206,32
Nd	55,16	63,88	88,85
Sm	7,21	9,15	18,12
Eu	2,05	2,49	3,74
Dy	1,14	1,3	4,83
Li	36,48	22,64	58,48
Er	0,79	1,1	2,39
Yb	0,98	0,92	1,00
Pb	13,82	10,55	30,27
Sn	1,65	2,00	2,76

Примечание. АКБ – автолитовая кимберлитовая брекчия; ПК – порфиновый кимберлит (изменённый); ПК (неизменённый кимберлит) – изученный в работе неизменённый кимберлит; в скобках – число анализов; ППП – потери при прокаливании.



**Рис. 1.** Шлиры кимберлита афировой структуры в неизменённом порфировом кимберлите из глубоких горизонтов тр. Интернациональная. Шлиф. Николи параллельны

Ol – оливин, flog – флогопит

**Fig. 1.** Aphyric kimberlite schlieren in unaltered porphyry kimberlite from deep horizons of International pipe. Polished section. Nicoli II

Ol – olivine, flog – phlogopite

чен составу одной из внутренних зон, но совершенно не встречены отдельные зёрна с ультравысоким содержанием Fe.

Составы микрозёрен оливина из основной массы породы перекрывают весь спектр ( $Fe_{89-95}$ ) составов вкрапленников и одинаковы для всех типов шлиров. Спорадически встречаются редкие локальные участки слабосерпентинизированного оливина основной массы.

Во вкрапленниках найдены включения хромшпинелидов (хромит, Mg-магнетит), пикроильменита и продуктов распада моносльфидного раствора. Крупные целые зёрна и мелкие обломки оливина не серпентинизированы.

**Гранат** – встречается в виде единичных отдельных крупных зёрен округлой формы, а также в глубинных ксенолитах. Минерал не отмечен в шлирах афирового строения. Состав отдельных зёрен соответствует гранату дунитгарцбургитового парагенезиса [14] ( $Cr_2O_3$  –

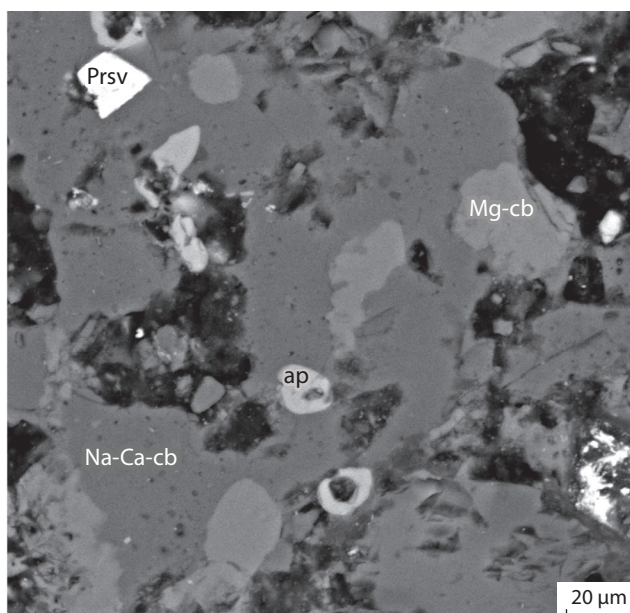
8,07 мас. %, CaO – 4,84 мас. %) и группы 10 [26]. Гранат часто флогопитизирован по периферии (келифитовая кайма), или замещающий реакционный флогопит прожилками проникает во внутренний объём зёрен.

**Флогопит** – развит в виде отдельных вкрапленников (до 1 мм), в келифитовой кайме и в прожилках в гранате, а также в виде микролитов в основной массе породы. Большинство вкрапленников минерала характеризуется зональным строением. В центре зерна относительно периферии повышенное содержание (мас. %)  $SiO_2$  (42,11–42,32),  $K_2O$  (8,69–9,54) и  $FeO_{общ.}$  (4,03–4,46), пониженное содержание  $Al_2O_3$  (15,11–15,58),  $TiO_2$  (1,43–1,93), полностью отсутствует BaO. Внешняя зона отличается обратными соотношениями – понижается содержание (мас. %)  $SiO_2$  (37,03–38,71),  $K_2O$  (7,07–7,96) и  $FeO_{общ.}$  (1,34–2,05), повышается  $Al_2O_3$  (19,41–20,03),  $TiO_2$  (1,72–2,43) и BaO (4,33–5,63).

Реакционный флогопит из наружной келифитовой каймы и внутренних прожилков в гранате также зональный. Непосредственно на границе с замещаемым гранатом минерал характеризуется постоянным наличием  $Cr_2O_3$  (до 2,11 мас. %) и отсутствием или низким (до 2,86 мас. %) содержанием BaO. На контакте с основной массой кимберлита в таком флогопите нередко фиксируется реакционная кайма Mg-Ti-магнетита или узкая зона с высоким (до 5,86 мас. %) содержанием BaO.

Микролиты флогопита основной массы характеризуются существенными вариациями BaO, но много микрозёрен с заметным (до 4,1 мас. %) содержанием примеси. Отмеченные для вкрапленников тенденции в соотношениях оксидов прослеживаются и в микролитах минерала.

**Карбонаты** – один из главных компонентов мелкозернистой основной массы во всех типах шлиров. Среди них доминирует мелкозернистый аллотриоморфной или лейстовидной формы кальцит с варьирующим содержанием MgO, реже встречается доломит. В основной массе кимберлита спорадически отмечаются локальные участки Na-Ca-карбонатов, которые ассоциируют с Mg-кальцитом, кальцитом. Содержание  $Na_2O$  (13,45 мас. %) и CaO (36,02–36,71



**Рис. 2. Основная масса неизменённого кимберлита глубоких горизонтов тр. Интернациональная. Растровая электронная микроскопия**

Na-Ca-cb – Na-Ca-карбонат, Mg-cb – доломит, ap – апатит, Prsv – перовскит

Fig. 2. Unaltered kimberlite matrix from Internationalnaya pipe deep horizons. Scanning electron microscopy

Na-Ca-cb – Na-Ca-carbonate, Mg-cb – dolomite, ap – apatite, Prsv – perovskite

мас. %) сближает Na-карбонат с известным в кимберлитах тр. Удачная шортитом (рис. 2) [5, 6].

*Апатит* – весьма распространён в основной массе породы. Ассоциирует с серпентином, карбонатами. Преобладают микрокристаллы (до 15 мкм) футляровидной, скелетной формы.

*Рудная минерализация* в изученном кимберлите представлена единичными крупными (до 3 мм) вкрапленниками, включениями в оливине, флогопите и заметным количеством (в шлифах и аншлифах до 10 %) микрозёрен рудных минералов в основной массе породы. Установлены шпинелиды, перовскит, циркон, бадделеит, единичные зёрна пикроильменита и сульфидов.

В количественном отношении в породе резко преобладают рассеянные в основной массе микрозёрна Fe-шпинелидов от Mg-Ti-магнетита до алюмо-магнезиоферритов с широкими вариациями в содержании (мас. %)  $TiO_2$  (3,01–20,13), MgO (6,18–23,76),  $Al_2O_3$  (0,59–11,31),  $Cr_2O_3$  (0,0–14,95) и количеством  $FeO_{общ.}$  (46,78–69,17). Нередко Fe-шпинелиды формируют внешнюю реакционную кайму на флогопите и хромшпинелидах. Микрокристаллы и обломки минералов этого ряда неправильной и идиоморфной октаэдрической формы. На срезе Fe-шпинелидов нередко «атолловое» [29] внутреннее строение зёрен с повышенным содержанием  $TiO_2$  в центральной части.

Хромшпинелиды образуют идиоморфные микрокристаллы в крупных вкрапленниках оливина, флогопита и существенно реже в основной массе породы. Обнаружены единичные крупные овальной, круглой формы вкрапленники этого минерала. Установлены широкие вариации содержаний (мас. %)  $Cr_2O_3$  (36,96–57,13),  $FeO_{общ.}$  (24,01–37,54), MgO (8,59–25,96),  $Al_2O_3$  (0,00–9,31),  $TiO_2$  (0,78–5,56). Такие вариации состава соответствуют широкой группе Cr-шпинелидов от ультравысокохромистого пикрохромита до низкохромистого пикроферрихромита [3]. Встречаются зональные зёрна, где ядро хромшпинелида окружено периферийной зоной Mg-Ti-магнетита.

В породе заметно (до 7,3 % от общего количества рудных зёрен) распространён перовскит. Он представлен мелкими (до 20 мкм) идиоморфными зёрнами. Характеризуется устойчивой примесью  $FeO_{общ.}$ , La, Ce, Nd и очень высоким (в отдельных случаях до 20 мас. %) содержанием  $Nb_2O_5$ .

В крупном оливине и основной массе породы встречены единичные зёрна пикроильменита. В минерале высокое содержание MgO (до 21,1 мас. %) и MnO (до 1,2 мас. %).

Исключительно в крупных вкрапленниках высокомагнезиального ( $Fo_{94}$ ) оливина встречены единичные включения агрегата продуктов распада глубинного моносльфидного твёрдого раствора. Включения имеют изометрическую шарообразную форму с веером распространяющихся в оливин радиальных трещин



декомпрессионного происхождения. Такие же морфологические особенности вокруг аналогичных включений наблюдаются в алмазах [17].

В центральной части агрегата (90 % среза) содержание Ni (17,76–26,55 мас. %), Cu (1,59–3,50 мас. %) соответствует Fe-Ni области составов включений моносльфидных твёрдых растворов в высокомагнезиальных оливинах [2] в кимберлитах. В периферийной части включения и в примыкающих радиальных трещинах узкая зона борнита с содержанием Ni (1,02–1,35 мас. %). Выявленные включения – признаки ликвации сульфидно-силикатной системы при охлаждении расплава с захватом капель сульфидного расплава кристаллизующимся в глубинных условиях оливином.

В кимберлите обнаружен обломок глубинного ксенолита с *оливин-клинопироксен-гранатовой минеральной ассоциацией*. В породе высокомагнезиальный ( $\text{Fo}_{93}$ ) оливин, хромдиоксид ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$  1,25 мас. %,  $\text{Na}_2\text{O}$  1,93 мас. %,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  2,6 мас. %,  $\text{FeO}_{\text{общ.}}$  1,46 мас. %) и флогопитизированный хромистый гранат [26] лерцолитового [14] ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$  1,75–2,21 мас. %,  $\text{CaO}$  4,22–4,50 мас. %) парагенезиса. В гранате присутствуют мелкие включения Cr-шпинели идиоморфной формы ( $\text{MgO}$  (17,50–17,62 мас. %),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (50,40–58,76 мас. %),  $\text{FeO}_{\text{общ.}}$  (15,35–17,36 мас. %),  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  (6,52–16,44 мас. %)). В целом обломок соответствует метасоматизированному в глубинных условиях катаклазированному лерцолиту.

*Обсуждение.* Кимберлитовые трубки по совокупности признаков стоят несколько в стороне от типичных вулканических образований другого состава. Практически полное отсутствие поверхностных вулканических построек с явными эффузивными разновидностями (лавами), весьма редкая встречаемость вулканического стекла или продуктов его изменения не дают возможности уверенно применить классификации вулканических пород к кимберлитам. Разработаны узкоспециализированные на кимберлиты классификации, или привлекаются таксоны классификаций вулканических пород. При этом терминами «когерентный кимберлит (интрузивный, экструзивный)», «кимберлитовая брекчия с массивной текстурой цемента», «порфировый кимберлит», «афировый

кимберлит», «литокластолава», «кристаллокластолава» обозначены продукты непосредственной кристаллизации расплава (магмы) кимберлитового состава в гипабиссальных, диатремовых или кратерных условиях. Терминами «вулканокластический кимберлит» (с разделением на подтипы), «автолитовая кимберлитовая брекчия», «атакситовая брекчия», «эвтакситовая брекчия», «автобрекчия», «эксплозивная брекчия», «туф», «туффизит», «туфобрекчия», «кимберлитовая брекчия», «ксенотуфобрекчия» – продукты затвердевания дефрагментированного с автолитами, магмокластами, литокластами кимберлитов и гетерогенных пород, кристаллокластами и микрозернистой основной массой расплава в условиях вулканических/эксплозивных процессов в диатреме. Породы корневой зоны диатрем и зона гипабиссальных сопряжённых даек классифицируются в таксонах обеих групп в зависимости от конкретной ситуации и предпочитаемых исследователем точек зрения на генезис образований [1, 7, 10, 13, 24, 28, 30].

В неизменённом кимберлите из диатремовой части тр. Интернациональная отсутствуют автолиты, магмокласты или другие компоненты дефрагментированного расплава. Шлиры отражают строение поднимающейся перемещающейся гомогенной магмы. Мелкозернистая основная масса, идентичный состав основной массы шлиров разного типа, отсутствие гравитационной дифференциации зёрен минералов вкрапленников и основной массы, слабое развитие постмагматических преобразований – свидетельства быстрой кристаллизации несущего кимберлитового расплава. Экспериментальные данные подтверждают преимущественное появление тонкозернистой массы минералов, а не вулканического стекла, в процессе закалки низкокремниевых, в частности кимберлитовых, расплавов [20].

По совокупности структурно-текстурных признаков неизменённый порфировый кимберлит рассматриваемой тр. Интернациональная соответствует интрузивному когерентному кимберлиту в зарубежной классификации [31]. В отечественной систематике принято контрастное разделение эффузивных и вулкано-



кластических пород [18]. При таком делении трудно определить с названием локализованной в глубокой части диатремы корневой/тыловой части единого потока магмы. Несомненным выходом для классификации породы недефрагментированного закристаллизованного в теле вулкана гомогенного расплава могут стать разработанные Е. Ф. Малеевым [11] принципы выделения фаций, генетических типов, формаций вулканических пород. С этой позиции тело неизменённого кимберлита в диатреме кимберлитовой тр. Интернациональная определяется как диатремевая фация кристаллолавы кимберлитового состава.

Кимберлитовый расплав, сформировавший тело неизменённого порфиروهого кимберлита в тр. Интернациональная, судя по составу основной массы породы, рудно-апатит-карбонатно-силикатного состава. Необходимо отметить заметную роль фосфора в составе магмы.

Крупные вкрапленники силикатов (оливин, флогопит, гранат) и рудных минералов имеют ксеногенное происхождение и появились в кимберлите вследствие разрушения глубинных ксенолитов. На минералах наблюдаются признаки дезинтеграции и химических преобразований в кимберлитовом расплаве в глубинных и гипабиссальных условиях.

Порфировые вкрапленники оливина из неизменённого кимберлита трубки имеют признаки деформации и разрушения, растворения, а также перекристаллизации с нарастанием каймы более магнезиального оливина на первичном зерне в процессе регенерации. Размерность вкрапленников, морфология, внутреннее строение, состав зон, ассоциация включений из хромшпинелидов, пикроильменита, продуктов разложения моносльфидного раствора соответствуют выделяемому большинством исследователей кимберлитов оливину I генерации. Для большинства зёрен или внутренней части зёрен такого оливина исследователями установлена гетерогенная относительно кимберлита природа первоисточника [4, 15, 20–23, 27].

Между крупными вкрапленниками шпиров макрокристного строения и в шпирях афирового строения присутствует соразмерный минералам основной массы микрозернистый

(до 0,1 мм) гипидиоморфной формы оливин. Повсеместное распространение в породе такого оливина свидетельствует о его кристаллизации из остаточного расплава в диатреме тр. Интернациональная.

Для граната также наблюдаются признаки механической деформации и химических воздействий. Расплав кимберлита реагировал с вкрапленниками граната с образованием флогопита. В составе реакционного флогопита содержится примесь хрома и кальция. Вкрапленники флогопита и периферийная область образованного по гранату флогопита реагируют с кимберлитом с образованием внешней каймы в виде Ва-содержащей разновидности или присыпки новообразованного рудного минерала. Округлая форма крупных вкрапленников хромита косвенно говорит о его растворении расплавом.

Слабое проявление постмагматических процессов, особенности состава оливина, наличие Na-карбонатов сближают характеризующий кимберлит глубоких горизонтов тр. Интернациональная с давно известными и хорошо изученными проявлениями неизменённого кимберлита из трубок Мир и Удачная. Исследователи подметили существование общих для разных тел стадий эволюции кимберлитовых тел [12, 15, 19, 21].

Представленные особенности строения и состава в неизменённом порфиروهом кимберлите (интрузивном когерентном кимберлите) глубоких горизонтов тр. Интернациональная рассматриваются как характеристика отдельной фазы внедрения кимберлитовой магмы в диатремевую часть трубки. Решение вопросов первичного состава, эволюции кимберлитовой магмы и трубок требует продолжения систематических исследований.

*Авторы работы выражают искреннюю признательность геологу рудника «Трубка Интернациональная» А. Т. Курневу, к. г.-м. наук А. А. Гибшер, д. г.-м. наук З. В. Спецусу, к. г.-м. наук А. В. Головину, к. г.-м. наук С. М. Саблукову за содействие в полевом опробовании, проведении лабораторных исследований, конструктивные обсуждения, замечания и помощь при подготовке публикации.*

## Список литературы

1. Владимиров Б. М., Костровицкий С. И., Соловьёва Л. В., Боткунов А. А., Фивейская Л. В., Егоров К. Н. Классификация кимберлитов и внутреннее строение кимберлитовых трубок. – М. : Наука, 1981. – 136 с.
2. Гаранин В. К. Минералогия кимберлитов и родственных им пород алмазоносных провинций России в связи с их генезисом и поисками : специальность 25.00.05 «Минералогия, кристаллография» : автореф. дис. на соискание учёного степеня доктора геолого-минералогических наук / Гаранин Виктор Константинович. – М. : МГУ, 2006. – 48 с.
3. Гаранин В. К., Кудрявцева Г. П., Марфуни А. С., Михайличенко О. А. Включения в алмазе и алмазоносные породы. – М. : МГУ, 1991. – 240 с.
4. Грязнов И. А., Карпович З. А., Ищутин И. А., Жимулев Е. И. Растворение макрокристов оливина в кимберлитовом расплаве при высоких *P-T*-параметрах // Известия Иркутского государственного университета. Серия «Науки о Земле». – 2019. – Т. 28. – С. 34–47.
5. Каменецкий И. С., Шарыгин В. В., Каменецкая М. Б., Головин А. В. Хлоридно-карбонатные нодулы в кимберлитах трубки Удачная: альтернативный взгляд на эволюцию кимберлитовых магм // Геохимия. – 2006. – № 9. – С. 1006–1012.
6. Корнилова В. П., Маршинцев В. К., Новоселов Ю. М. Шортит в кимберлитовых породах трубки Удачная-восточная // Бюллетень научно-технической информации. – 1981. – № 7. – С. 19–21.
7. Корнилова В. П., Никишов К. Н., Ковальский В. В., Зольников Г. В. Атлас текстур и структур кимберлитовых пород. – М. : Наука, 1983. – 157 с.
8. Костровицкий С. И., Морикио Т., Серов И. В., Амиржанов А. А. Изотопно-геохимическая систематика кимберлитов Сибирской платформы // Геология и геофизика. – 2007. – Т. 48, № 3. – С. 350–371.
9. Костровицкий С. И., Спецус З. В., Яковлев Д. А., Фон-дер-Флаасс Г. С., Суворова Л. Ф., Богуш И. Н. Атлас коренных месторождений алмаза Якутской кимберлитовой провинции / отв. ред. Н. П. Похиленко. – Мирный : МГТ, 2015. – 480 с.
10. Лучицкий И. В. Палеовулканология. – М. : Наука, 1985. – 279 с.
11. Малеев Е. Ф. Критерии диагностики фаций и генетических типов вулканитов. – М. : Наука, 1975. – 256 с.
12. Маршинцев В. К., Мигалкин К. Н., Николаев Н. С., Барашков Ю. П. Неизменённый кимберлит тр. «Удачная-Восточная» // Доклады Академии наук СССР. – 1976. – Т. 231, № 4. – С. 961–964.
13. Саблуков С. М., Саблукова Л. И., Стегницкий Ю. Б., Карпенко А. А., Спиваков С. В. Вулканические породы трубки Нюрбинская: отражение верхней мантии региона от рифея до карбона, геодинамические следствия // Труды VIII Международного семинара «Глубинный магматизм, его источники и плюмы». – Владивосток : Институт географии СО РАН, 2008. – С. 137–138.
14. Соболев Н. В. Глубинные включения в кимберлитах и проблема состава верхней мантии. – Новосибирск : Наука, 1974. – 263 с.
15. Соболев Н. В., Соболев А. В., Томиленко А. А., Ковязин С. В., Батанова В. Г., Кузьмин Д. В. Парагенезис и сложная зональность вкрапленников оливина из неизменённого кимберлита трубки Удачная-Восточная (Якутия): связь с условиями образования и эволюцией кимберлита // Геология и геофизика. – 2015. – Т. 56, № 1–2. – С. 337–360.
16. Спецус З. В., Корнилова В. П., Иванов А. С. Петрология кимберлитов глубоких горизонтов трубки Интернациональная // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России: материалы VIII Всероссийской научно-практической конференции (18–20 апреля 2018 г.) в 2 т. – Якутск : СВФУ, 2018. – Т. 1. – С. 252–257.
17. Тэйлор Л. А., Ли Я. Включения сульфидов в алмазах не являются моносульфидным твёрдым раствором // Геология и геофизика. – 2009. – Т. 50, № 12. – С. 1547–1559.
18. Уткин Ю. В. Вулканогенные обломочные породы (систематика, строение, генетические типы) : учебное пособие. – Томск : ТГУ, 2017. – 142 с.
19. Харьков А. Д., Зинчук Н. Н., Крючков А. И. Коренные месторождения алмазов мира. – М. : Недра, 1998. – 555 с.
20. Чепуров А. И., Жимулев Е. И., Агафонов Л. В., Соин В. М., Чепуров А. А., Томиленко А. А. Устойчивость ромбического и моноклинного пироксенов, оливина и граната в кимберлитовой магме // Геология и геофизика. – 2013. – Т. 54, № 4. – С. 533–544.
21. Шарыгин И. С., Литасов К. Д., Шацкий А. Ф., Головин А. В., Отани Е., Похиленко Н. П. Экспериментальное исследование плавления кимберлита трубки Удачная-Восточная при 3–6,5 ГПа и



- 900–1500 °C // Доклады Академии Наук. – 2013. – Т. 448, № 4. – С. 452–457.
22. Arndt N. T., Guitreau M., Boullie A. M., le Roex A., Tommasi A., Cordier P., Sobolev A. Olivine and the origin of kimberlite // *Journal of Petrology*. – 2010. – V. 51. – P. 573–602.
23. Brett R. C., Russelle J. R., Moss S. Origin of olivine in kimberlite: phenocryst or impostor? // *Lithos*. – 2009. – V. 112S. – P. 201–212.
24. Cas R. A. F., Porritt L., Pittari A., Hayman P. A new approach to kimberlite facies terminology using a revised general approach to the nomenclature of all volcanic rocks and deposits: descriptive to genetic // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. – 2008. – V. 174. – P. 226–240.
25. Clement C. R. A comparative geological study of some major kimberlite pipes in the Northern Cape and Orange Free State : PhD thesis. – Cape Town, 1982.
26. Dawson J. B., Stephens W. E. Statistical classification of garnets from kimberlite and associated xenoliths // *The Journal of Geology*. – 1975. – V. 83. – P. 589–607.
27. Kamenetsky V. S., Kamenetsky M. B., Sobolev A. V., Golovin A. V., Demouchy S., Faure K., Sharygin V. V., Kuzmin D. V. Olivine in the Udachnaya-East kimberlite (Yakutia, Russia): types compositions and origins // *Journal of Petrology*. – 2008. – V. 49, № 4. – P. 823–839.
28. Lorenz V., Kurszlauskis S. Root zone processes in the phreatomagmatic pipe emplacement model and consequences for the evolution of maar-diatreme volcanoes // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. – 2007. – V. 150. – P. 4–32.
29. Mitchell R. H. Kimberlites: mineralogy, geochemistry and petrology. – New York : Plenum Press, 1986. – 442 p.
30. Smith Scott B. H., Nowicki T. E., Russell J. K., Webb K. J., Mitchell R. H., Hetman C. M., Robby J. V. A Glossary of Kimberlite and Related Term. – North Vancouver, BC, Canada : Scott-Smith Petrology Inc. – 2018. – V. 1, № 3. – 144 p.
31. Smith Scott B. H., Nowicki T. E., Russell J. K., Webb K. J., Mitchell R. H., Hetman C. M. [et al.] Kimberlite terminology and classification // *Proceedings of the 10th International Kimberlite Conference. Journal of the Geological Society of India*. – 2013.
1. Vladimirov B. M., Kostrovitskii S. I., Solov'eva L. V., Botkunov A. A., Fiveiskaya L. V., Egorov K. N. Klassifikatsiya kimberlitov i vnutrennee stroeniya kimberlitovykh trubok [Kimberlite classification and internal structure of kimberlite pipes], Moscow, Nauka Publ., 1981, 136 p.
2. Garanin V. K. Mineralogiya kimberlitov i rodstvennykh im porod almazonosnykh provintsii Rossii v svyazi s ikh genezisom i poiskami [Mineralogy of kimberlites and related rocks of diamond-bearing provinces of Russia in connection with their genesis and prospecting: Extended abstract of Doctor's thesis], Moscow, MGU Publ., 2006, 48 p.
3. Garanin V. K., Kudryavtseva G. P., Marfunin A. S., Mikhailichenko O. A. Vkluyucheniya v almaze i almazonosnye porody [Inclusions in diamond and diamondiferous rocks], Moscow, MGU Publ., 1991, 240 p.
4. Gryaznov I. A., Karpovich Z. A., Ishutin I. A., Zhimulev E. I. Rastvorenie makrokristov olivina v kimberlitovom rasplave pri vysokikh *P-T*-parametrakh [Dissolution of olivine macrocrysts in kimberlite melt at high *P-T*-parameters], *Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universitet. Seriya "Nauki o Zemle"* [Bulletin of Irkutsk State University. Series "Earth Sciences"], 2019, V. 28, pp. 34–47. (In Russ.).
5. Kamenetskiy I. S., Sharygin V. V., Kamenetskaya M. B., Golovin A. V. Khloridno-karbonatnye noduli v kimberlitakh trubki Udachnaya: al'ternativnyi vzglyad na evolyutsiyu kimberlitovykh magm [Chloride-carbonate nodules in the kimberlites of the Udachnaya pipe: an alternative view of the evolution of kimberlite magmas], *Geokhimiya [Geochemistry International]*, 2006, No 9, pp. 1006–1012. (In Russ.).
6. Kornilova V. P., Marshintsev V. K., Novoselov Yu. M. Shortit v kimberlitovykh porodakh trubki Udachnaya-vostochnaya [Shortite in kimberlite rocks of the Udachnaya-eastern pipe], *Byulleten' nauchno-tekhnicheskoi informatsii [Bulletin of scientific and technical information]*, 1981, No 7. pp. 19–21. (In Russ.).
7. Kornilova V. P., Nikishov K. N., Koval'skii V. V., Zol'nikov G. V. Atlas tekstur i struktur kimberlitovykh porod [Atlas of textures and structures of kimberlite rocks], Moscow, Nauka Publ., 1983, 157 p.
8. Kostrovitskii S. I., Morikio T., Serov I. V., Amirzhanov A. A. Izotopno-geokhimicheskaya sistematika kimberlitov Sibirskoi platformy [Isotope-geochemical systematics of kimberlites of the Siberian plat-



- form], *Geologiya i geofizika [Russian Geology and Geophysics]*, 2007, V. 48, No 3, pp. 350–371. (In Russ.).
9. Kostrovitskii S. I., Spetsius Z. V., Yakovlev D. A., Fonder-Flaass G. S., Suvorova L. F., Bogush I. N. Atlas korennykh mestorozhdenii almaza Yakutskoi kimberlitovoi provintsi [Atlas of primary diamond deposits of the Yakutsk kimberlite province], Mirniy, MGT Publ., 2015, 480 p.
  10. Luchitskii I. V. Paleovulkanologiya [Paleovolcanology], Moscow, Nauka Publ., 1985, 279 p.
  11. Maleev E. F. Kriterii diagnostiki fatsii i geneticheskikh tipov vulkanitov [Diagnostic criteria for facies and genetic types of volcanics], Moscow, Nauka Publ., 1975, 256 p.
  12. Marshintsev V. K., Migalkin K. N., Nikolaev N. S., Barashkov Yu. P. Neizmenennyi kimberlit tr. “Udachnaya-Vostochnaya” [Unaltered kimberlite from the Udachnaya-Vostochnaya pipe], *Doklady Akademii nauk SSSR [Reports of the USSR Academy of Sciences]*, 1976, V. 231, No 4, pp. 961–964. (In Russ.).
  13. Sablukov S. M., Sablukova L. I., Stegnitskii Yu. B., Karpenko A. A., Spivakov S. V. Vulkanicheskie porody trubki Nyurbinskaya: otrazhenie verkhnei mantii regiona ot rifeya do karbona, geodinamicheskie sledstviya [Volcanic rocks of the Nyurbinskaya pipe: reflection of the upper mantle of the region from Riphean to Carboniferous, geodynamic consequences], *Trudy VIII Mezhdunarodnogo seminar “Glubinnyi magmatizm, ego istochniki i plyumy” [Proceedings of the VIII International seminar “Deep magmatism, its sources and plumes”]*, Vladivostok, Institut geografii SO RAN Publ., 2008, pp. 137–138.
  14. Sobolev N. V. Glubinnye vklyucheniya v kimberlitakh i problema sostava verkhnei mantii [Deep inclusions in kimberlites and the problem of the composition of the upper mantle], Novosibirsk, Nauka Publ., 1974, 263 p.
  15. Sobolev N. V., Sobolev A. V., Tomilenko A. A., Kovyzin S. V., Batanova V. G., Kuz'min D. V. Paragenезis i slozhnaya zonal'nost' vkraplennikov olivina iz neizmenennogo kimberlita trubki Udachnaya-Vostochnaya (Yakutiya): svyaz' s usloviyami obrazovaniya i evolyutsiei kimberlite [Paragenesis and complex zoning of olivine phenocrysts from unaltered kimberlite of the Udachnaya-Vostochnaya pipe (Yakutia): relationship with the conditions of formation and evolution of kimberlite], *Geologiya i geofizika [Russian Geology and Geophysics]*, 2015, V. 56, No 1–2, pp. 337–360. (In Russ.).
  16. Spetsius Z. V., Kornilova V. P., Ivanov A. S. Petrologiya kimberlitov glubokikh gorizontov trubki International'naya [Petrology of kimberlites of deep horizons of the International pipe], *Geologiya i mineral'no-syr'evye resursy Severo-Vostoka Rossii: materialy VIII Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii (18–20 aprelya 2018 g.) v 2 t [Geology and mineral resources of the North-East of Russia: materials of the VIII All-Russian scientific-practical conference (April 18–20, 2018) in 2 volumes]*, Yakutsk, SVFU Publ., 2018, V. 1, pp. 252–257.
  17. Teilor L. A., Li Ya. Vkl'yucheniya sul'fidov v almazakh ne yavlyayutsya monosul'fidnym tverdyim rastvorom [Sulfide inclusions in diamonds are not monosulfide solid solutions], *Geologiya i geofizika [Russian Geology and Geophysics]*, 2009, V. 50, No 12, pp. 1547–1559. (In Russ.).
  18. Utkin Yu. V. Vulkanogennyye oblomochnye porody (sistematika, stroenie, geneticheskie tipy) [Volcanic clastic rocks (taxonomy, structure, genetic types)], Tomsk, TGU Publ., 2017, 142 p.
  19. Khar'kiv A. D., Zinchuk N. N., Kryuchkov A. I. Korennye mestorozhdeniya almazov mira [Primary diamond deposits of the world], Moscow, Nedra Publ., 1998, 555 p.
  20. Chepurov A. I., Zhimulev E. I., Agafonov L. V., Sonin V. M., Chepurov A. A., Tomilenko A. A. Ustoichivost' rombicheskogo i monoklinnogo piroksenov, olivina i granata v kimberlitovoi magme [Stability of rhombic and monoclinic pyroxenes, olivine and garnet in kimberlite magma], *Geologiya i geofizika [Russian Geology and Geophysics]*, 2013, V. 54, No 4, pp. 533–544. (In Russ.).
  21. Sharygin I. S., Litasov K. D., Shatskii A. F., Golovin A. V., Otani E., Pokhilenko N. P. Eksperimental'noe issledovanie plavleniya kimberlita trubki Udachnaya-Vostochnaya pri 3–6,5 GPa i 900–1500 °C [Experimental study of the melting of kimberlite from the Udachnaya-Vostochnaya pipe at 3–6,5 GPa and 900–1500 °C], *Doklady Akademii Nauk [Reports of the Academy of Sciences]*, 2013, V. 448, No 4, pp. 452–457. (In Russ.).
  22. Arndt N. T., Guitreau M., Boullie A. M., le Roex A., Tommasi A., Cordier P., Sobolev A. Olivine and the origin of kimberlite, *Journal of Petrology*, 2010, V. 51, pp. 573–602.
  23. Brett R. C., Russelle J. R., Moss S. Origin of olivine in kimberlite: phenocryst or impostor?, *Lithos*, 2009, V. 112S, pp. 201–212.
  24. Cas R. A. F., Porritt L., Pittari A., Hayman P. A new approach to kimberlite facies terminology using a revised general approach to the nomenclature of all





- volcanic rocks and deposits: descriptive to genetic, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2008, V. 174, pp. 226–240.
25. Clement C. R. A comparative geological study of some major kimberlite pipes in the Northern Cape and Orange Free State: PhD thesis, Cape Town, 1982.
26. Dawson J. B., Stephens W. E. Statistical classification of garnets from kimberlite and associated xenoliths, *The Journal of Geology*, 1975, V. 83, pp. 589–607.
27. Kamenetsky V. S., Kamenetsky M. B., Sobolev A. V., Golovin A. V., Demouchy S., Faure K., Sharygin V. V., Kuzmin D. V. Olivine in the Udachnaya-East kimberlite (Yakutia, Russia): types compositions and origins, *Journal of Petrology*, 2008, V. 49, No 4, pp. 823–839.
28. Lorenz V., Kurszlaukis S. Root zone processes in the phreatomagmatic pipe emplacement model and consequences for the evolution of maar-diatreme volcanoes, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2007, V. 150, pp. 4–32.
29. Mitchell R. H. Kimberlites: mineralogy, geochemistry and petrology, New York, Plenum Press, 1986, 442 p.
30. Smith Scott B. H., Nowicki T. E., Russell J. K., Webb K. J., Mitchell R. H., Hetman C. M., Robby J. V. A Glossary of Kimberlite and Related Term, North Vancouver, BC, Canada, *Scott-Smith Petrology Inc.*, 2018, V. 1, No 3, 144 p.
31. Smith Scott B. H., Nowicki T. E., Russell J. K., Webb K. J., Mitchell R. H., Hetman C. M. [et al.] Kimberlite terminology and classification, *Proceedings of the 10th International Kimberlite Conference. Journal of the Geological Society of India*, 2013.

## Авторы

### Помазанский Богдан Степанович

старший научный сотрудник<sup>1</sup>  
PomazanskiyBS@alrosa.ru

### Монхоров Ричард Владимирович

ведущий инженер-геолог<sup>1</sup>  
MonhorovRV@alrosa.ru

### Антонова Татьяна Анатольевна

старший научный сотрудник<sup>1</sup>  
AntonovaTA@alrosa.ru

### Мальковец Владимир Григорьевич

кандидат геолого-минералогических наук,  
заведующий лабораторией<sup>1</sup>  
MalkovetsVG@alrosa.ru

### Кулагин Алексей Николаевич

главный геолог Мирнинско-Нюрбинского ГОКа<sup>2</sup>  
KulaginAN@alrosa.ru

### Шалкина Марина Владимировна

ведущий инженер-геолог<sup>1</sup>  
ShalkinaMV@alrosa.ru

### Батырь Виктория Ярославовна

инженер-технолог I категории<sup>1</sup>  
BatyrVYa@alrosa.ru

### Собакин Алексей Егорович

геолог I категории Вилъюской ГРЭ<sup>3</sup>  
SobakinAE@polymetal.ru

<sup>1</sup> НИГП АК «АЛРОСА» (ПАО), г. Мирный

<sup>2</sup> Мирнинско-Нюрбинский горно-обогатительный комбинат (ГОК) АК «АЛРОСА» (ПАО), г. Мирный

<sup>3</sup> Вилъюская геологоразведочная (ГРЭ) АК «АЛРОСА» (ПАО), г. Мирный

## Authors

### Pomazansky Bogdan Stepanovich

senior researcher Research Geological Enterprise<sup>1</sup>  
PomazanskiyBS@alrosa.ru

### Monkhorov Richard Vladimirovich

leading engineer/geologist<sup>1</sup>  
MonhorovRV@alrosa.ru

### Antonova Tat'yana Anatol'evna

senior researcher<sup>1</sup>  
AntonovaTA@alrosa.ru

### Malkovets Vladimir Grigor'evich

Head of laboratory  
PhD<sup>1</sup>  
MalkovetsVG@alrosa.ru

### Kulagin Alexey Nikolaevich

chief geologist JSC ALROSA (PJSC)<sup>2</sup>  
KulaginAN@alrosa.ru

### Shalkina Marina Vladimirovna

leading engineer/geologist<sup>1</sup>  
ShalkinaMV@alrosa.ru

### Batyr'Viktoria Yaroslavovna

engineer<sup>1</sup>  
BatyrVYa@alrosa.ru

### Sobakin Alexey Egorovich

geologist<sup>3</sup>  
SobakinAE@polymetal.ru

<sup>1</sup> Research Geological Enterprise of JSC ALROSA, Mirny, Russia

<sup>2</sup> Mirny-Nyurbinsky mining and processing complex of JSC ALROSA, Mirny, Russia

<sup>3</sup> Mirny-Nyurbinsky mining and processing complex of JSC ALROSA, Mirny, Russia

## Соотношение между распределением структурных примесей в кристаллах алмаза и алмазоносностью кимберлитовых трубок (на примере Архангельской области и Якутии)

### Ratio of structural impurity distribution in diamond crystals and kimberlite pipe diamond potential (case study of Arkhangelsk region and Yakutia)

Хачатрян Г. К., Анашкина Н. Е.

Khachatryan G. K., Anashkina N. E.

С применением метода ИК-спектроскопии проведено сравнительное изучение алмазов из 12 трубок Архангельской области. На фоне положительной корреляции средних содержаний азота и водорода в алмазах из разных объектов установлено, что кристаллы из убогоалмазоносных трубок характеризуются относительно повышенными концентрациями водорода по сравнению с алмазами из месторождений им. М. В. Ломоносова и им. Гриба.

По распределению структурных примесей алмазы архангельских месторождений отличаются от якутских, что, предположительно, обусловлено разным составом источников вещества сопоставляемых алмазов и термодинамическими условиями их роста. Показано, что в алмазах якутских трубок, так же как и в архангельских, водород является отрицательным фактором алмазоносности. Одной из возможных причин этого является блокирующее действие примеси на рост кристаллов алмаза.

Ключевые слова: алмаз, структурные примеси, азот, водород, кимберлитовые трубки, алмазоносность.

IR spectroscopy was used to compare diamonds from 12 pipes, Arkhangelsk region. Based on positive correlation between average N and H values in diamonds from various deposits, it was found that crystals from low-grade diamond pipes are relatively enriched in hydrogen compared with diamonds from Lomonosov and Grib deposits.

In terms of structural impurity distribution, Arkhangelsk deposit diamonds differ from Yakutian diamonds; it could be due to various composition of compared diamonds' source matter and thermodynamic conditions of their growth. It is shown that hydrogen is a negative factor of diamond potential in both Yakutian and Arkhangelsk diamonds. This can partly be explained by impurity blocking effect on diamond crystal growth.

Keywords: diamond, structural impurities, nitrogen, hydrogen, kimberlite pipes, diamond potential.

Для цитирования: © Хачатрян Г. К., Анашкина Н. Е. Соотношение между распределением структурных примесей в кристаллах алмаза и алмазоносностью кимберлитовых трубок (на примере Архангельской области и Якутии). Руды и металлы. 2021. № 3. с. 114–130. DOI: 10.47765/0869-5997-2021-10023.

For citation: © Khachatryan G. K., Anashkina N. E. Ratio of structural impurity distribution in diamond crystals and kimberlite pipe diamond potential (case study of Arkhangelsk region and Yakutia). Ores and metals, 2021, № 3, pp. 114–130. DOI: 10.47765/0869-5997-2021-10023.

Несмотря на простой химический состав алмаза, его реальная структура содержит многочисленные дефекты, природа которых различна. В настоящее время их известно более пятидесяти.

Наряду с собственными дефектами кристаллической решётки алмаза, представляющими собой вакансии и их скопления, смещённые атомы углерода, точечные и протяжённые дислокации, значительное число микродефектов имеет примесное происхождение. Структурные примеси представляют собой отдельные чужеродные атомы или группы атомов и их комбинации с вакансиями.

Примеси в кристаллической решётке алмаза, с нашей точки зрения, наиболее информативны в генетическом аспекте. Многие из них образуются непосредственно в процессе кристаллизации алмаза. При этом концентрация структурных примесей согласно теории роста кристаллов [19] определяется химическим составом среды, температурой и скоростью процесса. Всё это служит предпосылкой для использования примесей и дефектов кристаллической решётки алмаза в качестве чувствительных индикаторов условий природного алмазообразования.

Среди структурных примесей главную роль играет азот, изоморфно замещающий углеродные атомы в кристаллической решётке алмаза. Общее содержание этой примеси в природных алмазах может достигать 5000 at. ppm [26]. В алмазах из кимберлитов и лампроитов в количественном отношении доминируют азотные А- и В-центры. А-центры представляют собой пару смежных, замещающих углерод атомов азота [14, 21], а В-центры – тетраэдрически сгруппированные вокруг вакансии азотные атомы [20].

Как впервые показано на примере трубок Южной Африки [22–24], суммарное содержание структурного азота ( $N_{tot}$ ) в алмазах взаимосвязано с типом эклогитовой или ультрабазитовой мантийной среды роста алмаза. Так, алмазы с включениями минералов ультрабазитовой ассоциации преимущественно низкоазотные ( $N_{tot} < 400$  at. ppm), а в алмазах эклогитовой ассоциации содержание азота варьи-

руется в значительных пределах (20–1000 at. ppm).

Соотношение концентраций общего азота и его агрегированной формы в кристалле отражает температурный режим алмазообразования [27]. Оно может использоваться в качестве сравнительного полуколичественного критерия температурных условий роста кристалла алмаза.

В отличие от азота, который изоморфно замещает углеродные атомы, водород химически связан с углеродом алмазной решётки. Предполагаемые структурные модели водородных центров следующие:  $^H>C=C<^H$  [14] или  $>C=C<^H$  [28].

Концентрация водородных центров в алмазе отражает содержание водорода в среде алмазообразования. Водород захватывается преимущественно кубическими гранями алмаза при его росте. Ранее нами обосновывалась возможность блокирования роста алмаза при значительных содержаниях водорода в среде кристаллизации [4].

Наиболее информативным количественным методом анализа азотных и водородных центров в кристаллах алмаза является ИК-спектроскопия. С её помощью можно проводить массовое изучение кристаллов без их разрушения и специальной подготовки проб. Этот метод был базовым при исследовании алмазов из трубок Архангельской области и Якутии.

*Объекты и метод исследования.* Объектами изучения послужили кристаллы алмаза (715 шт.) из трубок Золотицкого, Черноозёрского и Кепинского полей Архангельской области (табл. 1). Распределение азота и водорода в архангельских алмазах сопоставлялось с результатами исследования алмазов из якутских трубок, опубликованными нами в работе [1].

Для анализа содержаний азотных центров в алмазах использовалась унифицированная методика, обеспечивающая сопоставимость авторских и зарубежных данных [17]. Концентрация водорода в алмазе прямо пропорциональна коэффициенту поглощения узкой спектральной линии около  $3107\text{ см}^{-1}$  ( $K_{3107}$ ), обусловленной водородными центрами, и оценивалась по величине  $K_{3107}$ .

## 1. Усреднённые концентрации структурных примесей в выборках и популяциях алмаза из трубок Архангельской области

1. Average concentrations of structural impurities in selected samples and diamond populations from Arkhangelsk region pipes

Поле	Трубка	Число образцов	Средние значения концентраций азота и водорода			Характеристика и тип главной популяции		
			$N_{tot}$ , ppm	%N <sub>B</sub>	H, усл. ед.	$N_{tot}$ , ppm	%N <sub>B</sub>	Тип
Черноозёрское	им. Гриба	30	$\frac{794}{(39 - 2796)}$	$\frac{39}{(10 - 65)}$	$\frac{0,7}{(0 - 2,7)}$	$233 \pm 133$	$32 \pm 16$	III
Золотицкое	им. Ломоносова	98	$\frac{838}{(98 - 2810)}$	$\frac{26}{(0 - 95)}$	$\frac{2,1}{(0 - 10,2)}$	$186 \pm 132$	$32 \pm 30$	III
	Пионерская	37	$\frac{224}{(3 - 707)}$	$\frac{24}{(0 - 71)}$	$\frac{1,7}{(0 - 16,9)}$	$294 \pm 94$	$29 \pm 22$	III
	Карпинского-1	64	$\frac{1106}{(28 - 3599)}$	$\frac{28}{(2 - 68)}$	$\frac{3,1}{(0 - 11,5)}$	$1372 \pm 274$	$19 \pm 9$	V
	Архангельская	37	$\frac{1396}{(349 - 2328)}$	$\frac{23}{(9 - 59)}$	$\frac{3,1}{(0,1 - 9,6)}$	$1402 \pm 162$	$22 \pm 12$	V
	Поморская	135	$\frac{1409}{(119 - 4328)}$	$\frac{26}{(0 - 72)}$	$\frac{4,1}{(0 - 16)}$	$1396 \pm 170$	$25 \pm 11$	V
	Снегурочка	106	$\frac{745}{(16 - 4886)}$	$\frac{38}{(0 - 100)}$	$\frac{3,7}{(0 - 28,2)}$	$547 \pm 123$	$50 \pm 8$	VI
	Кольцовская	36	$\frac{594}{(9 - 4193)}$	$\frac{50}{(6 - 100)}$	$\frac{3,4}{(0,1 - 47,2)}$	$561 \pm 125$	$49 \pm 7$	VI
	Первомайская	67	$\frac{471}{(9 - 1405)}$	$\frac{41}{(0 - 97)}$	$\frac{3,3}{(0 - 29,6)}$	$539 \pm 140$	$50 \pm 6$	VI
Кепинское	Юрасская	30	$\frac{778}{(25 - 2209)}$	$\frac{39}{(4 - 100)}$	$\frac{3,1}{(0 - 21,9)}$	$857 \pm 142$	$30 \pm 12$	IV
	ЦНИГРИ-Архангельская	23	$\frac{267}{(19 - 920)}$	$\frac{48}{(8 - 87)}$	$\frac{2,4}{(0 - 10)}$	$267 \pm 141$	$50 \pm 19$	III
	Степная	52	$\frac{332}{(0 - 1623)}$	$\frac{53}{(0 - 100)}$	$\frac{2}{(0 - 10,6)}$	$112 \pm 89$	$70 \pm 32$	II

Примечание. В числителе дроби – среднее по выборке значение, в знаменателе – минимальное и максимальное; при характеристике популяций вычислялись среднеквадратические отклонения  $N_{tot}$  и %N<sub>B</sub>.

Спектры алмазов записывались на ИК-Фурье спектрометре Nicolet-380 корпорации Thermo, USA в комбинации с микроскопом Centaurus в диапазоне 650–4000 см<sup>-1</sup> с разрешением 4–6 см<sup>-1</sup>.

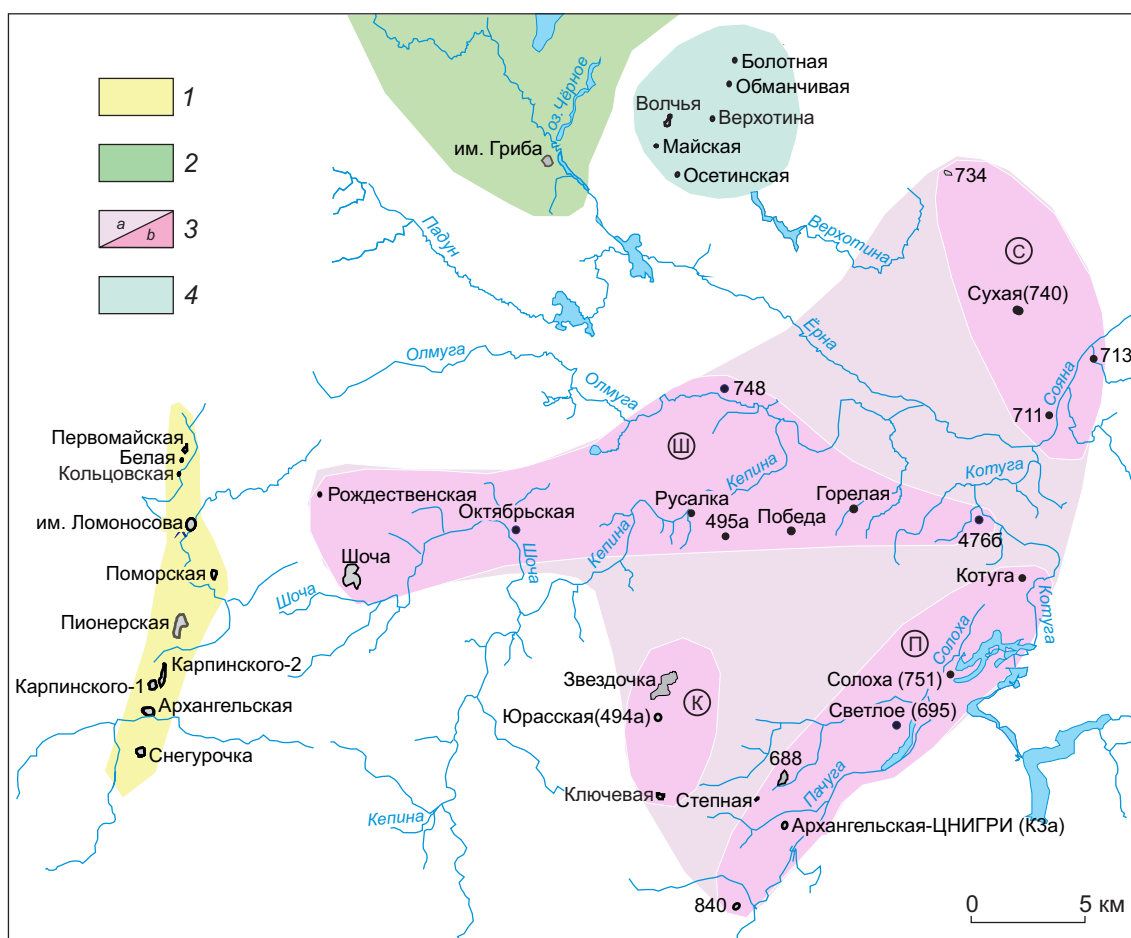
Алмазы каждой из промышленно-алмазоносных трубок (им. Гриба, им. Ломоносова, Пионерская, Поморская, им. Карпинского-1, Архангельская), а также из убогоалмазоносных трубок (Кольцовская, Первомайская, Снегурочка, Степная, ЦНИГРИ-Архангельская и Юрасская) были представлены выборками кристаллов от 23 до 135 штук. Размер боль-

шинства проанализированных кристаллов составляет -2+1 мм, реже -1+0,5 и -4+2 мм.

В связи с ростовой природой примесей азота и водорода данные по их распределению в алмазах сопоставлялись с морфологией и особенностями внутреннего строения кристаллов.

За исключением алмазов из трубки им. Гриба, в основном представленных кристаллами октаэдрической и переходной от октаэдра к ромбододекаэдру формами, среди остальных алмазов Архангельской области преобладают округлые кристаллы ромбододекаэдрического габитуса – додекаэдроидры.





**Рис. 1. Размещение трубок кимберлитов и пикритов Архангельской области:**

поля кимберлитов: 1 – Золотицкое, 2 – Черноозёрское, 3 – Кепинское: *a* – поле, *b* – группы трубок Кепинского поля; Ш – Шочинская, П – Пачугская, К – Ключевская, С – Соянская, включающая тела пикритов; 4 – Верхотинское поле пикритов

**Fig. 1. Location of kimberlite pipes and picrites, Arkhangelsk region:**

kimberlite fields: 1 – Zolotitskoye, 2 – Chernoozerskoye, 3 – Kepinskoye: *a* – field, *b* – groups of the Kepinsky field pipes: Ш – Shochinskaya, П – Pachugskaya, К – Klyuchevskaya, С – Soyanskaya including picrite bodies; 4 – Verkhotinskoye picrite field

Соотношение морфологических разновидностей алмаза в каждой изученной выборке сопоставимо с их распространённостью в соответствующих трубках. Краткая характеристика алмазов рассматриваемых объектов и их геологической позиции приведена ниже.

*Характеристика геологической позиции и особенностей морфологии кристаллов алмаза.* В Архангельской области традиционно вы-

деляют несколько полей [5]: Верхотинское, Золотицкое, Черноозёрское, Кепинское (рис. 1), а также Мельское, Ижемское, Турьинское, Полтинское и Пинежское, причём вопрос об алмазоносности последних остаётся дискуссионным.

По геохимическим характеристикам кимберлиты Золотицкого поля относятся к глинозёмистой серии, а трубка им. Гриба Черно-

озёрского поля и трубки Кепинского поля – к железо-титанистой [12].

Отличительной особенностью Архангельской алмазонасной области по сравнению с районами Сибирской платформы является то, что на сравнительно небольшой площади сосредоточены десятки тел кимберлитов и родственных им пород (см. рис. 1), включающих алмазы с разнообразной морфологией и содержанием структурных примесей в кристаллах.

В *Золотицком поле* шесть промышленных трубок – им. Ломоносова, Пионерская, Поморская, им. Карпинского-1, им. Карпинского-2 и Архангельская, которые рассматриваются в качестве одного месторождения им. М. В. Ломоносова. Кроме них известны ещё четыре трубки: Кольцовская, Пионерская, Белая и Снегурочка, отличающиеся убогой алмазонасностью. Расстояние между отдельными трубками варьируется от 100 м до 2,5 км, общая протяжённость цепочки трубок 14 км.

В каждой трубке месторождения соотношения кристаллов различной формы варьируются [8], но преобладающей формой везде являются додекаэдровиды (в среднем около 70 %). Содержание октаэдрических индивидов низкое (обычно не более 15 %). В трубках им. Ломоносова и Пионерская содержание октаэдрических алмазов немного выше среднего по месторождению. В остальных трубках месторождения им. М. В. Ломоносова немного повышена доля алмазов кубического габитуса (тетрагексаэдровидов), составляющая от 7 до 27 % от общего количества.

Убогоалмазонасные трубки Первомайская, Кольцовская, Белая, а также Снегурочка расположены соответственно севернее и южнее площади месторождения им. М. В. Ломоносова (см. рис. 1).

Минералогические характеристики алмазов из трубок Первомайская, Кольцовская и Снегурочка достаточно сходны [5]. Во всех трёх рассматриваемых трубках преобладают кристаллы ромбододекаэдрического габитуса, доля которых составляет от 58 до 64 % от общего количества. Среди ромбододекаэдрических индивидов типично округлые додекаэдровиды доминируют над ламинарными ромбододека-

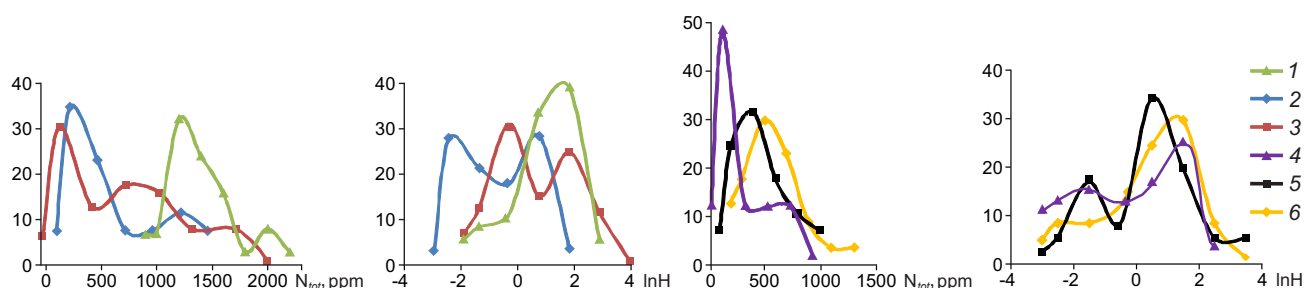
эдрами. Кристаллы октаэдрического габитуса и переходной от октаэдра к ромбододекаэдру формы присутствуют в подчинённом количестве и суммарно составляют от 17 до 22 % от общего числа кристаллов в соответствующих трубках. Относительное содержание алмазов кубического габитуса (тетрагексаэдровидов) среди кристаллов трубок Первомайская, Кольцовская и Снегурочка относительно невелико и составляет ~ 7–8 % от всех индивидов.

Месторождение им. Гриба, расположенное в *Черноозёрском поле*, представлено трубкой им. Гриба, характеризующейся самой высокой алмазонасностью среди известных трубок Архангельской области.

Алмазы трубки характеризуются высоким качеством, 80 % кристаллов прозрачны. В отличие от алмазов месторождения им. М. В. Ломоносова в месторождении им. Гриба преобладают кристаллы октаэдрической и переходной от октаэдра к ромбододекаэдру форм (около половины от общего числа) [5]. Алмазов ромбододекаэдрического габитуса в трубке содержится около одной третьей, а кубического (кубы, тетрагексаэдровиды) – соответственно одной десятой части от общего количества.

Кепинское поле включает более 30 трубок, среди которых выделяют четыре пространственно разобщённые группы: Шочинскую, Пачугскую, Ключевскую и Солянскую (см. рис. 1). Последняя преимущественно представлена телами пикритов. Расположенная в юго-восточной части Кепинского поля Пачугская группа – самая многочисленная, она включает трубки Степная и Архангельская-ЦНИГРИ. Западнее Пачугской группы располагается Ключевская, к которой относится трубка Юраская.

В связи с крайне низкой алмазонасностью трубок Кепинской территории сведения о свойствах алмазов, содержащихся в трубках, весьма ограничены. По данным В. К. Гаранина с соавторами [5], базирующимся на описании 117 кристаллов, среди них преобладают ромбододекаэдры (50–70 %), в подчинённом количестве присутствуют октаэдры и комбинационные формы ряда октаэдр – ромбододекаэдр (10–35 %). Алмазы кубического габитуса, включая тетрагексаэдровиды, не установлены.



**Рис. 2. Кривые распределения алмазов по распределению в кристаллах азота ( $N_{tot}$  at. ppm) и водорода (lnH):**

трубки: 1 – Архангельская, 2 – им. Гриба, 3 – им. Ломоносова, 4 – Степная, 5 – Первомайская, 6 – Снегурочка; число образцов в выборках см. табл. 1.

**Fig. 2. Diamonds distribution curves based on nitrogen ( $N_{tot}$ , at. ppm) and hydrogen (lnH) distribution in crystals:**

pipes: 1 – Arkhangelskaya, 2 – Grib, 3 – Lomonosov, 4 – Stepnaya, 5 – Pervomaiskaya, 6 – Snegurochka; see table. 1 for the number of samples in selections

*Распределение структурных примесей в алмазах Архангельской области.* Выборки алмазов из месторождений Архангельской области охарактеризованы в табл. 1. Из неё видно, алмазы разных трубок даже в пределах одного кимберлитового поля отличаются по среднему содержанию структурного азота в кристаллах ( $N_{tot}$ ). В Золотицком поле самыми высокоазотными являются алмазы из трубок им. Карпинского-1, Архангельская и Поморская (средние значения  $N_{tot}$  1106, 1396 и 1409 at. ppm соответственно). Самые низкие средние значения  $N_{tot}$  зафиксированы в алмазах трубки Пионерская Золотицкого поля (224 at. ppm), а также Степная (332 at. ppm) и Архангельская-ЦНИГРИ (267 at. ppm) Кепинского поля. При этом последние существенно отличаются от кристаллов из трубки Пионерская по степени агрегации азота, соответственно составляющей в среднем 48–53 и 24 % (см. табл. 1). Пониженная степень агрегации азота (23–28 %) отмечена для алмазов всех изученных трубок месторождения им. М. В. Ломоносова, что существенно отличает их от алмазов убогоалмазоносных трубок Золотицкого поля, характеризующихся средними значениями %N<sub>B</sub> 41–50.

Несмотря на то что по усреднённым значениям содержания азота и степени его агрега-

ции алмазы из месторождения им. Гриба сходны с алмазами из трубок Снегурочка и Юраская (см. табл. 1), первые характеризуются минимальными концентрациями водорода ( $\bar{H} \sim 0,7$  усл. ед.).

Средние значения концентрации азота и водорода в кристаллах из разных трубок не всегда достаточно информативны при сопоставлении выборок алмаза. В особенности это относится к случаям двумодального распределения алмазов по содержанию в них примесей.

Как видно из рис. 2, содержание азота и водорода в алмазах из трубок им. Ломоносова, Архангельская варьируется в значительных пределах, при этом в каждой из трубок преобладают определённые группы кристаллов – популяции, характеризующие данный объект. Так, например, в трубке им. Ломоносова преобладают низкоазотные индивиды с общим модальным содержанием примеси ( $N_{tot}$ )  $\sim 180$  at. ppm, а в трубке Архангельская – соответственно высокоазотные кристаллы с модой  $N_{tot} \sim 1260$  at. ppm. Помимо этого, в трубке им. Ломоносова в подчинённом количестве присутствует группа кристаллов (второстепенная популяция) с модой  $N_{tot} \sim 780$  at. ppm. Наличие двух и более популяций алмаза в одной трубке может быть связано с попаданием в неё

кристаллов из разных глубинных алмазоносных слоёв.

В отличие от алмазов большинства трубок месторождения им. М. В. Ломоносова, алмазы месторождения им. Гриба преимущественно низкоазотные (мода  $N_{tot} \sim 275 \text{ at. ppm}$ ).

Модальные значения концентраций водорода в алмазах из трубок месторождений им. М. В. Ломоносова и им. Гриба положительно коррелируют с азотными максимумами (см. рис. 2). Так, высокоазотной моде трубки Архангельская соответствует водородный максимум  $\ln H \sim +1,5$ . Главная популяция алмазов из трубки им. Ломоносова характеризуется модой по водороду  $\ln H \sim -0,5$ , а трубки им. Гриба – модами  $\ln H -1,5$  и  $+0,5$ .

Положительная корреляция содержаний азота и водорода в алмазах рассматривалась нами ранее [15] и объяснялась тем, что азот и водород являются компонентами единых (биогенных) источников вещества алмаза.

Для сравнения на рис. 2 приведены кривые распределения алмазов из убогоалмазоносных трубок Кольцовская, Первомайская и Степная по содержанию в кристаллах структурных примесей азота и водорода.

В Золотицком поле алмазы из убогоалмазоносных трубок Первомайская и Снегурочка отличаются по модальным значениям общего содержания азота, составляющего  $\sim 400$  и  $\sim 500 \text{ at. ppm}$  соответственно. Вместе с тем алмазы убогоалмазоносных трубок этого поля обладают относительно повышенным модальным содержанием водорода, сопоставимым с водородной модой высокоазотных алмазов трубки Архангельская. Так, мода  $\ln H$  составляет  $+1,5$  для трубки Снегурочка и  $+0,5$  для трубки Первомайская.

Высокие модальные значения  $\ln H \sim +1,5$  также характерны для главной популяции алмазов (мода  $N_{tot} \sim 130 \text{ at. ppm}$ ) из трубки Степная Кепинского поля.

Таким образом, для алмазов из трубок Архангельской области отмечается тенденция относительного увеличения содержания водородных центров в алмазах из убогоалмазоносных трубок. Причинами этого могут быть не только специфические термодинамические ус-

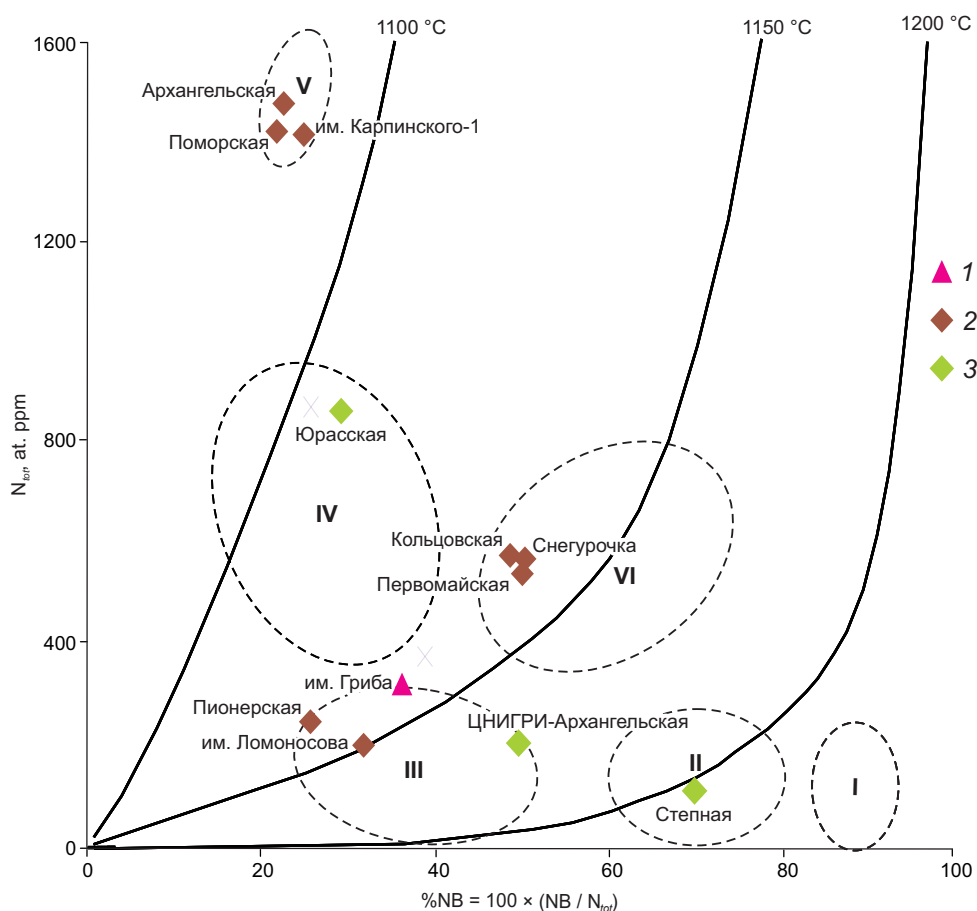
ловия образования кристаллов, но и исходный состав (соотношение N/H) источников вещества алмаза.

Рассмотрим условия образования архангельских алмазов более детально с использованием геотермометрии, основанной на модели В. Р. Тейлора с соавторами [27]. Данные для рассмотрения представлены в табл. 1, содержащей не только средние по выборкам содержания азота и водорода, но и характеристики главных алмазных популяций по каждой трубке. Принципы выделения популяций и их типизация описаны в работе [16].

Распределение азота в кристаллах и тип алмазной популяции, как было показано ранее [15, 16], служат характеристиками мантийных условий образования алмазов из коренных и россыпных проявлений. На рис. 3 видно, что самые низкотемпературные (наименее глубинные) алмазы Архангельской области – из трубок Золотицкого поля Архангельская, Поморская и им. Карпинского-1. Они относятся к популяциям типа V, сформировавшимся преимущественно в эклогитовой среде. Остальные трубки месторождения им. М. В. Ломоносова, а также месторождения им. Гриба в Черноозёрском поле характеризуются относительно более высокотемпературными (глубинными) популяциями алмаза типа III, сформировавшимися главным образом в ультраосновном мантийном субстрате. Как видно из рис. 3, по температурам формирования ( $1100 \text{ }^\circ\text{C}/1 \text{ млрд лет}$ ) к низкоазотным алмазам популяций типа III близки среднеазотные алмазы популяций типа VI, преобладающие в убогоалмазоносных трубках Золотицкого поля Кольцовская, Первомайская и Снегурочка.

Алмазы трубки ЦНИГРИ-Архангельская (К3а) Кепинского поля принадлежат к популяции типа III. Алмазы другой рассматриваемой трубки Пачугской группы – Степной – являются самыми высокотемпературными и глубинными среди алмазов из трубок Архангельской области и относятся к типу популяций II. Среди алмазов изученных трубок популяция типа IV установлена только в трубке Юраская, входящей в Ключевскую группу трубок Кепинского поля.





**Рис. 3. Распределение азота в главных популяциях алмаза на диаграмме [27]:**

алмазы из трубок: 1 – им. Гриба Черноозёрского поля, 2 – Золотицкого поля; 3 – Кепинского поля; римские цифры – номера типов популяций; число образцов в выборках см. табл. 1

**Fig. 3. Nitrogen distribution in the main diamond populations, diagram [27]:**

diamonds from pipes: 1 – Grib, Chernoozerskoye field; 2 – Zolotitskoye field; 3 – Kepinskoye field; roman numerals – population types; see table 1 for the number of samples in selections

Таким образом, в Архангельской области наиболее продуктивными являются те трубки, в которых алмазы принадлежат популяциям типов III и V, распространённым в месторождениях им. М. В. Ломоносова и им. Гриба.

*Сравнительная характеристика алмазов из трубок Архангельской области и Якутии.* В сравнении с архангельскими якутские алмазы, открытые в середине прошлого столетия, изучены более полно и досконально. Е. В. Соболев впервые на примере трубки Мир показал, что распределение азота в выборке алмазов

месторождения индивидуально и может использоваться для идентификации кристаллов из разных объектов [13]. Это послужило толчком для последующих исследований генетической информативности структурных примесей в алмазах и использовании типоморфизма алмаза в прогнозно-поисковых целях. В связи с хорошей изученностью якутских алмазов представляется целесообразным сопоставить их свойства со свойствами алмазов Архангельской области. С нашей точки зрения, это поможет выявить специфику условий и ис-



тории их роста и в какой-то мере судить об источниках вещества архангельских алмазов.

Несмотря на то что территория проявления алмазоносного вулканизма в Архангельской области намного меньше по сравнению с Якутской провинцией, архангельские алмазы более разнообразны по распределению азота и водорода в кристаллах. Особенно это относится к алмазам из трубок Золотицкого поля, представленным, как было показано выше, популяциями типов III, V и VI. По сравнению с этим в кимберлитовых полях Якутии главные популяции алмазов принадлежат к какому-либо одному типу [16].

Существенным отличием сопоставляемых алмазов является то, что продуктивная для Архангельской области популяция типа V в трубках Якутии вообще не обнаружена. Это относится и к популяции типа VI, широко распространённой в убогоалмазоносных трубках Золотицкого поля. Вместе с тем популяции типа IV, характерные для богатейших месторождений Якутии (трубки Интернациональная, Нюрбинская, Мир), а также популяции типа II, типичные для месторождения Муно-Тюнгское, в Архангельской области встречены лишь в убогоалмазоносных трубках.

Таким образом, алмазы основных месторождений Архангельской области (III + V типы популяций) и Якутии (I–IV типы популяций) сформировались в разных по глубинности горизонтах мантии, причём последние в целом более высокотемпературные и глубинные. Выявленные отличия проявились в морфологии и внутреннем строении сопоставляемых кристаллов и зависят, согласно экспериментальным данным, от термодинамических параметров роста алмазов [10]. В области стабильности алмаза кубические формы роста формируются при пониженных температурах, а октаэдрические – при повышенных.

Как отмечалось выше, архангельские алмазы, за исключением кристаллов из трубки им. Гриба, преимущественно представлены додекаэдроидами. В якутских трубках доля типично округлых додекаэдроидов обычно незначительна, при этом наиболее распространены октаэдры, ламинарные ромбододекаэ-

дры и переходные между ними формы. Так, в трубке Удачная преобладают ламинарные ромбододекаэдры, октаэдры и переходные от октаэдра к ромбододекаэдру формы (соответственно ~ 37, 24 и 23 % от общего количества) [9]. При этом доля додекаэдроидов и кубов составляет лишь первые проценты от всех кристаллов.

Внутреннее строение и история роста большинства архангельских алмазов также весьма своеобразны по сравнению с алмазами Якутии, преимущественно характеризующимися послойно-октаэдрической зональностью с прямолинейными границами между зонами, параллельными граням октаэдра. Такая зональность, обусловленная неравномерным захватом примесей растущими гранями, является результатом послойного (тангенциального) механизма роста кристаллов. Октаэдрический габитус кристаллов алмаза и послойно-октаэдрическое внутреннее строение отражают медленный рост кристаллов алмаза в условиях термодинамической стабильности.

Большинство архангельских алмазов (значительная часть додекаэдроидов и кристаллы кубического габитуса) из трубок месторождения им. М. В. Ломоносова частично или полностью сформировались в результате нормального механизма роста.

Признаком роста алмаза по нормальному механизму служит волокнистое внутреннее строение кристаллов, а также волнистый характер фронта роста. Формирование таких кристаллов было сложным и часто сопровождалось сменой послойного механизма роста в начале кристаллизации на нормальный [8]. Иногда такая смена происходила неоднократно [18]. Всё это свидетельствует о нестабильности условий алмазообразования.

Рассмотренный выше тип зональности архангельских алмазов для якутских алмазов не типичен. Нормальный механизм роста у них проявляется в основном на начальном этапе, но в дальнейшем он сменяется послойным [6]. Нередко рост якутских кристаллов начинался по смешанному механизму: нормальному (границы куба) и послойному (границы октаэдра). В результате в центральных частях кристаллов

## 2. Сравнительная характеристика морфологических разновидностей алмазов Архангельской области и Якутии по распределению структурных примесей в кристаллах и условиям их формирования

### 2. Comparative characterization of morphological diamond varieties, Arkhangelsk region and Yakutia, based on structural impurity distribution in crystals and their formation conditions

Форма кристаллов	Месторождение им. М. В. Ломоносова (Архангельск)					Трубка Удачная (Якутия)				
	<i>n</i>	$N_{tot}$ , ppm	%N <sub>B</sub>	<i>H</i> , усл. ед.	<i>T</i> , °C	<i>n</i>	$N_{tot}$ , ppm	%N <sub>B</sub>	<i>H</i> , усл. ед.	<i>T</i> , °C
Октаэдр*	26	331 (0–1270)	36	1,1 (0–3,7)	1150	17	268 (89–490)	24	0,2 (0–0,5)	1140
Октаэдр – ромбододекаэдр**	38	1061 (44–2103)	34	2,1 (0–5,9)	1120	23	301 (15–587)	36	0,5 (0–1,3)	1150
Куб, кубоид, тетрагексаэдр	30	1344 (265–2767)	16	4,1 (0–11,1)	1090	20	655 (376–934)	22	2,3 (1,1–3,6)	1110

Примечание. В числителе – средние по выборке значения, в знаменателе – минимальные и максимальные; \* – октаэдры с тригональной формой граней, \*\* – октаэдры и комбинационные кристаллы ряда октаэдр – ромбододекаэдр с дитригональной формой граней, *n* – число кристаллов,  $N_{tot}$  – общее содержание структурного азота, %N<sub>B</sub> – доля азота в В-форме, *H*, усл. ед. – содержание структурного водорода в условных единицах, *T* – температура алмазообразования для условного возраста 1 млрд лет по диаграмме [27].

образуется своеобразная секториальная структура типа «мальтийский крест». При этом волнистое внутреннее строение с характерным для него волнистым фронтом роста отмечается лишь в алмазах кубического габитуса и алмазах в оболочке, доля которых в якутских трубках очень незначительна.

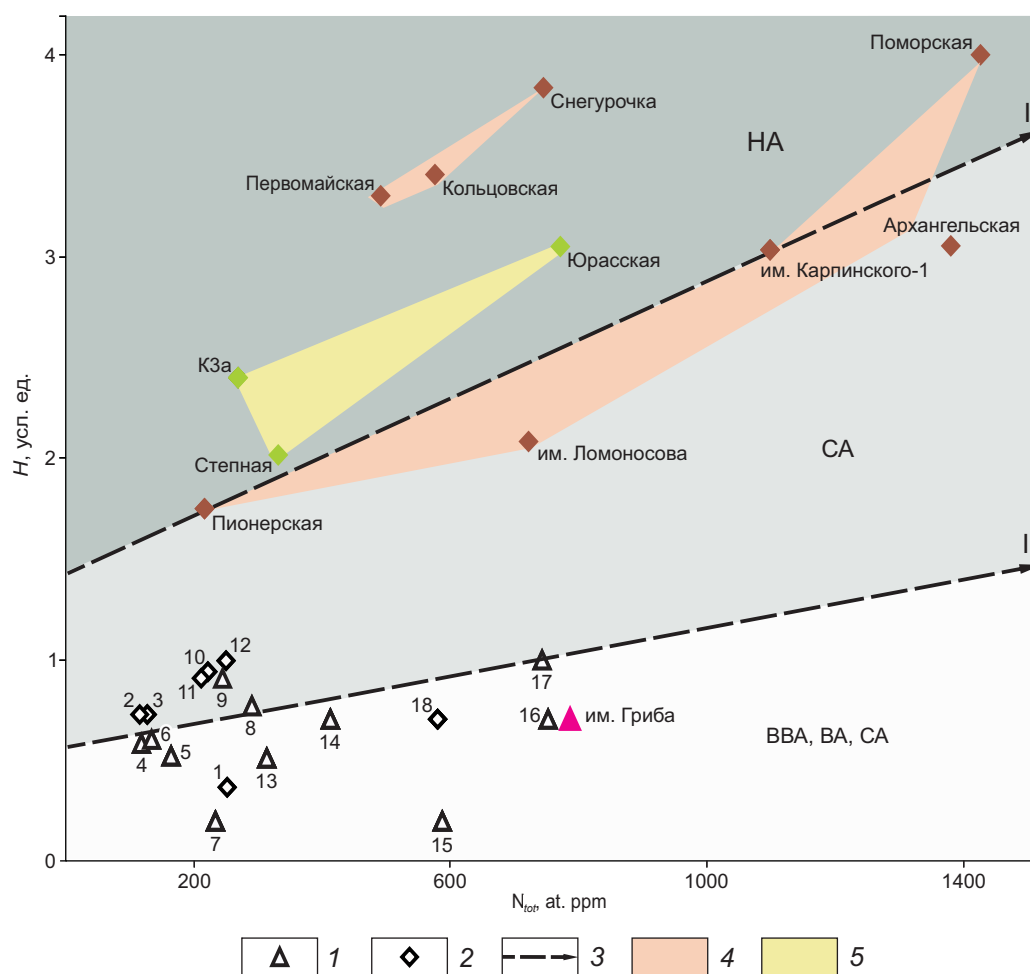
Среди всех морфологических групп архангельских алмазов только октаэдрические индивиды, присутствующие в трубках в подчинённом количестве, характеризуются послойно-зональным или квазиоднородным внутренним строением [8, 11, 18]. Такие кристаллы сформировались в результате послойного механизма роста и по своим морфологическим особенностям они сходны с алмазами Якутии.

Таким образом, возможными причинами разного распределения структурных примесей в алмазах Архангельской области и Якутии служат разные термодинамические условия и механизм роста сопоставляемых кристаллов. Помимо этого следует принимать во внимание химические факторы (состав источников вещества и среды образования алмаза), о чём свидетельствует сравнение одноимён-

ных морфологических групп алмазов из разных трубок, сходных между собой по условиям кристаллизации.

Для корректного сравнения отбирались группы кристаллов, сходных по габитусу и другим внешним морфологическим признакам: октаэдры с тригональными гранями, октаэдры и комбинационные кристаллы ряда октаэдр – ромбододекаэдр с дитригональной формой граней, а также алмазы кубического габитуса из трубок месторождения им. М. В. Ломоносова и Удачная (табл. 2). Средние содержания примесей в кристаллах всех сопоставляемых групп в алмазах месторождения им. М. В. Ломоносова выше, чем в алмазах из трубки Удачная. Ключевое значение при сравнении имеют группы алмазов с тригональной формой граней, обладающих послойно-октаэдрическим внутренним строением, которые характеризуются сходным распределением азота в кристаллах и температурами алмазообразования, но существенно различаются по содержанию водорода (см. табл. 2).

Подобные отличия морфологических групп алмазов пространственно разобщённых мес-



**Рис. 4. Усреднённые содержания азота ( $N_{tot}$ , at. ppm) и водорода (H, усл. ед.) в алмазах (23–135 шт.) из трубок Архангельской области (тренд I) и Якутии (тренд II):**

трубки: 1 – Заполярная, 2 – Поисковая, 3 – Дальняя, 4 – Айхал, 5 – Сытыканская, 6 – Удачная, 7 – Юбилейная, 8 – Молодость-1, 9 – Комсомольская, 10 – Прогнозная, 11 – Зарница, 12 – Краснопресненская, 13 – Ленинград, 14 – Мир, 15 – Спутник, 16 – им. XXIII съезда КПСС, 17 – Интернациональная, 18 – Малокуонапская; доминантные формы алмазов в трубках Якутии: 1 – октаэдрическая, 2 – ромбододекаэдрическая, 3 – линия тренда; области алмазов: 4 – Золотицкого поля, 5 – Кепинского поля; ВВА, ВА, СА, НА – соответственно весьма высокоалмазоносные, высокоалмазоносные, среднеалмазоносные и низкоалмазоносные месторождения; остальные усл. обозн. см. рис.3

**Fig. 4. Average nitrogen ( $N_{tot}$ , at. ppm) and hydrogen (H, conv. units) contents in diamonds (23–135 samples) from pipes of the Arkhangelsk region (trend I) and Yakutia (trend II):**

pipes: 1 – Zapolyarnaya, 2 – Poiskovaya, 3 – Dalnyaya, 4 – Aikhal, 5 – Sytykanskaya, 6 – Udachnaya, 7 – Yubileynaya, 8 – Molodost-1, 9 – Komsomolskaya, 10 – Prognoznaya, 11 – Zarnitsa, 12 – Krasnopresnenskaya, 13 – Leningrad, 14 – Mir, 15 – Sputnik, 16 – CPSU XXIII Congress, 17 – Internatsionalnaya, 18 – Malokuonapskaya; the dominant diamond shapes in the Yakutian pipes: 1 – octahedral, 2 – rhombic dodecahedral, 3 – trend line, 4 – diamond area within Zolotitskoye field, 5 – diamond area within Kepinskoye field; ВВА, ВА, СА, НА – respectively, quite high-grade, high-grade, medium-grade and low-grade diamond deposits; see Fig. 3 for other legend



торождений могут быть обусловлены разным содержанием азота и водорода в источнике вещества алмаза.

*Два тренда распределения азота и водорода в кристаллах алмаза.* Как показано выше, наличие двух групп кристаллов, характеризующихся разным соотношением азота и водорода в кристаллах, обусловлено механизмом их роста, термодинамическими факторами алмазообразования и составом биогенных источников алмазного вещества. На диаграмме (рис. 4) эти группы образуют два тренда: архангельский (I) и якутский (II). Каждый из трендов демонстрирует положительную корреляцию содержания водорода и азота в кристаллах. Однако относительное содержание водорода в архангельских алмазах выше, чем в якутских. Положительная корреляция концентраций азота и водорода в алмазах из разных трубок отмечалась нами ранее [15] и интерпретировалась как результат общности источников азота и водорода в среде алмазообразования. Интересно, что в алмазах отдельных кимберлитовых трубок, например в трубках кластера Пандрэа (район Жуина, Бразилия), корреляция содержаний азота и водорода носит линейный характер. Это признак того, что азот и водород входили в состав одного и того же химического соединения или являлись компонентами какой-либо химической реакции. Однако в большинстве случаев пропорции между концентрациями азота и водорода в алмазах варьируются. Это может быть связано с разным соотношением азота и водорода в составе алмазообразующих органических соединений, а также с тем, что часть водорода может иметь собственный источник. Так, главными компонентами газов, выделенных из алмаза, являются  $N_2$ ,  $H_2O$ ,  $H_2$ ,  $CH_4$  [25], среди которых отмечается разнообразие водородных соединений, а азот представлен лишь одной формой.

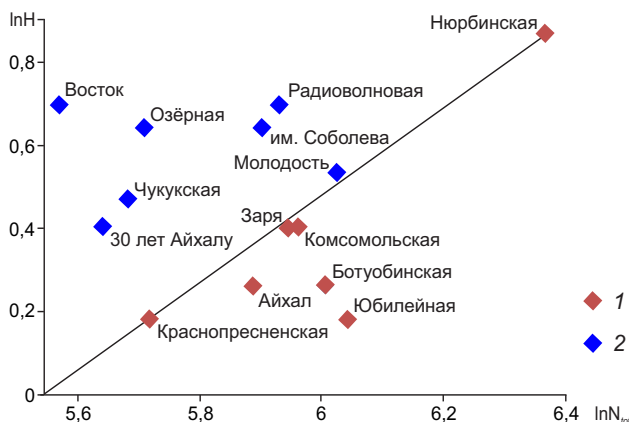
Из рис. 4 видно, что фигуративные точки алмазов из убогоалмазоносных трубок Архангельской области Снегурочка, Первомайская, Кольцовская, Поморская (Золотицкое поле), а также Юраская, Степная, Архангельская-ЦНИГРИ лежат выше линии тренда I, то есть

характеризуются относительно повышенными содержаниями водорода. Также это наглядно видно на кривых распределения алмазов архангельских трубок по содержанию в них азота и водорода (см. рис. 2).

В пределах якутского тренда (II), построенного по 744 кристаллам алмаза из 18 трубок, концентрации водорода в алмазах значительно ниже, а их вариации относительно невелики. К сожалению, в нашем распоряжении не было коллекций алмаза из убогоалмазоносных трубок Якутии, но опубликованные данные [3] подтверждают тенденции, установленные для архангельских алмазов. В работе [3] проведено массовое исследование распределения азота и водорода в алмазах убогоалмазоносных трубок Якутии: Восток, 30 лет Айхалу, Озёрная, Радиоволновая, им. Соболева, Чукукская, а также высокоалмазоносных трубок Нюрбинская, Ботуобинская, Айхал, Комсомольская и Юбилейная. В исследованиях авторы пользовались оригинальной методикой определения концентраций азота и водорода в алмазах, которая не является общепринятой, поэтому нельзя исключить систематической погрешности между их данными и нашими. Тем не менее общая тенденция относительного увеличения концентрации водорода в алмазах убогоалмазоносных трубок прослеживается и на примере Якутии. Это видно из рис. 5, основанного на данных работы [3].

В развитие исследований взаимосвязи алмазоносности трубок Якутии со свойствами кристаллов алмаза Л. Д. Бардухинов проанализировал распределение азота в алмазах из различных коренных месторождений Якутии [2]. Алмазоносность этих трубок варьируется от 0,5 до ~ 9 кар/т. Оказалось, что в алмазах самых высокопродуктивных трубок Интернациональная, Нюрбинская, Мир среднее содержание азота в алмазах выше по сравнению с трубками, содержащими низкоазотные алмазы, – Айхал, Удачная, Зарница, Комсомольская и Юбилейная. Эта особенность позволяет оценить генетическую информативность азота и его роль в природном алмазообразовании.

*Взаимосвязь распределения примесей в алмазах из разных трубок и их алмазоносности.*



**Рис. 5. Соотношение усреднённых концентраций азота ( $\ln N_{tot}$ ) и водорода ( $\ln H$ ) в алмазах из высокопродуктивных (1) и убогоалмазоносных (2) трубок Якутии с использованием данных [3]**

число образцов в каждой изученной выборке алмаза не менее 100 штук

Fig. 5. The ratio of the average nitrogen ( $\ln N_{tot}$ ) and hydrogen ( $\ln H$ ) concentrations in diamonds from highly productive (1) and low-grade (2) Yakutian diamond pipes using data from [3]

the number of samples in each studied diamond selected group is at least 100

Обобщая полученные данные (около 1,5 тыс. кристаллов из 30 объектов), мы можем сделать вывод, что распределение азота и водорода в выборках алмаза из разных трубок коррелирует с их алмазоносностью (см. рис. 4). При этом относительное содержание водорода является отрицательным фактором алмазоносности, а суммарное содержание азота – положительным.

Согласно классификации коренных месторождений алмазов для прогнозно-поисковых целей [7] по содержанию алмазов выделяют четыре группы тел: весьма высокоалмазоносные (Интернациональная, им. XXIII съезда КПСС, Мир), высокоалмазоносные (Удачная, Юбилейная), среднеалмазоносные (Спутник, Дачная, Сытыканская, Комсомольская, Дальняя, Краснопресненская, Заполярная, им. Ло-

моносова, Пионерская, им. Карпинского-1 и -2, Архангельская) и низкоалмазоносные (Поморская). На диаграмме (см. рис. 4) алмазы весьма (ВВА) и высокоалмазоносных (ВА), а также среднеалмазоносных (СА) трубок располагаются ниже линии тренда архангельских алмазов. Алмазы низкоалмазоносной (НА) трубки Поморская месторождения им. М. В. Ломоносова, а также других убогоалмазоносных тел Архангельской области приурочены к верхней части диаграммы и находятся выше линии тренда I.

Причины взаимосвязи алмазоносности трубок и распределения структурных примесей в алмазах могут быть различными. Скорее всего, мы имеем дело с результирующим влиянием сразу нескольких (и, возможно, разнонаправленных) воздействий и факторов.

С позиций разрабатываемой нами концепции образования алмаза с участием органического вещества, погружённого в мантию [15], можно предположить, что общее содержание азота в алмазах отражает концентрацию азотсодержащей биомассы в протолите. Чем она выше, тем выше будет потенциальная алмазоносность мантийной среды, которая выносится на поверхность кимберлитовыми трубками. Водород – также составляющая биомассы, однако, как отмечалось выше, его источники в мантийной среде могут быть и другими. В связи с этим чёткой линейной корреляции между содержаниями азота и водорода, как правило, нет, а положительная связь концентраций этих элементов фиксируется лишь в виде общей тенденции. Фактически же алмазы с одинаковым содержанием азота, отобранные из разных трубок, могут существенно отличаться по содержанию водорода. Например, алмазы из трубок Интернациональная, им. Ломоносова и Снегурочка (см. рис. 4), сходные по распределению азота, характеризуются разным содержанием водорода (соответственно 1, 2,1 и 3,7).

Роль водорода как отрицательного фактора алмазоносности может быть обусловлена негативным влиянием примесей на рост кристаллов алмаза. Как известно из теории и экспериментальных данных, примеси, отлагаясь на растущей поверхности алмаза, препятст-

вуют сначала послойному росту, а при значительных концентрациях – и росту по нормальному механизму. При определённых термодинамических параметрах кристаллизации существуют пороговые значения концентраций примесей, начиная с которых рост кристаллов полностью прекращается. В этом плане азот представляется менее агрессивной примесью по сравнению с водородом. Атом азота близок по размеру к атому углерода и изоморфно замещает его в алмазной решётке, а водород химически адсорбирован растущей поверхностью и образует дефекты, препятствующие дальнейшему «воспроизведению алмазной структуры». Возможность активного воздействия примеси водорода на рост кристаллов алмаза показана нами в работе [4]. Поэтому не исключено, что повышенное содержание водородных центров в алмазах из трубок с низкой алмазоносностью обусловлено тем, что водо-

родные дефекты могут блокировать рост алмазов, так что он прекращается на раннем этапе с образованием большого числа микрокристаллов. По такой же причине в метаморфических породах Кокчетавского массива могут образовываться микроалмазы, характеризующиеся экстремально высокими концентрациями водородных центров.

Таким образом, намечена положительная корреляция алмазоносности архангельских и якутских трубок со средним содержанием азота в кристаллах и, соответственно, отрицательная – с содержанием водорода.

С практической точки зрения выявленное соотношение между распределением примесей в алмазах из разных трубок и их алмазоносностью должно учитываться при предварительной оценке продуктивности прогнозируемых коренных источников алмазов из россыпей.

## Список литературы

1. Анашкина Н. Е., Хачатрян Г. К. Применение метода ИК-Фурье-спектроскопии для оценки технологических свойств и качества алмазного сырья // Руды и металлы. – 2015. – № 3. – С. 70–77.
2. Бардухинов Л. Д. Особенности алмазов и состав включений в них как поисковые признаки на примере Накынского и Алакит-Мархинского кимберлитовых полей : специальность 25.00.11 «Геология, поиски и разведка твёрдых полезных ископаемых, минерагения» : дис. на соискание учёного степен. канд. геол.-минерал. наук / Бардухинов Леонид Данилович. – Улан-Удэ, 2020. – 143 с.
3. Бардухинов Л. Д., Спеццус З. В., Липашова А. Н. Структурные дефекты и минеральные включения в алмазах из кимберлитовых трубок Накынского и Алакит-Мархинского полей по данным КР- и ИК-спектроскопии // Руды и металлы. – 2018. – № 4. – С. 76–86.
4. Блинова Г. К. Структурные примеси как индикаторы механизма роста природных кристаллов алмаза // Доклады АН СССР. – 1987. – Т. 294, № 4. – С. 868–871.
5. Гаранин В. К., Криулина Г. Ю., Гаранин К. В., Самосоров Г. Г. Архангельские алмазы. Новые данные : монография. – М. : МГУ, 2018. – 232 с.
6. Геншафт Ю. С., Якубова С. А., Волкова Л. М. Внутренняя морфология природных алмазов // Исследования глубинных минералов. – М. : ИФЗ РАН, 1977. – С. 5–131.
7. Геология, прогнозирование, методика поисков, оценки и разведки месторождений алмазов. Книга 1. Коренные месторождения / В. М. Подчасов, В. Е. Минорин, И. Я. Богатых [и др.]. – Якутск : ЯФ ГУ СО РАН, 2004. – 548 с.
8. Захарченко О. Д., Махин А. И., Хачатрян Г. К. Типоморфные свойства алмазов : монография. – М. : ЦНИГРИ, 2002. – 104 с.
9. Зинчук Н. Н., Коптиль В. И. Типоморфизм алмазов Сибирской платформы : монография. – М. : Недра, 2003. – 603 с.
10. Литвин Ю. А., Бутузов В. П. О росте кристаллов искусственного алмаза // Доклады АН СССР. – 1968. – Т. 181, № 5. – С. 1123–1125.
11. Палажченко О. В. Комплексные исследования алмаза из месторождений Архангельской кимберлитовой провинции: обобщение, генетические и практические следствия // Вестник Московского государственного университета. Серия 4. Геология. – 2008. – № 2. – С. 68–75.
12. Саблуков С. М., Саблукова Л. И. Реконструкция строения мантийного субстрата Зимнебережно-



- го алмазоносного района по особенностям мантйных ксенолитов и вещественному составу вулканических пород // Региональная геология и металлогения. – 2005. – № 26. – С. 94–102
13. *Соболев Е. В., Ленская С. В.* О проявлении «газовых» примесей в спектрах природных алмазов // Геология и геофизика. – 1965. – № 2. – С. 157–159.
  14. *Соболев Е. В., Лисовайн В. И.* Примесные центры в алмазах // Тезисы VIII Отчётной научной конференции. – Новосибирск, 1971. – С. 60–61.
  15. *Хачатрян Г. К.* Азот и водород в кристаллах алмаза в аспекте геолого-генетических и прогнозно-поисковых проблем алмазных месторождений // Отечественная геология. – 2013. – № 2. – С. 29–40.
  16. *Хачатрян Г. К.* Типизация алмазов из кимберлитов и лампроитов по распределению азотных центров в кристаллах // Руды и металлы. – 2010. – № 2. – С. 46–60.
  17. *Хачатрян Г. К.* Усовершенствованная методика оценки концентраций азота в алмазе и практическое применение // Геологические аспекты минерально-сырьевой базы АК «АЛРОСА». Современное состояние, перспективы, решения. – Мирный, 2003. – С. 319–321.
  18. *Хачатрян Г. К., Палажченко О. В., Гаранин В. К., Иванников П. Ф., Веричев Е. М.* Генезис «неравновесных» кристаллов алмаза из кимберлитовой трубки им. Карпинского-1 по данным катодной люминесценции и ИК-спектроскопии // Вестник Московского государственного университета. Серия 4. Геология. – 2008. – № 2. – С. 38–45.
  19. *Чернов А. А., Гиваргизов Е. И., Багдасаров Х. С. [и др.]*. Современная кристаллография : монография. Том 3. Образование кристаллов / Под ред. Б. К. Вайнштейна, А. А. Чернова, Л. А. Шувалова. – М. : Наука, 1980. – 408 с.
  20. *Bursill L. A., Glaisher R. W.* Aggregation and dissolution of small and extended defect structures in type I a diamond // *American Mineralogist*. – 1985. – V. 70. – P. 608–618.
  21. *Davies G.* The A nitrogen aggregate in diamondits symmetry and possible structure // *Journal of Physics: Conference Series*. – 1976. – V. 9. – P. 537–542.
  22. *Deines P., Harris J. W., Gurney J. J.* Associated chemical and carbon isotopic composition variations in diamonds from Finsch and Premier kimberlite, South Africa // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 1984. – V. 48, № 2. – P. 325–342.
  23. *Deines P., Harris J. W., Gurney J. J.* The carbon isotopic composition and nitrogen content of lithospheric and asthenospheric diamonds from the Jagersfontein and Koffifontein Kimberlite, South Africa; evidens for super <sup>13</sup>C depletion in mantle // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 1991. – V. 55, № 5. – P. 2615–2625.
  24. *Deines P., Harris J. W., Spear P. M., Gurney J. J.* Nitrogen and C<sup>13</sup> content of Finsch and Premier diamonds and their implications // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 1989. – V. 53. – P. 1367–1378.
  25. *Melton C. E., Salotti C. A., Giardini A. A.* The observation of nitrogen, carbon dioxide, methane and argon as impurities in natural diamonds // *American Mineralogist*. – 1972. – V. 57, № 9–10. – P. 1518–1523.
  26. *Scarratt K. A., Fritsh E.* Note on diamond types // *Gems & Gemology*. – 1992. – Spring. – P. 38–42.
  27. *Taylor W. R., Jaques L. A., Ridd M.* Nitrogen-defect aggregation characteristics of Australian diamonds: Time-temperature constraints on the source regions of pipe and alluvial diamonds // *American Mineralogist*. – 1990. – V. 75. – P. 1290–1310.
  28. *Woods G. S., Collins A. T.* Infrared absorption spectra of hydrogen complexes in Type I diamonds // *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. – 1983. – V. 44, No 5. – P. 471–475.

## References

1. Anashkina N. E., Khachatryan G. K. *Primenenie metoda IK-Fur'e-spektroskopii dlya otsenki tekhnologicheskikh svoistv i kachestva almaznogo syr'ya* [The use of the IR Fourier spectroscopy method for assessing the technological properties and quality of diamond raw materials], *Rudy i metally* [Ores and Metals], 2015, No 3, pp. 70–77. (In Russ.).
2. Bardukhinov L. D. *Osobnosti almazov i sostav vkluyucheni v nikh kak poiskovye priznaki na primere Nakynskogo i Alakit-Markhinskogo kimberlitovykh polei* [Diamond features and the composition of inclusions in them as search signs on the example of the Nakyan and Alakit-Marharian kimberlite fields: Extended abstract of candidate's thesis], Ulan-Ude, 2020, 143 p.
3. Bardukhinov L. D., Spetsius Z. V., Lipashova A. N. *Strukturnye defekty i mineral'nye vkluyucheniya v almazakh iz kimberlitovykh trubok Nakynskogo i*



- Alakit-Markhinskogo polei po dannym KR- i IK-spektrskopii [Structural defects and mineral inclusions in diamonds from Kimberlite tubes of the Naryn and Alakit – Marchin fields according to the data of the Cr- and IR spectroscopy], *Rudy i metally [Ores and Metals]*, 2018, No 4, pp. 76–86. (In Russ.).
4. Blinova G. K. Strukturnye primesi kak indikator mekhanizma rosta prirodnykh kristallov almaza [Structural impurities as indicators of the mechanism of natural diamond crystals], *Doklady AN SSSR [Reports of the USSR Academy of Sciences]*, 1987, V. 294, No 4, pp. 868–871. (In Russ.).
  5. Garanin V. K., Kriulina G. Yu., Garanin K. V., Samosorov G. G. Arkhangel'skie almazы. Novye dannye [Arkhangelian diamonds. New data], Moscow, MGU Publ., 2018, 232 p.
  6. Genshaft Yu. S., Yakubova S. A., Volkova L. M. Vnutrennyaya morfologiya prirodnykh almazov [Internal morphology of natural diamonds], *Issledovaniya glubinykh mineralov [Studies of deep minerals]*, Moscow, IFZ RAN Publ., 1977, pp. 5–131.
  7. Geologiya, prognozirovanie, metodika poiskov, otsenki i razvedki mestorozhdenii almazov. Kniga 1. Korennyye mestorozhdeniya [Geology, forecasting, methods of searches, assessment and exploration of diamond deposits. Book 1. Indigenous fields], Yakutsk, YaF GU SO RAN Publ., 2004, 548 p.
  8. Zakharchenko O. D., Makhin A. I., Khachatryan G. K. Tipomorfnye svoystva almazov [Typomorphic properties of diamonds], Moscow, TsNIGRI Publ., 2002, 104 p.
  9. Zinchuk N. N., Koptil' V. I. Tipomorfizm almazov Sibirskoi platformy [Siberian platform diamond typomorphism], Moscow, Nedra Publ., 2003, 603 p.
  10. Litvin Yu. A., Butuzov V. P. O roste kristallov iskusstvennogo almaza [On the growth of artificial diamond crystals], *Doklady AN SSSR [Reports of the USSR Academy of Sciences]*, 1968, V. 181, No 5, pp. 123–1125. (In Russ.).
  11. Palazhchenko O. V. Kompleksnyye issledovaniya almaza iz mestorozhdenii Arkhangel'skoi kimberlitovoi provintsii: obobshchenie, geneticheskie i prakticheskie sledstviya [Comprehensive diamond studies from the Arkhangel'sk Kimberlite Province fields: generalization, genetic and practical consequences], *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya [Moscow University Bulletin. Series 4. Geology]*, 2008, No 2, pp. 68–75. (In Russ.).
  12. Sablukov S. M., Sablukova L. I. Rekonstruktsiya stroeniya mantiinogo substrata Zimnerezhnogo almazonosnogo raiona po osobennostyam mantiinykh ksenolitov i veshchestvennomu sostavu vulkanicheskikh porod [Comprehensive diamond studies from the Arkhangel'sk Kimberlite Province fields: generalization, genetic and practical consequences], *Regional'naya geologiya i metallogeniya [Regional Geology and Metall]*, 2005, No 26, pp. 94–102. (In Russ.).
  13. Sobolev E. V., Lenskaya S. V. O proyavlenii "gazykh" primesei v spektrakh prirodnykh almazov [On the manifestation of "gas" impurities in the spectra of natural diamonds], *Geologiya i geofizika [Russian Geology and Geophysics]*, 1965, No 2, pp. 157–159. (In Russ.).
  14. Sobolev E. V., Lisovain V. I. Primesnye tsentry v almazakh [Impurity centers in diamonds], *Tezisy VIII Otchetnoi nauchnoi konferentsii [Abstracts of the VIII Report Scientific Conference]*, Novosibirsk, 1971., pp. 60–61.
  15. Khachatryan G. K. Azot i vodorod v kristallakh almaza v aspekte geologo-geneticheskikh i prognozno-poiskovykh problem almaznykh mestorozhdenii [Typing diamonds from kimberlites and lamproitons on the distribution of nitrogen centers in crystals], *Otechestvennaya geologiya [National Geology]*, 2013, No 2, pp. 29–40. (In Russ.).
  16. Khachatryan G. K. Tipizatsiya almazov iz kimberlitov i lamproitov po raspredeleniyu azotnykh tsentrov v kristallakh [Typing diamonds from kimberlites and lamproitons on the distribution of nitrogen centers in crystals], *Rudy i metally [Ores and Metals]*, 2010, No 2, pp. 46–60. (In Russ.).
  17. Khachatryan G. K. Uovershenstvovannaya metodika otsenki kontsentratsii azota v almaze i ee prakticheskoe primeneniye [An improved method of estimating nitrogen concentrations in diamond and its practical application], *Geologicheskie aspekty mineral'no-syr'evoi bazy AK "ALROSA". Sovremennoe sostoyaniye, perspektivy, resheniya [Geological aspects of the mineral resource base of AK "ALROSA". Modern condition, prospects, solutions]*, Mirnyi, 2003, pp. 319–321. (In Russ.).
  18. Khachatryan G. K., Palazhchenko O. V., Garanin V. K., Ivannikov P. F., Verichev E. M. Genezis "neravnovesnykh" kristallov almaza iz kimberlitovoi trubki im. Karpinskogo-1 po dannym katodnoi lyuminestsentsii i IK-spektrskopii [The genesis of "non-equilibrium" diamond crystals from a kimberlite tube them. Karpinsky-1 according to cathode luminescence and IR spectroscopy], *Vestnik Moskovskogo*



- gosudarstvennogo universiteta [Moscow University Bulletin. Series 4. Geology]*, 2008, No 2, pp. 38–45. (In Russ.).
19. Chernov A. A., Givargizov E. I., Bagdasarov Kh. S. [et al.] *Sovremennaya kristallografiya. Tom 3. Obrazovanie kristallov [Modern crystallography. Volume 3. The formation of crystals]*, Moscow, Nauka Publ., 1980, 408 p.
  20. Bursill L. A., Glaisher R. W. Aggregation and dissolution of small and extended defect structures in type I a diamond, *American Mineralogist*, 1985, V. 70, pp. 608–618.
  21. Davies G. The A nitrogen aggregate in diamond: symmetry and possible structure, *Journal of Physics: Conference Series*, 1976, V. 9, P. 537–542.
  22. Deines P., Harris J. W., Gurney J. J. Associated chemical and carbon isotopic composition variations in diamonds from Finsch and Premier kimberlite, South Africa, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1984, V. 48, No 2, pp. 325–342.
  23. Deines P., Harris J. W., Gurney J. J. The carbon isotopic composition and nitrogen content of lithospheric and asthenospheric diamonds from the Jagersfontein and Koffifontein Kimberlite, South Africa; evidences for super  $^{13}\text{C}$  depletion in mantle, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1991, V. 55, No 5, pp. 2615–2625.
  24. Deines P., Harris J. W., Spear P. M., Gurney J. J. Nitrogen and  $\text{C}^{13}$  content of Finsch and Premier diamonds and their implications, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1989, V. 53, pp. 1367–1378.
  25. Melton C. E., Salotti C. A., Giardini A. A. The observation of nitrogen, carbon dioxide, methane and argon as impurities in natural diamonds, *American Mineralogist*, 1972, V. 57, No 9–10, pp. 1518–1523.
  26. Scarratt K. A., Fritsh E. Note on diamond types, *Gems & Gemology*, 1992, Spring, pp. 38–42.
  27. Taylor W. R., Jaques L. A., Ridd M. Nitrogen-defect aggregation characteristics of Australian diamonds: Time-temperature constraints on the source regions of pipe and alluvial diamonds, *American Mineralogist*, 1990, V. 75, pp. 1290–1310.
  28. Woods G. S., Collins A. T. Infrared absorption spectra of hydrogen complexes in Type I diamonds, *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 1983, V. 44, No 5, pp. 471–475.

## Авторы

### Хачатрян Галина Карленовна

доктор геолого-минералогических наук  
ведущий научный сотрудник  
khachatryan\_g\_k@mail.ru

### Анашкина Наталия Евгеньевна

кандидат технических наук  
научный сотрудник  
for\_nataliya@list.ru

ФГБУ «Центральный научно-исследовательский геологоразведочный институт цветных и благородных металлов», г. Москва

## Authors

### Khachatryan Galina Karlenovna

PhD  
leading researcher  
khachatryan\_g\_k@mail.ru

### Anashkina Nataliya Evgenevna

PhD  
researcher  
for\_nataliya@list.ru

FSBI Central Research Institute of Geological Prospecting for Base and Precious Metals, Moscow, Russia



## Парагенетическое разнообразие состава гранатов из кимберлитов Накынского поля (Якутия)

### Paragenetic diversity of the composition garnets from kimberlites Nakyn field (Yakutia)

Хмельков А. М., Власова Э. А., Иванов А. С.

Khmelkov A. M., Vlasova E. A., Ivanov A. S.

Изучен состав гранатов из трёх кимберлитовых тел Накынского поля (трубки Нюрбинская и Ботуобинская, дайка Мархинская). Определена парагенетическая специализация гранатов на основе их химического состава с помощью оригинальной программы MineralogicalAnalyse. Данная программа специально создавалась для парагенетической классификации кимберлитовых минералов и способна на данный момент распознавать по составу гранатов 41 парагенезис. Определяемый программой набор парагенетических групп на сегодня наиболее полно характеризует парагенетическое разнообразие состава гранатов из кимберлитов и связанных с ними россыпей. Установлено, что кимберлитовые тела Накынского поля существенно различаются как набором гранатовых парагенезисов, так и их процентным соотношением. Отличительной особенностью гранатов данного поля является повышенное содержание среди них разновидностей эклогитовых парагенезисов. Ксенолиты метаморфических пород фундамента не оказали заметного влияния на парагенетическую ассоциацию гранатов из изученных кимберлитовых тел. Использование программы MineralogicalAnalyse позволяет судить как о парагенетической принадлежности гранатов, так и о глубинных источниках алмазов конкретных кимберлитовых тел.

Ключевые слова: Накынское поле, кимберлиты, гранаты, парагенезис, алмазоносный.

Studied the composition of garnets from three kimberlite bodies of Nakyn field (Nyurbinskaya and Botuobinskaya pipes, Markhinskaya dyke). Paragenetic specialization of garnets was determined on the basis of their chemical composition with use of the original MineralogicalAnalyse program. This program was specially created for paragenetic classification of kimberlite minerals and is currently capable of recognizing 41 paragenesis by the composition of garnets. The set of paragenetic groups determined by the program most fully characterizes paragenetic diversity of the composition garnets from kimberlites and associated placers to date. A significant difference was established between the kimberlite bodies of Nakyn field, both in the set of different garnet paragenesis and in their percentage. A distinctive feature of garnets this field is the increased content of eclogite paragenesis among them. Xenoliths of metamorphic basement rocks did not significantly affect the paragenetic association of garnets from studied kimberlite bodies. Using of the MineralogicalAnalyse program allows one to judge both paragenetic affiliation of garnets and the deep sources of diamonds of specific kimberlite bodies.

Key words: Nakyn field, kimberlites, garnets, paragenesis, diamondiferous.

Для цитирования: Хмельков А. М., Власова Э. А., Иванов А. С. Парагенетическое разнообразие состава гранатов из кимберлитов Накынского поля (Якутия). Руды и металлы. 2021. № 3. 131–141. DOI: 10.47765/0869-5997-2021-10024.

For citation: Khmelkov A. M., Vlasova E. A., Ivanov A. S. Paragenetic diversity of the composition garnets from kimberlites Nakyn field (Yakutia). Ores and metals, 2021, № 3, 131–141. DOI: 10.47765/0869-5997-2021-10024.

*Введение.* Значительная часть макрокристаллических выделений минералов в кимберлитах ксеногенной природы, их происхождение связано с дезинтеграцией мантийных пород. При этом химический состав минералов-индикаторов кимберлитов несёт информацию о процессах глубинного минералообразования. В этой связи парагенезис гранатов косвенно связан с алмазонасностью кимберлитовых пород. Поэтому выяснение парагенетической специализации гранатов в кимберлитах имеет важное практическое значение, так как позволяет судить в том числе о глубинных источниках алмазов конкретных кимберлитовых тел.

Накынское кимберлитовое поле расположено в пределах Средне-Мархинского алмазоносного района Якутской алмазоносной провинции (ЯАП), на левобережье р. Марха в её среднем течении. Данное поле открыто геологами Ботуобинской экспедиции (БГРЭ) АК «АЛРОСА» в 1994 г., и на сегодня в его пределах известны шесть кимберлитовых тел: трубки Ботуобинская и Нюрбинская, тела даечно-го типа Мархинское и Майское и жилы кимберлитов.

Все кимберлитовые тела Накынского поля алмазоносные. Наиболее высоким содержанием алмазов отличаются высокомагнезиальные кимберлиты трубок Нюрбинская, Ботуобинская (> 4 кар/т) и тело Майское (> 3 кар/т). Дайкообразное тело Мархинское характеризуется средней алмазонасностью (< 1 кар/т).

Кимберлитовые тела прорывают кембрийские и ордовикские карбонатные породы и полностью перекрыты терригенной толщей юрских отложений мощностью 60–80 м. Возраст внедрения кимберлитов Накынского поля среднепалеозойский (366–380 млн лет) [6].

Отличительными особенностями кимберлитов Накынского поля являются преобладание среди кимберлитовых минералов гранатов при низком содержании хромшпинелидов и практически полное отсутствие пикроильменита. Гранаты в кимберлитовых породах представлены полной цветовой гаммой: от розовых до тёмно-фиолетовых, почти чёрных при внешнем освещении разностей (рис. 1). Бла-



**Рис. 1.** Внешний вид гранатов из тр. Нюрбинская

**Fig. 1.** Appearance of garnets from Nurbinskaya pipe

годаря повышенному содержанию хрома (до 15 мас. %  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) отдельные зёрна гранатов имеют такой насыщенный тёмно-фиолетовый цвет. Отмечается высокая доля оранжевых гранатов во всех кимберлитовых телах данного поля, содержание которых по данным геологов БГРЭ по отдельным пробам достигает 50 % и более от их общего количества.

В целом для трубок Накынского кимберлитового поля характерна высокая, по сравнению с другими месторождениями ЯАП, доля включений эклогитового парагенезиса, в сумме достигающая 20 % от общего количества алмазов с сингенетическими включениями [4].

*Методика исследований.* Пересчёту и детальному исследованию были подвергнуты химические составы гранатов из трёх кимберлитовых тел Накынского поля – трубок Нюрбинская, Ботуобинская и дайкообразного тела Мархинское. Химический состав гранатов из данных кимберлитовых тел предварительно был проанализирован в ЦАЛ АК «АЛРОСА» на электронно-зондовой системе Superprobe-8800R фирмы JEOL (Япония) с пятиканальным волновым микроанализатором JXA-8800R и рентгеноспектральной приставкой LINK-ISIS 300 фирмы Oxford (Англия) с энергетическим разрешением 133 Эв. Концентрации элементов определялась с относительной ошибкой менее





5 % и чувствительностью до 10n ppm. Полный количественный анализ выполнялся при ускоряющем напряжении 20 кВт и токе пучка 10 нА.

Для определения парагенетической принадлежности гранатов их химические составы, полученные после микронзондового анализа, были обработаны и пересчитаны с помощью специализированной компьютерной программы MineralogicalAnalyse. Данная программа специально создавалась для парагенетической классификации кимберлитовых минералов на основе их химизма и способна на данный момент распознавать по составу гранатов 41 парагенезис [7].

Алгоритм пересчёта микронзондовых анализов и отнесения гранатов к определённому парагенезису, заложенный в программе MineralogicalAnalyse, основан не на расчёте дискриминантных функций [2, 3], а на использовании исключительно химических составов минералов. Определение парагенезиса гранатов осуществляется программой путём сопоставления их состава с составами минералов из эталонных парагенезисов, внесённых в базу данной программы, с привлечением статистических методов на основе макросов. Программа учитывает процентное содержание каждого оксида (в мас. %) и определяет парагенетическую специализацию гранатов по минимальному значению евклидова расстояния с учётом среднего значения и доверительных интервалов по оксидам (минимальный – максимальный). По результатам пересчёта каждому индивидуальному составу программа автоматически присваивает аббревиатуру из начальных букв соответствующего парагенезиса гранатов [7].

Основу эталонной базы программы MineralogicalAnalyse по гранатовым парагенезисам составили химические составы гранатов из опубликованных источников преимущественно из глубинных нодулей [1, 2, 5, 9, 10, 11, 12]; база была существенно дополнена собственными данными.

Программа MineralogicalAnalyse адаптирована под MS Excel. При инсталляции MineralogicalAnalyse в панели листа Excel появляется дополнительная вкладка «Минанализ». В меню данной вкладки выбирается нужный ми-

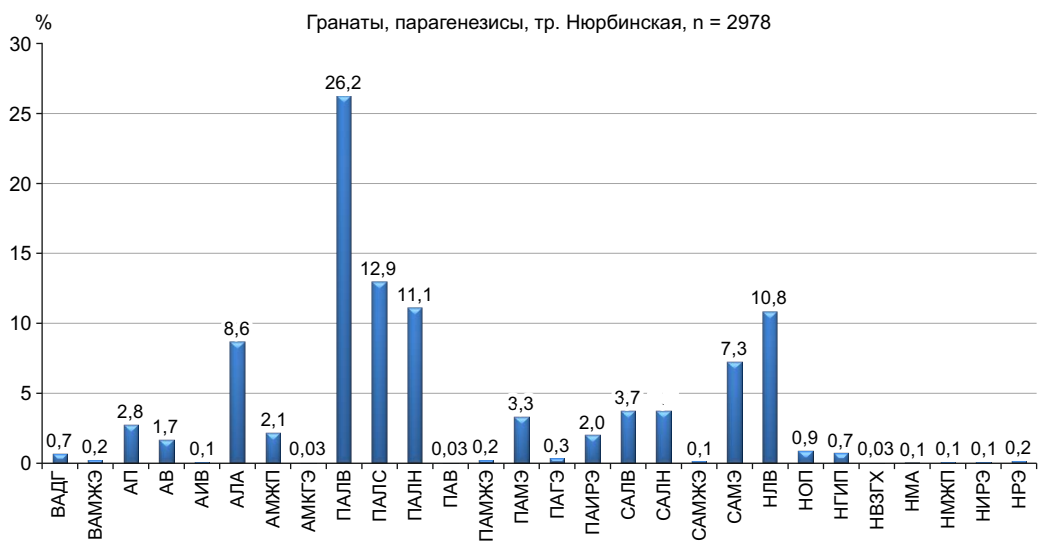
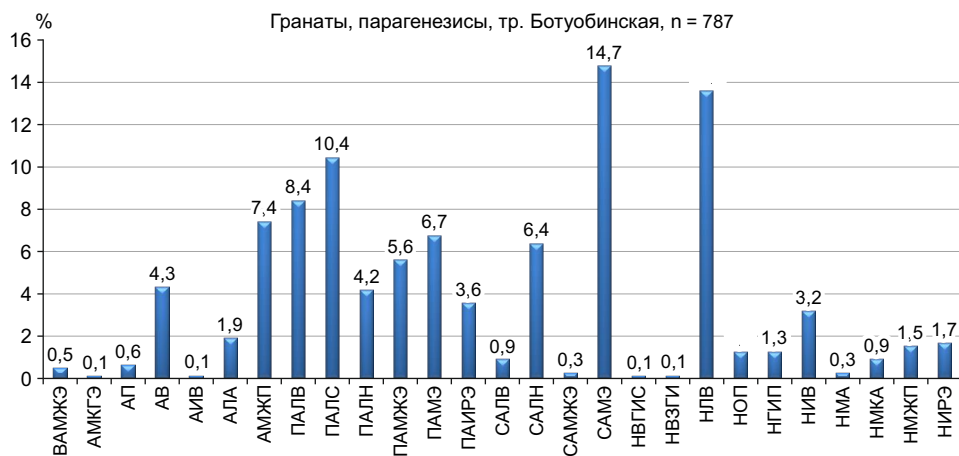
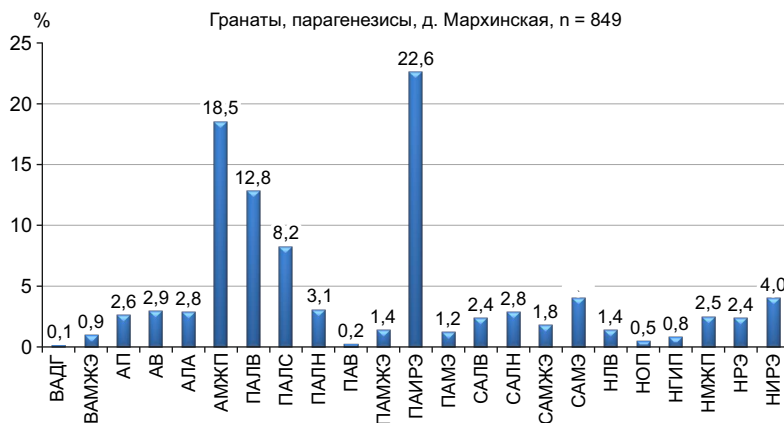
нерал и необходимый алгоритм пересчёта составов с учётом общего железа или его разделения на закисную и окисную формы. По результатам пересчёта программа может в автоматическом режиме создавать сводную таблицу и отстраивать гистограмму распределения минерала по парагенетическим группам.

Большинство гранатовых парагенезисов, составы которых внесены в эталонную базу программы MineralogicalAnalyse, определено петрографически при изучении глубинных ксенолитов. Часть определена косвенным методом по составу, в основном это алмазоносные парагенезисы (в том числе из включений в алмазах).

К гранатам высокоалмазоносных парагенезисов отнесены разности, встречающиеся в качестве включений в алмазах или сростков с ними с типоморфным для них составом. К гранатам алмазоносных парагенезисов – разности исключительно из алмазоносных ксенолитов, также обладающие характерным составом. К разностям потенциально алмазоносных парагенезисов отнесены гранаты, встречающиеся преимущественно в алмазоносных ксенолитах и лишь незначительно – в неалмазоносных. Гранаты слабоалмазоносных парагенезисов в основном представлены разностями из неалмазоносных ксенолитов с единичными находками в алмазоносных нодулях с соответствующим составом. К гранатам неалмазоносных парагенезисов отнесены разности, установленные исключительно в неалмазоносных ксенолитах с типичным для них составом.

Всего с использованием программы MineralogicalAnalyse было пересчитано и проанализировано 4614 химических составов гранатов, в том числе из тр. Нюрбинская – 2978 анализов, из тр. Ботубинская – 787, из дайки Мархинская – 849.

*Результаты исследований и их обсуждение.* Результаты парагенетической классификации гранатов из кимберлитов Накынского поля на основе их состава приведены на рис. 2. Как видно из данного рисунка, гранаты из трёх проанализированных кимберлитовых тел характеризуются значительным разнообразием парагенезисов. Так, среди гранатов из тр. Нюр-



**Рис. 2. Распределение гранатов из кимберлитовых тел Накынского поля по парагенезисам:**

ВАДГ – высокоалмазоносные дуниты и гарцбургиты; ВАМЖЭ – высокоалмазоносные магнезиально-железистые эклогиты; АП – алмазоносные перидотиты; АЛА – алмазоносные лерцолиты с аномально хромистым гранатом; АИВ – алмазоносные ильменитовые верлиты; АВ – алмазоносные вебстериты; АМЖП – алмазоносные магнезиально-железистые пироксениты; АМКГЭ – алмазоносные магнезиальные кальциево-глиноземистые эклогиты; ПАЛВ – потенциально алмазоносные лерцолиты с высокохромистым гранатом; ПАЛС – потенциально алмазоносные лерцолиты со среднехромистым гранатом; ПАЛН – потенциально алмазоносные лерцолиты с низкохромистым гранатом; ПАВ – потенциально алмазоносные верлиты; ПАИРЭ – потенциально алмазоносные ильменит-рутиловые эклогиты; ПАМЖЭ – потенциально алмазоносные магнезиально-железистые эклогиты; ПАГЭ – потенциально алмазоносные глиноземистые эклогиты; ПАМЭ – потенциально алмазоносные магнезиальные эклогиты; САЛВ – слабоалмазоносные лерцолиты с высокохромистым гранатом; САЛН – слабоалмазоносные лерцолиты с низкохромистым гранатом; САМЭ – слабоалмазоносные магнезиальные эклогиты; САМЖЭ – слабоалмазоносные магнезиально-железистые эклогиты; НЛВ – неалмазоносные лерцолиты и вебстериты; НИВ – неалмазоносные ильменитовые верлиты; НМА – неалмазоносные магнезиальные алькремиты; НМКА – неалмазоносные магнезиально-кальциевые алькремиты; НМЖП – неалмазоносные магнезиально-железистые пироксениты; НРЭ – неалмазоносные рутиловые эклогиты (высокожелезистые); НИРЭ – неалмазоносные ильменит-рутиловые эклогиты; НГИП – неалмазоносные гранат-ильменитовые перидотиты и пироксениты; НОП – неалмазоносные ортопироксениты; НВЗГХ – зональные гранаты с включениями хромшпинелидов из неалмазоносных ксенолитов, в том числе верлитов; НВЗГИ – зональные гранаты с включениями ильменита из неалмазоносных ксенолитов, в том числе верлитов; НВГИС – гранат-ильменитовые сростки из неалмазоносных ксенолитов, в том числе верлитов

**Fig. 2. Distribution of garnets from kimberlite bodies of Nakyn field based on paragenesis:**

ВАДГ – highly diamondiferous dunites and harzburgites; ВАМЖЭ – highly diamondiferous magnesian-ferruginous eclogites; АП – diamondiferous peridotites; АЛА – diamondiferous lherzolites with anomalous chromium garnet; АИВ – diamondiferous ilmenite wehrlites; АВ – diamondiferous websterites; АМЖП – diamondiferous magnesian-ferruginous pyroxenites; АМКГЭ – diamondiferous magnesian calcium-aluminous eclogites; ПАЛВ – potentially diamondiferous lherzolites with high-chromium garnet; ПАЛС – potentially diamondiferous lherzolites with medium-chromium garnet; ПАЛН – potentially diamondiferous lherzolites with low-chromium garnet; ПАВ – potentially diamondiferous wehrlites; ПАИРЭ – potentially diamondiferous ilmenite-rutile eclogites; ПАМЖЭ – potentially diamondiferous magnesian-ferruginous eclogites; ПАГЭ – potentially diamondiferous alumina eclogites; ПАМЭ – potentially diamondiferous magnesian eclogites; САЛВ – weakly diamondiferous lherzolites with high-chromium garnet; САЛН – poorly diamondiferous lherzolites with low-chromium garnet; САМЭ – poorly diamondiferous magnesian eclogites; САМЖЭ – poorly diamondiferous magnesian-ferruginous eclogites; НЛВ – non-diamondiferous lherzolites and websterites; НИВ – non-diamondiferous ilmenite wehrlites; НМА – non-diamondiferous magnesian alcremites; НМКА – non-diamondiferous magnesian-calcium alcremites; НМЖП – non-diamondiferous magnesian-ferruginous pyroxenites; НРЭ – non-diamondiferous rutile eclogites (Fe-rich); НИРЭ – non-diamondiferous ilmenite-rutile eclogites; НГИП – non-diamondiferous garnet-ilmenite peridotites and pyroxenites; НОП – non-diamondiferous orthopyroxenites; НВЗГХ – zonal garnets banded with Cr-spinels from non-diamondiferous xenoliths including wehrlites; НВЗГИ – zonal garnets banded with ilmenite from non-diamondiferous xenoliths including wehrlites; НВГИС – garnet-ilmenite intergrowths from non-diamondiferous xenoliths including wehrlites

бинская программа MineralogicalAnalyse идентифицировала 28 парагенезисов, из тр. Ботуобинская – 27, в дайке Мархинская гранаты по составу соответствуют 23 парагенезисам. В общей сложности по трём проанализированным кимберлитовым телам Накынского поля программа определила 32 различные парагенетические группы гранатов. Вариации состава гранатов по выделенным группам приведены в таблице в виде минимальных и максимальных значений по оксидам.

Помимо выделенного разнообразия парагенезисов среди гранатов рис. 2 наглядно демонстрирует, что все три проанализированных кимберлитовых тела существенно различаются набором гранатовых парагенезисов и их процентным соотношением. В тр. Нюрбинская большая часть гранатов (26,2 %) по составу соответствует разностям из потенциально алмазоносных лерцолитов с высокохромистым гранатом (ПАЛВ-парагенезис), тогда как в тр. Ботуобинская наибольшим распространением пользуются гранаты из слабоалмазоносных магнезиальных эклогитов (САМЭ-парагенезис) – 14,7 %. В кимберлитах из дайки Мархинская большинство гранатов (22,6 %) представлено высокожелезистыми разностями (см. табл.) из потенциально алмазоносных ильменит-рутиловых эклогитов (ПАИРЭ-парагенезис).

Характерной особенностью гранатов из кимберлитов Накынского поля является то, что во всех трёх телах отмечены разности из высокоалмазоносных магнезиально-железистых эклогитов (ВАМЖЭ-парагенезис), которые обычно присутствуют в высокоалмазоносных кимберлитовых телах. Причём наибольший процент гранатов данного парагенезиса (0,9 %) отмечен в среднеалмазоносной дайке Мархинская (см. рис. 2). Также во всех трёх телах среди гранатов алмазоносных парагенезисов присутствуют разности из алмазоносных магнезиально-железистых пироксенитов (АМЖП-парагенезис), содержание которых колеблется от 2,1 % в тр. Нюрбинская до 7,4 % в тр. Ботуобинская и 18,5 % в дайке Мархинская. Кроме этого, в трубках Нюрбинская и Ботуобинская по составу идентифицированы достаточно ред-

ко встречающиеся гранаты из алмазоносных магнезиальных кальциево-глиноземистых эклогитов (АМКГЭ-парагенезис). Данные гранаты характеризуются повышенной глинозёмистостью и магнезиальностью при одновременно высоком содержании кальция и низкой примеси хрома (см. табл.). По компонентному составу гранаты АМКГЭ-парагенезиса относятся к альмандин-гроссуляр-пиропам [7].

Другая, редко встречающаяся разновидность гранатов, имеющая место во всех трёх проанализированных кимберлитовых телах, разность из алмазоносных вебстеритов (АВ-парагенезис). Эти гранаты представлены низкохромистыми и низкомагнезиальными разностями (см. табл.) с достаточно высоким содержанием суммарного железа (до 21,73 мас. %  $FeO_{tot}$ ) и натрия (до 0,2 мас. %  $Na_2O$ ). По компонентному составу они относятся к альмандин-пиропам и ранее были обнаружены в качестве включений в алмазах из тр. Нюрбинская [9, 12].

Особо стоит отметить наличие среди алмазоносных парагенезисов аномально хромистых гранатов из алмазоносных лерцолитов (АЛА-парагенезис), которые присутствуют во всех трёх кимберлитовых телах и наравне с отмеченными выше гранатами других парагенезисов характеризуют кимберлиты Накынского поля. Для аномально хромистых гранатов из алмазоносных лерцолитов характерна повышенная хромистость, как правило, превышающая 10 мас. %  $Cr_2O_3$  при одновременно высоком содержании кальция (см. табл.). Гранаты этого парагенезиса имеют весомую долю уваровитового компонента [7]. Разности с подобным составом также были отмечены в качестве включений в алмазах из тр. Нюрбинская [9, 12]. Наиболее высокое содержание гранатов АЛА-парагенезиса характерно для тр. Нюрбинская (8,6 %), несколько меньшее – для тр. Ботуобинская (1,9 %) и дайки Мархинская (2,8 %).

Примечательно, что среди гранатов из тр. Ботуобинская программа не идентифицировала разности из высокоалмазоносных дунитов и гарцбургитов (ВАДГ-парагенезис), которые присутствуют в тр. Нюрбинская (0,7 %) и в дайке Мархинская (0,1 %). Хотя и в этих телах содержание гранатов данного высокоалмазонос-





## Вариации состава гранатов по парагенетическим группам из кимберлитов Накынского поля

Variations of garnet composition by paragenetic groups from Nakyn field kimberlites

Парагенезис	Содержание в мас. %, минимальное – максимальное									
	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	FeO <sub>tot</sub>	
ВАДГ	40,62–41,87	0,0–0,31	13,15–16,23	9,73–13,0	0,37–0,52	20,4–22,44	2,26–4,96	0,0–0,21	6,23–7,6	
ВАМЖЭ	38,72–40,18	0,06–0,61	20,25–22,9	0,0–0,13	0,26–0,51	7,27–10,52	8,41–13,26	0,0–0,20	17,42–22,74	
АП	39,86–42,51	0,0–0,57	15,66–18,95	5,82–10,2	0,3–0,59	20,53–25,5	0,63–4,84	0,0–0,26	6,01–8,22	
АЛА	38,95–42,29	0,0–0,93	11,56–16,73	8,78–14,76	0,27–0,7	15,59–21,16	3,61–10,0	0,0–0,22	6,23–8,33	
АИВ	40,62–41,47	0,12–0,37	20,3–20,94	1,59–3,45	0,34–0,65	16,23–18,38	4,83–5,77	0,0–0,05	10,96–13,56	
АВ	39,39–41,89	0,0–0,59	20,95–22,9	0,0–0,41	0,23–0,48	14,37–17,06	1,56–7,34	0,0–0,2	14,19–21,73	
АМЖП	38,02–42,19	0,0–0,71	20,5–23,45	0,0–0,34	0,2–0,63	11,48–15,06	1,62–7,12	0,0–0,38	15,91–23,46	
АМКГЭ	40,97–41,67	0,24–0,54	22,47–22,61	0,2–0,84	0,2–0,24	16,01–17,28	8,32–8,96	0,05–0,12	8,09–9,84	
ПАЛВ	38,96–43,4	0,0–0,94	15,05–19,17	5,31–10,66	0,25–0,75	16,64–21,49	3,47–9,01	0,0–0,27	6,24–8,86	
ПАЛС	40,14–44,24	0,0–0,82	17,41–22,35	3,72–7,20	0,24–0,64	18,18–23,15	2,51–8,58	0,0–0,37	6,14–8,78	
ПАЛН	40,68–43,32	0,0–0,74	18,10–22,36	1,58–6,82	0,23–0,66	19,68–25,42	0,78–5,61	0,0–0,26	5,95–8,92	
ПАВ	40,50–40,87	0,08–0,23	16,21–17,69	6,21–8,45	0,33–0,39	15,03–16,46	9,9–11,92	0,03–0,04	6,22–6,81	
ПАИРЭ	37,55–41,21	0,0–0,85	19,74–22,72	0,0–0,20	0,19–0,69	7,1–12,76	2,48–9,03	0,0–0,23	16,37–25,01	
ПАМЖЭ	39,6–42,43	0,04–0,62	21,81–23,55	0,0–0,25	0,16–0,42	14,15–17,91	2,69–7,23	0,0–0,21	11,8–15,46	
ПАГЭ	39,4–41,28	0,11–0,16	21,24–22,62	0,0–0,25	0,06–0,27	6,43–12,34	13,42–17,85	0,07–0,19	8,64–11,99	
ПАМЭ	40,3–44,45	0,03–0,75	21,52–24,56	0,0–2,09	0,16–0,55	18,61–22,99	2,37–5,87	0,0–0,26	6,42–10,96	
САЛВ	39,72–44,27	0,0–1,03	13,33–16,75	5,65–10,0	0,24–0,74	16,97–20,66	4,88–8,12	0,0–0,22	6,78–8,78	
САЛН	40,37–44,24	0,0–1,12	16,67–23,54	0,09–4,04	0,21–0,61	18,65–23,1	3,1–5,29	0,0–0,25	7,49–10,65	
САМЭ	40,1–43,56	0,0–0,78	18,02–21,7	2,5–6,7	0,18–0,76	17,33–21,11	3,7–8,16	0,0–0,33	5,64–9,57	
САМЖЭ	39,6–42,04	0,02–0,63	19,68–23,57	0,0–0,3	0,27–0,49	13,58–14,86	4,01–6,02	0,0–0,25	15,57–18,72	
НЛВ	40,47–43,7	0,0–0,79	19,84–24,11	0,17–4,25	0,15–0,7	17,18–21,59	3,28–7,97	0,0–0,37	7,16–10,61	
НИВ	39,73–42,75	0,16–0,5	20,51–22,65	0,13–1,31	0,17–0,36	16,36–18,25	6,46–8,89	0,02–0,13	7,93–12,13	
НМА	41,85–44,91	0,01–0,87	18,18–22,93	1,63–3,23	0,24–0,43	22,73–26,58	0,07–2,17	0,0–0,39	5,18–7,6	
НМКА	42,06–43,45	0,0–0,28	21,5–23,33	0,07–1,65	0,08–0,35	15,0–18,28	8,33–13,35	0,0–0,04	4,81–8,09	
НМЖП	38,85–40,86	0,0–0,99	20,72–22,8	0,06–0,53	0,23–0,46	13,33–14,77	1,4–5,91	0,0–0,15	15,76–21,7	
НРЭ	37,04–39,44	0,0–0,11	20,31–21,76	0,0–0,14	0,4–0,7	6,24–8,54	3,31–8,41	0,0–0,13	23,82–29,73	
НИРЭ	38,98–41,44	0,05–0,71	21,03–23,3	0,0–0,14	0,22–0,38	10,31–14,38	7,31–11,71	0,0–0,22	13,55–17,48	
НГИП	40,32–42,46	0,0–0,94	20,51–23,71	0,03–2,56	0,16–0,61	17,52–19,66	2,4–6,06	0,0–0,22	9,73–13,53	
НОП	40,66–41,95	0,1–0,97	17,43–21,34	1,49–5,49	0,2–0,7	17,12–19,05	4,3–8,35	0,0–0,21	7,27–10,28	
НВЗГХ	39,64	0,16	11,57	14,68	0,71	14,97	10,32	0,03	7,21	
НВЗГИ	39,52	0,15	19,32	4,28	0,69	13,01	10,86	0,00	10,92	
НВГИС	40,31	0,13	20,83	2,52	0,65	15,23	7,66	0,00	12,15	



ного парагенезиса весьма невысокое, что также является отличительной особенностью кимберлитов Накынского поля. В кимберлитах дайки Мархинская содержание гранатов из высокоалмазоносных эклогитов (ВАМЖЭ-парагенезис) даже превышает содержание разностей ВАДГ-парагенезиса (см. рис. 2).

Общее содержание гранатов высокоалмазоносных и алмазоносных парагенезисов для всех изученных кимберлитовых тел Накынского поля достаточно высокое и составляет 16,3 % для тр. Нюрбинская, 15,0 % для тр. Ботубинская и 27,9 % для дайки Мархинская, что характерно для кимберлитовых тел с повышенной алмазоносностью. Суммарное содержание гранатов высокоалмазоносных, алмазоносных и потенциально алмазоносных парагенезисов также высокое и во всех телах превышает 50 % (72,3, 53,9 и 77,5 % соответственно).

Стоит также отметить, что для гранатов из кимберлитов Накынского поля характерно достаточно высокое суммарное содержание разностей эклогитовых парагенезисов. Так, если в тр. Нюрбинская суммарное содержание гранатов эклогитовых парагенезисов (как алмазоносных, так и неалмазоносных) составляет по данным проведённой классификации с использованием программы MineralogicalAnalyse 13,7 %, то в тр. Ботубинская – уже 33,2 %, а в дайке Мархинская – 34,3 % (см. рис. 2). Среди гранатов эклогитовых парагенезисов наибольшим распространением пользуются разности из слабоалмазоносных магнезиальных эклогитов (тр. Ботубинская – 14,7 %), потенциально алмазоносных ильменит-рутиловых эклогитов (дайка Мархинская – 22,6 %, тр. Ботубинская – 3,6 %), потенциально алмазоносных магнезиальных (ПАМЭ-парагенезис) и магнезиально-железистых (ПАМЖЭ-парагенезис) эклогитов (тр. Ботубинская – 6,7 % и 5,6 %, соответственно). Кроме этого, отмечены высокожелезистые разности (см. табл.) из неалмазоносных рутиловых (НРЭ-парагенезис) и ильменит-рутиловых (НИРЭ-парагенезис) эклогитов, которые наиболее характерны для кимберлитов из дайки Мархинская (см. рис. 2). Гранаты из потенциально алмазоносных глиноземистых (ПАГЭ-парагенезис) и слабоалмазоносных магнези-

ально-железистых эклогитов (САМЖЭ-парагенезис) незначительно распространены, и их содержание не превышает 1–2 %.

Важно заметить, что ни в одном из трёх проанализированных кимберлитовых тел программа не идентифицировала гранаты из метаморфических пород фундамента, а также из эклогитоподобных пород. Несмотря на высокое содержание суммарного железа в отдельных гранатах из кимберлитов Накынского поля, его все же недостаточно для разностей из метаморфики. В гранатах из метаморфических пород фундамента содержание железа, как правило, превышает 30 мас. %, достигая 40 и более мас. % FeO [7]. Наиболее же высокожелезистые гранаты из изученных кимберлитовых тел программа MineralogicalAnalyse соотнесла по составу с разностями из неалмазоносных рутиловых эклогитов (23,82–29,73 мас. % FeO), менее железистые соответствуют разностям из неалмазоносных ильменит-рутиловых (13,55–17,48 мас. % FeO) и потенциально алмазоносных ильменит-рутиловых (16,37–25,01 мас. % FeO) эклогитов (см. табл.). Определённую часть высокожелезистых гранатов (15,91–23,46 мас. % FeO) программа идентифицировала как разности из алмазоносных магнезиально-железистых пироксенитов (АМЖП-парагенезис). Высокожелезистые гранаты всех отмеченных выше парагенезисов наиболее характерны для дайки Мархинская, хотя встречаются и в других кимберлитовых телах данного поля. Таким образом, утверждения отдельных исследователей, что для кимберлитов Накынского поля характерно повышенное содержание гранатов из метаморфических и эклогитоподобных пород фундамента, сделанное с учётом их высокой железистости, которая, в свою очередь, связывается с высоким содержанием в телах ксенолитов метаморфических пород [8], не совсем правомерны. Результаты проведённой классификации гранатов с использованием программы MineralogicalAnalyse показали, что ксенолиты метаморфических пород фундамента не оказали сколько-нибудь заметного влияния на парагенетическую ассоциацию гранатов из кимберлитов Накынского поля.

**Заключение.** Результаты проведённых исследований состава гранатов с использованием программы MineralogicalAnalyse показали, что кимберлитовые тела Накынского поля существенно различаются как набором гранатовых парагенезисов, так и их процентным соотношением. Так, для тр. Нюрбинская наиболее характерны гранаты из потенциально алмазоносных лерцолитов с высокохромистым гранатом, тогда как в тр. Ботубинская преобладают гранаты из слабоалмазоносных магниезильменитовых эклогитов, а в дайке Мархинская – из потенциально алмазоносных ильменит-рутиловых эклогитов. Данное обстоятельство может существенно помочь идентифицировать шлиховые ореолы в пределах Накынского кимберлитового поля, так как при общей трансформации минеральной ассоциации в процессе ореолообразования набор парагенезисов среди кимберлитовых минералов и их соотношения слабо меняются. Это позволяет проводить сравнительный анализ минералов из шлиховых ореолов и ближайших кимберлитовых тел.

Среди достаточно представительных выборок гранатов из трёх изученных кимберлитовых тел, по проведённой классификации, отсутствуют гранаты, по составу соответствующие разностям из метаморфических пород фундамента. Таким образом, ксенолиты метаморфических пород фундамента не оказали заметного влияния на парагенетическую ассоциацию гранатов из кимберлитов Накынского поля. Наиболее высокожелезистые разности в соответствии с проведённой в MineralogicalAnalyse идентификацией соответствуют разностям из неалмазоносных рутиловых эклогитов, менее железистые – разностям из потенциально алмазоносных ильменит-рутиловых, неалмазоносных ильменит-рутиловых и рутиловых эклогитов.

Общая отличительная особенность гранатов из кимберлитов Накынского поля – повышенное содержание разностей эклогитовых парагенезисов. Особенно это относится к тр. Ботубинская и дайке Мархинская, в которых общее содержание эклогитовых гранатов составляет 33,2 и 34,3 % соответственно. Учиты-

вая высокий процент среди эклогитовых гранатов высокожелезистых разностей ПАИРЭ-парагенезиса, особенно в кимберлитах дайки Мархинская (22,6 %), не исключено, что источником определённой части алмазов, пусть и незначительной, в кимберлитах данного поля могли служить потенциально алмазоносные ильменит-рутиловые эклогиты. Основными же источниками алмазов в изученных кимберлитовых телах Накынского поля по проведённой парагенетической классификации гранатов с использованием программы MineralogicalAnalyse являлись алмазоносные лерцолиты с аномально хромистым гранатом (особенно в тр. Нюрбинская) и алмазоносные магниезильменит-железистые пироксениты (преимущественно в тр. Ботубинская и дайке Мархинская). Кроме этого, источниками алмазов в описываемых кимберлитах также служили алмазоносные вебстериты, судя по присутствию гранатов соответствующего парагенезиса во всех телах поля, а также алмазоносные перидотиты и высокоалмазоносные магниезильменит-железистые эклогиты. В меньшей мере поставщиками алмазов являлись высокоалмазоносные дуниты и гарцбургиты (тр. Нюрбинская и дайка Мархинская) и, незначительно, алмазоносные ильменитовые верлиты и алмазоносные магниезильменитовые кальциево-глиноземистые эклогиты (трубки Нюрбинская и Ботубинская).

Таким образом, использование программы MineralogicalAnalyse позволяет судить не только о парагенетической принадлежности гранатов, но и о глубинных источниках алмазов конкретных кимберлитовых тел. Парагенетические особенности составов гранатов из кимберлитов Накынского поля могут быть использованы при алмазопоисковых работах для идентификации шлиховых ореолов.

*Огромную благодарность авторы выражают Гриценко Андрею Викторовичу за помощь в создании программы MineralogicalAnalyse и написание алгоритма пересчёта анализов.*

*The authors express their deep gratitude to Andrey V. Gritsenko for help in creating the «MineralogicalAnalyse» program and writing analysis recalculation algorithm.*

## Список литературы:

1. Богатиков О. А., Гаранин В. К., Кононова В. А., Кудрявцева Г. П., Васильева Е. Р., Вержак В. В., Веричев Е. М., Парсаданян К. С., Посухова Т. В. Архангельская алмазоносная провинция. – М. : МГУ, 1999. – 524 с.
2. Гаранин В. К., Кудрявцева Г. П., Марфунин А. С., Михайличенко О. А. Включения в алмазе и алмазоносные породы. – М. : МГУ, 1991. – 240 с.
3. Доусон Дж. Кимберлиты и ксенолиты в них. – М. : Мир, 1983. – 300 с.
4. Коптиль В. И., Кедрова Т. В., Помазанский Б. С., Богуш И. Н., Ковальчук О. Е., Антипин И. Ив. Сравнительный анализ типоморфных особенностей алмазов из кимберлитовых тел и разновозрастных россыпей Средне-Мархинского алмазоносного района // Проблемы прогнозирования и поисков месторождений алмазов на закрытых территориях : материалы конференции, посвященной 40-летию ЯНИГП ЦНИГРИ АК «АЛРОСА». – Якутск : ЯНЦ СО РАН, 2008. – С. 177–183.
5. Кротков В. В., Кудрявцева Г. П., Богатиков Е. П., Валуев Е. П., Вержак В. В., Гаранин В. К., Заостровцев А. А., Кононова В. А., Литинский Ю. В., Пашкевич И. Р., Степанов А. Н., Фортыхин В. С. Новые технологии разведки алмазных месторождений. – М. : ГЕОС, 2001. – 310 с.
6. Митюхин С. И., Специус З. В. Включения в алмазах из кимберлитовой трубки Ботуобинская (Накынское поле, Якутия) // Геология и геофизика. – 2005. – № 12. – С. 1198–1206.
7. Хмельков А. М., Власова Э. А. Парагенезисы гранатов из кимберлитов // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. – 2018. – № 4. – С. 9–19.
8. Специус З. В., Серенко В. П. Глубинные ксенолиты из кимберлитов Накынского поля // Геологические аспекты минерально-сырьевой базы акционерной компании «АЛРОСА»: современное состояние, перспективы, решения. – Мирный, 2003. – С. 192–196.
9. Malkovets V., Zedgenizov D., Griffin W., Dak A., O'Reilly S., Pokhilenko N., Mityukhin S. Diamondiferous microxenoliths and xenocrysts from the Nyurbinskaya kimberlite pipe, Yakutia // 9th International Kimberlite Conference Extended Abstract No 91KC-A-00224. – 2008.
10. O'Brien H. E., Birnie A. C., Spencer R. G. Diamondiferous megacrystal garnet and orthopyroxene from Lihobong, Lesotho // 10th International Kimberlite Conference Extended Abstract No 10IKC-229. – 2012.
11. Smith C. B., Bulanova G. P., Walter M. J., Kohn S. C., Mikhail S., Gobbo L. Origin of diamonds from the Dachine ultramafic, French Guyana // 10th International Kimberlite Conference Extended Abstract No 10IKC-97. – 2012.
12. Spetsius Z. V., Taylor L. A., Valley J. W., DeAngelis M. T., Spicuzza M., Ivanov A. S., Banzeruk V. I. Diamondiferous xenoliths from crustal subduction: garnet oxygen isotopes from the Nyurbinskaya pipe, Yakutia // European Journal of Mineralogy. – 2008. – № 20. – P. 375–385.

## References:

1. Bogatikov O. A., Garanin V. K., Kononova V. A., Kudryavtseva G. P., Vasil'eva E. R., Verzhak V. V., Verichev E. M., Parsadanyan K. S., Posukhova T. V. Arkhangel'skaya almazonosnaya provintsiya [Arkhangel'sk diamondiferous province], Moscow, MGU Publ., 1999, 524 p.
2. Garanin V. K., Kudryavtseva G. P., Marfunin A. S., Mikhailichenko O. A. Vklucheniya v almaze i almazonosnye porody [Inclusions in diamond and diamond-bearing rocks], Moscow, MGU Publ., 1991, 240 p.
3. Douson Dzh. Kimberlity i ksenolity v nikh [Kimberlites and their xenoliths], Moscow, Mir Publ., 1983, 300 p.
4. Koptil' V. I., Kedrova T. V., Pomazanskii B. S., Bogush I. N., Koval'chuk O. E., Antipin I. Iv. Sravnitel'nyi analiz tipomorfnykh osobennostei almazov iz kimberlitovykh tel i raznovozrastnykh rossypei Sredne-Markhinskogo almazonosnogo raiona [Comparative analysis of typomorphic features of diamonds from kimberlite bodies and placers of different age in the Sredne-Markhinsky diamondiferous region], *Problemy prognozirovaniya i poiskov mestorozhdenii almazov na zakrytykh territoriyakh: materialy konferentsii, posvyashchennoi 40-letiyu YaNIGP TsNIGRI AK "ALROSA"* [Problems of forecasting and prospecting for diamond deposits in closed areas: materials of the conference dedicated to the 40th anniversary of





- YANIGP TsNIGRI of AK "ALROSA", Yakutsk, YaNTs SO RANPubl., 2008, pp. 177–183. (In Russ.).
5. Krotkov V. V., Kudryavtseva G. P., Bogatkov E. P., Valuev E. P., Verzhak V. V., Garanin V. K., Zaostrov-tsev A. A., Kononova V. A., Litinskii Yu. V., Pashke-vich I. R., Stepanov A. N., Fortygin V. S. Novye tekhnologii razvedkialmaznykh mestorozhdenii [New technologies for exploration of diamond deposits], Moscow, GEOS Publ., 2001, 310 p.
  6. Mityukhin S. I., Spetsius Z. V. Vklucheniya v almazakh iz kimberlitovoi trubki Botuobinskaya (Nakynnskoe pole, Yakutiya) [Inclusions in diamonds from Botuobinskaya kimberlite pipe (Nakynskoe field, Yakutia)], *Geologiya i geofizika [Russian Geology and Geophysics]*, No 12, 2005, pp. 1198–1206. (In Russ.).
  7. Khmelkov A. M., Vlasova E. A. Paragenezisy granatov iz kimberlitov [Garnet paragenesis from kimberlites], *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya [Proceedings of Voronezh State University, Series: Geology]*, 2018, No 4, pp. 9–19. (In Russ.).
  8. Spetsius Z. V., Serenko V. P. Glubinnye ksenolity iz kimberlitov Nakynskogo polya [Deep xenoliths from kimberlites of Nakyn field], *Geologicheskie aspekty mineral'no-syr'evoi bazy aktsioneranoi kompanii "ALROSA": sovremennoe sostoyanie, perspektivy, resheniya [Geological aspects of mineral resource base of the joint-stock company "ALROSA": current state, prospects, solutions]*, Mirnyi, 2003, pp. 192–196. (In Russ.).
  9. Malkovets V., Zedgenizov D., Griffin W., Dak A., O'Reilly S., Pokhilenko N., Mityukhin S. Diamondiferous microxenoliths and xenocrysts from the Nyurbinskaya kimberlite pipe, Yakutia, *9th International Kimberlite Conference Extended Abstract*, No 91KC-A-00224, 2008.
  10. O'Brien H. E., Birnie A. C., Spencer R. G. Diamondiferous megacrystal garnet and orthopyroxene from Liqhobong, Lesotho, *10th International Kimberlite Conference Extended Abstract*, No 10IKC-229, 2012.
  11. Smith C. B., Bulanova G. P., Walter M. J., Kohn S. C., Mikhail S., Gobbo L. Origin of diamonds from the Dachine ultramafic, French Guyana, *10th International Kimberlite Conference Extended Abstract*, No 10IKC-97, 2012.
  12. Spetsius Z. V., Taylor L. A., Valley J. W., DeAngelis M. T., Spicuzza M., Ivanov A. S., Banzeruk V. I. Diamondiferous xenoliths from crustal subduction: garnet oxygen isotopes from the Nyurbinskaya pipe, Yakutia, *European Journal of Mineralogy*, 2008, No 20, pp. 375–385.

## Авторы

### Хмельков Александр Михайлович

кандидат геолого-минералогических наук  
st\_56@mail.ru

### Власова Эльвира Александровна

геолог I категории<sup>1</sup>  
KulaninaEA@alrosa.ru

### Иванов Александр Сергеевич

кандидат геолого-минералогических наук  
ведущий научный сотрудник<sup>2</sup>  
asivan@mail.ru

<sup>1</sup> Вилюйская геологоразведочная экспедиция  
АК «АЛРОСА» ПАО, Якутия

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский горный университет

## Authors

### Khmelkov Alexander Mikhaylovich

PhD  
st\_56@mail.ru

### Vlasova Elvira Alexandrovna

geologist I category<sup>1</sup>  
KulaninaEA@alrosa.ru

### Ivanov Alexander Sergeevich

PhD  
leading resercher<sup>2</sup>  
asivan@mail.ru

<sup>1</sup> JSC ALROSA (PJSC),  
Yakutia, Russia

<sup>2</sup> Saint Peterburg Mining University, Russia

ПОЗДРАВЛЯЕМ С ЮБИЛЕЕМ



Известному исследователю месторождений золота, ветерану Центрального научно-исследовательского института цветных и благородных металлов **Виктору Петровичу Филиппову** исполнилось 80 лет.

Виктор Петрович трудился в ЦНИГРИ на протяжении полувека, и с его именем связаны важные страницы изучения экзогенной золотоносности и выявления коренных источников золота. После окончания МГРИ он начал работать в Берелехской геологоразведочной экспедиции, сотрудничал с прекрасными магаданскими геологами. Затем принимал участие в поисках россыпных месторождений золота в Афганистане. Придя в ЦНИГРИ в 1974 г. совсем молодым геологом, он уже обладал глубокими знаниями и кругозором в интереснейшей области исследований, которой посвятил потом несколько десятилетий.

В. П. Филиппову удалось собрать и проанализировать весьма значительные материалы для определения перспектив россыпной и коренной золотоносности центральных районов Магаданской области; он принял участие в открытии нового рудопроявления Глухариное в пределах Наталкинского рудного поля. В 1987 г. за работу «Типы коренных источников россыпей золота и их прогнозно-поисковое значение (юго-восточная часть Яно-Колымского пояса)» В. П. Филиппову была присвоена учёная степень кандидата геолого-минералогических наук.

Затем вместе с коллегами Виктор Петрович подготовил комплект карт и пояснительную записку «Экзогенная золотоносность и платиноносность Российской Федерации», удостоенные в 2001 г. премии Правительства РФ. В рамках исследований по оценке золотоносности терригенных и черносланцевых толщ руководил составлением карт экзогенной золотоносности Магаданской области, Республики Саха (Якутия), Чукотского АО. Благодаря его работе заполнены многие пробелы в научных представлениях о связи коренных источников и россыпей, выявлен ряд закономерностей пространственного размещения россыпеобразующих формаций Магаданской области, Хабаровского края и Приморья, Таймыра, Урала, Бурятии, Кемеровской области, других регионов России.

Важный этап исследований В. П. Филиппова – оценка золотоносности мезо-кайнозойского чехла платформенных областей Русской платформы. Под его руководством в ряде областей центральных районов России выделены перспективные площади на аллювиальные россыпи и золотосодержащее песчано-гравийное сырьё, в котором было найдено самородное золото.

Виктор Петрович Филиппов – один из лучших экспертов в своей сфере, значителен его вклад в научно-методическое сопровождение работ на объектах рудного и россыпного золота Таймырского АО, Хабаровского края, Республики Саха (Якутия), Забайкальского края, Иркутской, Амурской, Пермской областей, Центрального и Северо-Западного федеральных округов. Его знания и опыт были востребованы при оценке ресурсного потенциала цветных и благородных металлов в восточных районах Северного, Приполярного и Полярного Урала.

Как руководитель Виктор Петрович всегда умел создать в коллективе благоприятный климат. Его доброжелательность, замечательное знание людей, чудесное чувство юмора помогали решать поставленные задачи.

Мы желаем Виктору Петровичу крепкого здоровья и успехов во всех делах!

*Учёный совет ЦНИГРИ  
Редколлегия журнала*

ПОЗДРАВЛЯЕМ С ЮБИЛЕЕМ



10 октября 2021 года Председатель Президиума ООО «Ветеран-геологоразведчик», заслуженный геолог Российской Федерации **Леонид Павлович Антонович** отметил 80-летний юбилей.

За плечами Леонида Павловича яркая, полная замечательных событий жизнь. Он принимал участие в открытии месторождений алмазов, золота, угля, железных руд, апатита. Леонид Павлович Антонович – крупный специалист в сфере проведения геологоразведочных работ и великолепный организатор, обладающий уникальным опытом работы с людьми.

Возглавляя Президиум Общероссийской общественной организации «Ветеран-геологоразведчик», Леонид Павлович всемерно содействует работе региональных ветеранских организаций геологоразведочной отрасли России, с большим вниманием относится к задаче социальной и моральной поддержки ветеранов-геологоразведчиков нашей страны.

Леонид Павлович Антонович принадлежит к поколению, на долю которого выпали тяжёлые испытания в детские годы. Его отец, имея бронь как многодетный родитель (Леонид Павлович – восьмой ребёнок в семье), ушёл добровольцем на фронт и погиб, защищая Ленинград от налёта фашистских бомбардировщиков. Мать в условиях Крайнего Севера вырастила детей, из которых шестеро получили высшее и среднее специальное образование. Памяти отца Павла Григорьевича и матери Прасковьи Семёновны Леонид Павлович посвятил свой очерк в книге «Геологи — дети войны». Желая как можно быстрее начать помогать семье, он в 15 лет поступил в Алданский горный техникум. Так начался путь Леонида Павловича в геологии.

Целеустремлённость юного ученика Горного техникума, профессионализм преподавателей, три сложнейшие производственные практики в шахтах Западной Сибири помогли Леониду Антоновичу к окончанию техникума получить очень хорошие знания и навыки практической работы. А ещё он завершил первый этап обучения с удостоверениями бурильщика, проходчика подземных горных выработок, машиниста электровоза и породопогрузочной машины! И эти документы очень пригодились в последующей работе.

По распределению, состоявшемуся в 1960 г., молодой техник Леонид Антонович с женой Валентиной попал в Аллах-Юньскую экспедицию Якутского геологического управления, где на разведке Буларского золоторудного месторождения вначале трудился проходчиком, а через три месяца стал горным мастером. Приступив к работе на слюдяном руднике Эмельджак, Леонид Павлович проявил себя как прекрасный специалист и организатор: через пять лет он уже был начальником участка эксплуатационной разведки со штатом 460 человек.

В 1965 г. Леонид Павлович Антонович стал студентом Якутского государственного университета и почти одновременно приступил к работе в Якутском ПГО – самом крупном в стране не только по территории (3,1 млн км<sup>2</sup>) и численности работников (около 30 тыс.), но и по выполняемым ежегодно физическим объёмам геологоразведочных работ. В этой мощной организации Леонид Павлович прошёл путь от инженера до заместителя генерального директора. В 1992 г., в период смены общественных формаций в нашей стране, он создал и возглавил государственное предприятие Республики Саха (Якутия) «Якутгеолснаб», в последующем ОАО «Геотекс», администрация которого ежеквартально индексировала и своевременно выплачивала работникам зарплату.

В 1996–1998 гг. Л. П. Антонович возглавлял Управление экономики и инвестиций Министерства промышленности Республики Саха (Якутия). Затем он занял должность заместителя





генерального директора по производству ЗАО «Якутстройматериалы» и в дополнение к производству основной продукции организовал выпуск изделий из камнесамоцветного сырья. В 2001 г. в Париже эти произведения были удостоены международного приза Европы «За качество». Леониду Павловичу Антоновичу вручили почётный золотой нагрудный знак.

В 2003 г. в жизни Леонида Павловича начался этап работы в Москве. Вплоть до 2012 г. он был руководителем проекта, главным инженером-заместителем генерального директора ОАО «Первая горнорудная компания», участвуя в разведке месторождений Сардана в Якутии и Павловского на архипелаге Новая Земля, а затем (2012–2015 гг.) стал советником генерального директора ОАО «Росгеология». Именно Леонид Павлович в начале 2000-х в Москве стал активным участником ветеранского движения геологов России после избрания в 2004 г. председателем Совета ветеранов региональной общественной организации ПГО «Якутскгеология» и заместителем председателя Президиума Общероссийской общественной организации «Ветеран-геологоразведчик».

В 2010 г. Леонид Павлович Антонович был облечён доверием коллег и избран Председателем Президиума ООО «Ветеран-геологоразведчик», в составе которой в то время работали межрегиональные (Московская, Санкт-Петербургская и Ярославская) и 56 региональных организаций, объединяющих в краях, областях и Республиках РФ свыше 40 тысяч ветеранов (пенсионеров) геологоразведчиков в первичных ячейках на предприятиях геологического профиля. Леонид Павлович принял ответственный пост от видного геолога и общественного деятеля Владимира Борисовича Мазура.

За время работы Леонида Павловича Антоновича Председателем Президиума ООО «Ветеран-геологоразведчик» успешно реализованы две пятилетние программы организации, одобренные Федеральным агентством «Роснедра», выполняется третья, намеченная на 2021–2025 гг.

Большую работу проводит Президиум ООО «Ветеран-геологоразведчик» и лично Леонид Павлович Антонович, выпуская книги серии «Жизнь замечательных людей. Геологи». Изданные под эгидой ООО «Росгеология» 25 томов сборника «Геология – жизнь моя» на 90 % написаны ветеранами-геологоразведчиками.

Особое направление работы Президиума ООО «Ветеран-геологоразведчик» и объект большой заботы Леонида Павловича Антоновича – детско-юношеское геологическое движение. Совместно с активистами советов ветеранов межрегиональных, региональных и первичных геологических организаций Леонид Павлович и члены Президиума участвуют в подготовке команд и проведении полевых олимпиад ДЮГД, составляют минералогические коллекции и передают их в школы и геологические кружки, проводят с ребятами занятия.

И, конечно, сын героя Великой Отечественной войны Леонид Павлович Антонович вместе с членами Президиума ООО «Ветеран-геологоразведчик», председателями и ветеранами региональных организаций и геологических предприятий участвует в создании и пополнении галереи Бессмертного полка, обновлении и открытии мемориалов, аллей памяти, делает всё возможное для патриотического воспитания новых поколений.

Плодотворный труд Леонида Павловича Антоновича высоко оценен Родиной: юбиляр удостоен звания заслуженного работника народного хозяйства Республики Саха (Якутия), награждён орденом «Знак Почёта», медалями «Ветеран труда», «За строительство БАМа», «100 лет геологической службы», серебряной и бронзовой медалями ВДНХ СССР, нагрудными знаками «Отличник разведки недр», «Почётный разведчик недр», «300 лет геологической службы России».

Мы сердечно поздравляем Леонида Павловича с замечательной датой и желаем крепкого здоровья, счастья, успеха в его благородной работе!

*Учёный совет ЦНИГРИ  
Редколлегия журнала*



ПОЗДРАВЛЯЕМ С ЮБИЛЕЕМ



Крупнейшему специалисту в области геологии алмазных месторождений, методов их прогнозирования и поисков, заслуженному геологу РФ, академику Николаю Петровичу Похиленко исполнилось 75 лет!

**Николай Петрович Похиленко** родился 7 октября 1946 г. в селе Мамонтово Поспелихинского района Алтайского края. В 1965 г. он поступил на геолого-геофизический факультет Новосибирского государственного университета. Когда Николай Петрович учился на третьем курсе, его пригласили принять участие в работе исследовательской группы Николая Владимировича Соболева, занимавшейся минералогией алмазов в Институте геологии и геофизики (ИГиГ) СО АН СССР. После защиты диплома (1973 г.) Николай Петрович продолжил работать в этом институте в должности младшего научного сотрудника, через год защитил кандидатскую диссертацию, а в 1977 г. вступил в должность старшего научного сотрудника. В мае 1985 г.

Николай Петрович Похиленко возглавил впервые созданную в ИГиГ СО АН СССР лабораторию методов поисков алмазных месторождений. В 1990 г. он был удостоен учёной степени доктора геолого-минералогических наук.

Достижения исследователя минералогии и геохимии литосферной мантии, доктора геолого-минералогических наук Николая Петровича Похиленко признаны в научном мире и высоко оценены. Ему удалось значительно развить научные представления об эволюции глубинных зон литосферы древних платформ и образовании алмазоносных перидотитов верхней мантии. В частности, он показал, что резкое увеличение мощности литосферы Сибирской платформы и Капваальского кратона произошло в среднем архее. Проведённые Н. П. Похиленко комплексные исследования строения кратона Слейв позволили выявить в пределах древних кратонов блоки со сверхмощной литосферой (> 300 км).

Большой резонанс вызвали полученные им результаты комплексного изучения уникальной коллекции алмазоносных мантийных перидотитов, по-новому высветившие проблему происхождения природных алмазов. Широко известны результаты исследования состава, строения и происхождения литосферной мантии Сибирской платформы, которые Н. П. Похиленко получил совместно с выдающимся американским петрологом Ф. Р. Бойдом во время работы в Геофизической лаборатории Института Карнеги. Николай Петрович первым показал масштаб и характер воздействия Сибирского суперплюма на строение и состав литосферной мантии платформы и обосновал определяющее значение характера и интенсивности мантийных метасоматических процессов на уровень алмазоносности разновозрастных кимберлитов Сибирской платформы.

Реализованные в 2007–2012 гг. под руководством Николая Петровича Похиленко в рамках государственных контрактов с Минприроды РФ и Федеральным агентством «Роснедра» крупные проекты на территории Сибирской платформы позволили обосновать в регионе новые прогнозные ресурсы алмазов в 145 млн карат. С 2010 г. Н. П. Похиленко руководит важными межведомственными проектами «Роснедр» и «Росгеологии».

В 2016 г. Николай Петрович Похиленко организовал тесное сотрудничество ряда профильных институтов СО РАН с научными организациями Белорусской академии наук по исследованию технологических свойств импактных алмазов Попигайской астроблемы. В итоге получены результаты, свидетельствующие о наличии у импактных алмазов уникальных техно-

логических характеристик, существенно превышающих таковые для обычных природных и синтетических алмазов.

В 2020 г. Николай Петрович начал работу в рамках крупного научного проекта по приоритетным направлениям научно-технологического развития Российской Федерации «Создание теоретической и экспериментальной платформы для изучения физико-химической механики материалов со сложными условиями нагружения».

Особое место в жизни Николая Петровича Похиленко занимает научно-организационная и педагогическая работа. Он много лет руководил подготовкой специалистов по геологии алмазных месторождений на геолого-геофизическом факультете НГУ. В 2008–2017 гг. был директором Института геологии и минералогии имени В. С. Соболева СО РАН, с 2017 г. Николай Петрович Похиленко – научный руководитель института. В 2008 г. он избран членом Президиума Сибирского отделения РАН, в 2012 г. – вице-президентом Ассоциации геологов Сибири, в 2013 г. – заместителем председателя Сибирского отделения РАН по науке, членом Высшего горного совета РФ, членом Совета по алмазам при Правительстве Республики Саха (Якутия).

Николай Петрович Похиленко – заместитель председателя научно-технического совета АО «Росгеология» по твёрдым полезным ископаемым, член ряда научных советов и комитетов РАН, Американского геофизического союза, Ассоциации поисковиков и промышленников Канады.

За выдающиеся результаты в области наук о Земле академик РАН Николай Петрович Похиленко избран в 2014 г. почётным академиком Академии наук Республики Саха (Якутия). Его заслуги отмечены высокими государственными наградами, а в 2007 г. Николай Петрович был удостоен Международной алмазной награды имени Хьюго Дамметта, впервые присуждённой российскому геологу.

Николай Петрович Похиленко – автор и соавтор около 450 научных публикаций, соавтор четырёх монографий и четырёх авторских свидетельств. Он плодотворно работает в составе редколлегий ряда известных периодических научных изданий, в том числе и журнала «Руды и металлы». Мы сердечно поздравляем Николая Петровича с юбилеем и желаем замечательного здоровья, успешной реализации всех масштабных проектов, новых научных идей!

*Учёный совет ЦНИГРИ  
Редколлегия журнала*

ПОЗДРАВЛЯЕМ С ЮБИЛЕЕМ



Известный специалист в области металлогении и геологии месторождений цветных и благородных металлов, ведущий научный сотрудник ЦНИГРИ, доктор геолого-минералогических наук **Виктор Дмитриевич Конкин** отметил 1 сентября 2021 года 80-летний юбилей.

Виктор Дмитриевич в течение многих лет работал в Карелии, Северном Прибайкалье, Джунгарском Алатау, на Енисейском кряже, в Приморском крае, Бодайбинском районе, Юго-Восточной Якутии; выезжал в качестве эксперта в зарубежные страны. Его исследования посвящены изучению месторождений полиметаллических и золотых руд, разработке критериев и признаков, прогнозирования, выявления и оконтуривания рудных объектов. Выпускник геологического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова, Виктор Дмитриевич Конкин с 1972 г. трудится в Центральном научно-исследовательском геологоразведочном институте цветных металлов и золота, пройдя путь от млад-

шего научного сотрудника до заведующего лабораторией.

Виктор Дмитриевич Конкин участвовал в составлении средне- и крупномасштабных карт прогноза с выделением перспективных площадей и определением направлений поисковых работ в изученных им районах; решая поисковые задачи, его рекомендации используют специалисты Иркутской области, Республики Бурятия, Красноярского края.

По материалам многолетних исследований Виктор Дмитриевич Конкин защитил кандидатскую и докторскую диссертации. Результаты проведённых им изысканий стали основой разработки важных для геологов-практиков методических рекомендаций по прогнозу и поискам колчеданно-полиметаллических месторождений на территории РФ в различных разновозрастных комплексах, созданы прогноз-поисковые модели таких месторождений.

Виктор Дмитриевич Конкин – знаток рудной геологии многих регионов нашей страны, автор более 150 научных публикаций, в том числе десяти монографий. В последние годы Виктор Дмитриевич в качестве эксперта осуществляет научно-методическое сопровождение ГРП на золото, выполняемых за счёт федерального бюджета в Сибирском регионе. К нему обращаются за консультациями сибирские геологи, используя для решения возникших вопросов его эрудицию и опыт.

Труд Виктора Дмитриевича Конкина высоко оценён: он удостоен почётных званий «Отличник разведки недр», «Почётный разведчик недр», за участие в разведке крупнейшего Холодинского полиметаллического месторождения награждён медалью «За доблестный труд».

Поздравляем Виктора Дмитриевича с юбилеем, желаем здоровья и успехов в любимой работе!

*Учёный совет ЦНИГРИ  
Редколлегия журнала*

ПОСВЯЩАЕТСЯ ПАМЯТИ



1936–2021

20 августа 2021 года скончался **Николай Васильевич Межеловский**, крупный специалист в сфере геологической картографии, общей и региональной геологии, доктор геолого-минералогических наук, заслуженный геолог Российской Федерации, лауреат государственных премий СССР и Российской Федерации, действительный член Международной академии наук о природе и обществе, член Экспертно-научного совета Федерального агентства по недропользованию, член Президиума исполкома Российского геологического общества.

Николай Васильевич Межеловский после окончания геологического факультета Воронежского государственного университета (1959) работал в Сибири, где прошёл профессиональный путь от коллектора до начальника Геолого-съёмочной экспедиции Красноярского геологического управления. В 1973–1976 гг. был руководителем группы советских геологов в Народной Демократической Республике Йемен и, одновременно, являлся со-

ветником Председателя Правительства страны по вопросам геологии и минерально-сырьевой базы. Затем работал главным специалистом в центральном аппарате Министерства геологии РСФСР (1977–1980), начальником Управления региональной геологии и поисково-съёмочных работ Мингео СССР (1981–1992). С 1992 г. возглавлял Межрегиональный центр по геологической картографии (Геокарт).

Исследования Николая Васильевича Межеловского широко известны в России и за рубежом. Он был основным разработчиком практически всех новых методов и технологий геолого-съёмочных работ: групповой геологической съёмки, аэрофотогеологического, геолого-минералогического и глубинного геологического картирования, геологического доизучения площадей. В 1970–1980 гг. эти методы позволили ускоренными темпами закартировать и опосредовать более трети территории СССР и принципиально повысить полноту, достоверность и информативность Государственной геологической карты м-бов 1 : 1 000 000 и 1 : 200 000, а также поисковую эффективность геологической карты м-ба 1 : 50 000. Госгеолкарта того времени во многом определила создание уникальной минерально-сырьевой базы СССР.

Николай Васильевич Межеловский реализовал свои научные и технологические разработки вместе с соавторами, сотрудниками и партнерами в виде методических руководств, аналитических обзоров, монографий, тематических геологических карт и атласов. При его соавторстве и под его редакцией за последние 30 лет опубликованы 90 научных книг общим объёмом около 2500 листов и 180 листов карт геологического содержания, объединённых в несколько серий – общегеологическую, минералогическую, поисковую, компьютерного сопровождения Госгеолкарты России и другие. Николай Васильевич Межеловский – автор более 300 научных трудов, его вклад в науку очень значителен.



ПОСВЯЩАЕТСЯ ПАМЯТИ



1945–2021

Известный специалист в области технологического изучения минерального сырья, ветеран Центрального научно-исследовательского института цветных и благородных металлов, кандидат технических наук **Евгения Евгеньевна Савари** скончалась на 77 году жизни.

Евгения Евгеньевна Савари окончила Московский институт стали и сплавов (до 1958 г. – Институт цветных металлов и золота им. М. И. Калинина) и в 1974 г. поступила на работу в ЦНИГРИ. Она стала высококвалифицированным специалистом в области биогидрометаллургической переработки упорного золотосодержащего сырья, прошла путь от младшего научного сотрудника до заведующего лабораторией биотехнологии руд цветных и благородных металлов отдела обогащения минерального сырья.

Евгения Евгеньевна вела пионерные исследования отечественных ионообменных смол для сорбции золота и участвовала в их испытаниях на Балеysкой золотоизвлекательной фабрике в Забайкалье, что позволило в дальнейшем повсеместно внедрить передовую ионообменную технологию в золотодобычу.

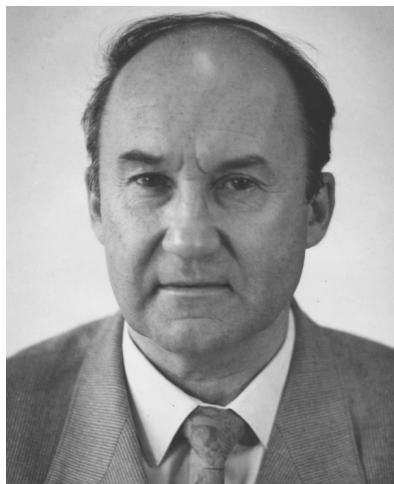
В 1980-е гг. остро встал вопрос о разработке эффективных технологий извлечения благородных металлов из упорного сырья, и Евгения Евгеньевна вместе с коллегами предложила применить новый подход. Она развернула изыскания новых реагентов для подавления сорбционной активности природного органического углерода, осложняющего процесс цианирования золота. Её лаборатория также начала исследования гидрометаллургической переработки продуктов бактериального выщелачивания минерального сырья. Результаты этих изысканий стали основой кандидатской диссертации Е. Е. Савари (1988 г.). Под её руководством выполнены теоретические и прикладные исследования процессов бактериального окисления, разработаны схемы и режимы биогидрометаллургической технологии переработки упорных золотосодержащих руд и концентратов крупных месторождений (Майское, Нежданinское, Олимпиадинское, Кючус и др.). С использованием технологического регламента по переработке концентратов Олимпиадинского месторождения построена первая в стране биогидрометаллургическая установка на золотоизвлекательной фабрике ЗАО «Полюс». Это позволило вовлечь в эксплуатацию упорные золотосодержащие руды месторождения.

За серию научных работ по тематике «Исследование, разработка и внедрение биогидрометаллургической технологии переработки упорного золотосодержащего сырья» Евгения Евгеньевна Савари в 2004 г. была удостоена премии им. И. Н. Плаксина.

Проведённые Евгений Евгеньевной Савари исследования и полупромышленные испытания малотоксичных растворителей золота, направленные на решение экологических задач, замену высокотоксичного цианида в технологиях цианирования и кучного выщелачивания, стали серьёзным вкладом в развитие теории и промышленной практики переработки упорных и бедных руд золота разведываемых и эксплуатируемых месторождений страны.

Евгения Евгеньевна Савари – автор более 150 научных работ, в том числе семи патентов РФ на изобретения, Отличник разведки недр. Всю свою длинную трудовую жизнь она была предана профессии, институту ЦНИГРИ, в котором работала со студенческой скамьи. Евгения Евгеньевна была отзывчивым и чутким человеком, она всегда приходила на помощь коллегам, являлась примером для молодого поколения.

ПОСВЯЩАЕТСЯ ПАМЯТИ



1934–2021

Ушёл из жизни **Игорь Борисович Флёров**, крупный исследователь месторождений золота, доктор геолого-минералогических наук, первооткрыватель месторождения золота Глухариный ручей (Магаданская область), лауреат Государственной премии СССР.

Игорь Борисович родился в Днепропетровске в семье легендарного геолога Бориса Леонидовича Флёрова, открывшего на Колыме десятки оловорудных месторождений. После окончания МГРИ им. С. Орджоникидзе, И. Б. Флёров работал в поисковой партии Северо-Восточного ТГУ и прошёл путь до главного инженера Сеймчанской ГРЭ. Занимался геологической съёмкой масштаба 1 : 25 000, поисками и оценкой месторождений россыпного золота. В 1971 г. он защитил кандидатскую диссертацию, а спустя год вместе с товарищами открыл крупное россыпное месторождение золота «Руч. Глухариный» в Магаданской области.

В 1973 г. И. Б. Флёров начал работать в Москве, в ЦНИГРИ,

где он организовал сектор геологии, методов поиска и прогнозирования россыпных месторождений золота. С его приходом в институте стало развиваться совершенно новое направление работы – изучение россыпных месторождений с тонким и мелким золотом. Под руководством И. Б. Флёрова в Примагаданье проведены исследования россыпей в различных геолого-геоморфологических обстановках. Сотрудники ЦНИГРИ во главе с руководителем сектора выявили закономерности формирования и сохранения россыпей, составили серию карт, придавая большое значение особенностям распределения золота в россыпях, его типоморфизму, прогнозированию и методике поисков россыпей во впадинах. По этим материалам И. Б. Флёровым с коллегами была написана монография «Геология россыпей Северо-Востока СССР» совместно с геологами Северо-Восточного территориального геологического управления.

И. Б. Флёров внёс значительную лепту в изучение истории формирования и геологического строения крупнейшей россыпи золота Рывеем на Чукотке. Он обосновал рациональную систему разведки и разработки этого уникального месторождения и за это достижение в 1979 г. удостоен Государственной премии.

Как научный куратор по россыпному золоту и эксперт ГКЗ Игорь Борисович обладал огромным авторитетом у специалистов производственных организаций. Он внёс существенный вклад в развитие теории и практику поисков россыпных месторождений золота в крупных долинах и впадинах, в том числе на шельфе дальневосточных морей. В 1986 г. И. Б. Флёрову была присвоена степень доктора геолого-минералогических наук.

Игорь Борисович Флёров – видный учёный, автор более 100 научных работ, в том числе редактор монографии «Методика разведки россыпей золота и платиноидов» (1992), ставшей настольной книгой геологов-россыпников. Он был талантливым руководителем, в 1981–1989 гг. выполнял ответственную работу заместителя директора по научной работе в ЦНИГРИ.

Игорь Борисович – автор ярких публицистических статей о проблематике изучения и освоения месторождений золота, он был великолепным популяризатором профессии геолога. Его последняя книга «Страсти по золоту и не только» – убедительное тому подтверждение.

Работы Игоря Борисовича Флёрова останутся важной вехой в истории отечественных исследований экзогенной золотоносности. Он был настоящим геологом, творческой личностью, романтиком, не боялся перемен, с оптимизмом смотрел в будущее. Коллеги сохраняют память об Игоре Борисовиче Флёрове.

ПОСВЯЩАЕТСЯ ПАМЯТИ



1940–2021

Геологическая отрасль страны понесла тяжёлую утрату: ушёл из жизни президент Российского геологического общества **Виктор Петрович Орлов**, замечательный геолог, первооткрыватель месторождений, доктор экономических наук, лауреат Государственной премии Российской Федерации, государственный деятель.

Виктор Петрович Орлов родился в г. Черногорске Красноярского края (ныне Республика Хакасия). В его ранней трудовой биографии – работа на шахте № 9 в Черногорске (1957–1963), четыре полных полевых сезона в геолого-съёмочных партиях в Эвенкии и на Восточной Камчатке (1963–1968), где он был маршрутным рабочим, радиометристом, промывальщиком, проходчиком шурфов, техником-геологом. Он с отличием окончил Томский государственный университет.

После окончания вуза Виктор Петрович трудился в геолого-съёмочных и геологоразведочных партиях и экспедициях в Горной Шории и Иране. Круг его задач был широк: прогноз, по-

иски, разведка и оценка месторождений железа, марганца, хрома, цветных металлов, нерудного сырья. В 1968–1978 гг. он прошёл в профессии путь от геолога до начальника партии. Затем последовала работа в Производственном геологическом объединении «Центргеология» в Москве: первоначально он – старший геолог, затем – заместитель начальника геологического отдела. Далее новые высоты: Виктор Петрович – заместитель начальника геологического и производственного управления Министерства геологии РСФСР, генеральный директор ПГО «Центргеология». Как руководитель ПГО он курировал все виды геологоразведочных работ на территории 20 областей, пяти республик европейской России. В 1986–1990 гг. В. П. Орлов разработал и внедрил систему хозяйственного механизма, ставшего прототипом перехода геологоразведочного производства на рыночные рельсы. Он – один из авторов первой редакции Закона РФ «О недрах», ряда других ныне действующих федеральных законов.

В 1990 г. В. П. Орлов назначен заместителем Министра геологии СССР, спустя год – первым заместителем председателя Госкомгеологии РСФСР; с 1992 г. он – председатель Комитета Российской Федерации по геологии и использованию недр. С 1996 г. по апрель 1998 г. и с октября 1998 г. по август 1999 г. В. П. Орлов возглавлял Министерство природных ресурсов Российской Федерации. Работая в правительстве, он сумел стабилизировать положение в важнейшей для экономики страны геологической отрасли и организовать геологоразведочные работы в новых условиях.

В 2004–2011 гг. Виктор Петрович был председателем Комитета Совета Федерации по природным ресурсам и охране окружающей среды. Его реформаторские экономические и управленческие решения воплощены в организационно-правовой основе современной отечественной системы недропользования.

На протяжении многих лет В. П. Орлов возглавлял Российское геологическое общество. Он обладал широким кругозором, мыслил стратегически и отлично понимал, что для укрепления и развития минерально-сырьевой базы страны необходимо повышать престиж профессии геолога. Он проводил для этого большую работу, привлекая силы профессиональных объединений. Был главным редактором ряда крупных монографических работ по проблемам минерально-сырьевой базы России и мира, 25-томного издания «Геология – жизнь моя».

Деятельность В. П. Орлова заслуженно отмечена самыми высокими государственными и ведомственными наградами и званиями, в числе которых орден «За заслуги перед Отечеством» IV степени, Благодарность Президента Российской Федерации, знаки «Заслуженный геолог РСФСР», «Почётный разведчик недр». Талантливый учёный, великолепный организатор, целеустремлённый и сильный человек, он был примером для всех геологов страны.

Редакция: *О. А. Грибовская, Г. В. Вавилова*  
Вёрстка: *А. С. Рязанцева, О. А. Грибовская*  
Оригинал-макет: *А. С. Рязанцева*  
Фото на обложке (алмазы): *jewellerymag.ru*

Подписано в печать 15.10.21 г. Формат 30×42 1/2. Бумага листовая. Печать цифровая  
Отпечатано в ФГБУ «ЦНИГРИ»: 117545, г. Москва, Варшавское шоссе, 129, корп. 1

Адрес редакции:  
117545, г. Москва, Варшавское шоссе, 129, корп. 1, ФГБУ «ЦНИГРИ»  
Телефон: 8 (495) 315-28-47  
Факс: 8 (495) 315-43-47  
E-mail: [rudandmet@tsnigri.ru](mailto:rudandmet@tsnigri.ru), [rudandmet@yandex.ru](mailto:rudandmet@yandex.ru)  
Сайт: <http://www.tsnigri.ru/ru/informatsionnye-resursy/izdaniya/zhurnal-rudy-i-metally.html>

© «Руды и металлы», 2021