

## МИНЕРАЛОГИЯ, КРИСТАЛЛОГРАФИЯ

УДК 549.211

## Туффизитовые алмазы на Енисейском кряже

**В.И. Силаев<sup>а</sup>, И.А. Кузьмин<sup>б</sup>, В.М. Колямкин<sup>б</sup>, Е.А. Васильев<sup>с</sup>,  
А.Е. Сухарев<sup>а</sup>, И.В. Смолева<sup>а</sup>, В.Н. Филиппов<sup>а</sup>, Н.С. Курбатова<sup>б</sup>,  
А.Ф. Хазов<sup>а</sup>, В.А. Петровский<sup>а</sup>**

<sup>а</sup>ИГ Коми НЦ УрО РАН, 167982, Сыктывкар, Первомайская, 54

<sup>б</sup>АО «Сибирское ПГО», 660020, Красноярск, Березина, 3Д

<sup>с</sup>Санкт-Петербургский горный университет, 199106, Санкт-Петербург,  
В.О., 21 линия, 2

E-mail: silaev@geo.komisc.ru

(Статья поступила в редакцию 21 августа 2017 г.)

Впервые проведены комплексные минералого-геохимические исследования алмазов и туффизитоподобных алмазоносных пород, выявленных на Енисейском кряже. Исследованные алмазы характеризуются зеленым цветом, кубоктаэдрическим габитусом, умеренной азотностью, неагрегированным состоянием азотных структурных дефектов. На поверхности алмазов установлены ксеноминеральные пленки, в состав которых входят разнообразные самородно-металлические, карбидные, сульфидные и галогенсульфидные, сульфатные и оксидные фазы. В качестве основных микроэлементов-примесей выступают Ni, Fe, Mn. Весьма неоднородны по изотопному составу углерода как алмазы-индивиды, так и алмазы изученной популяции в целом. Полученные результаты подтверждают выводы о повсеместной зараженности Сибирской платформы алмазами и их полигенности.

Ключевые слова: *Сибирская платформа, Енисейский кряж, туффизиты, алмазы, минералого-геохимические свойства, прогноз алмазоносности*

DOI: 10.17072/psu.geol.16.4.304

*Посвящается светлой памяти Льва Васильевича МАХЛАЕВА, видного исследователя Таймыра и первооткрывателя Мемеча-Котуйской кимберлитовой провинции на севере Красноярского края*

## Введение

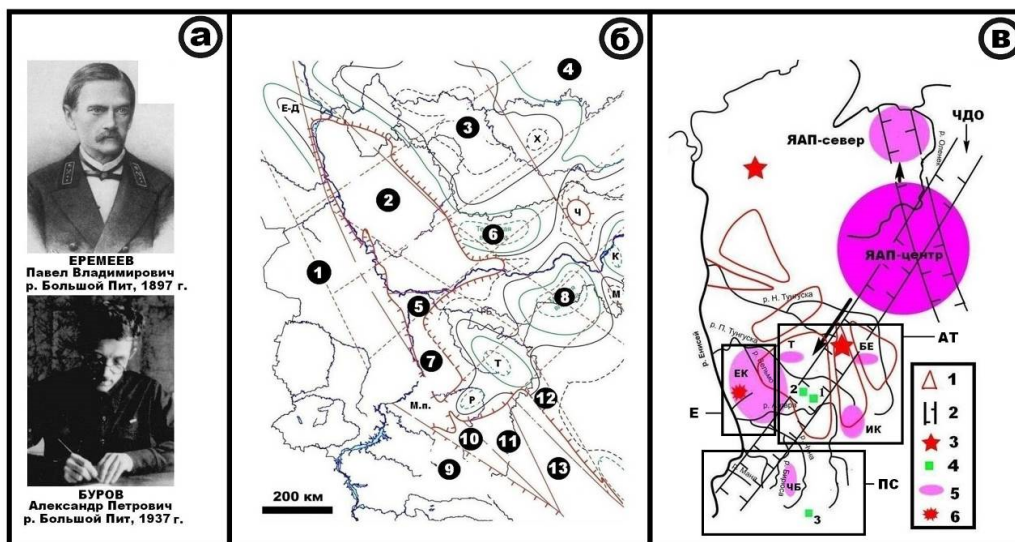
Первые находки алмазов на Сибирской платформе были сделаны, как известно, российским академиком-минералогом П. В. Еремеевым в 1897 г. при обследовании золотоносных россыпей в бассейне р. Большой Пит на Енисейском кряже. В 1930-е гг. примерно в тех же местах будущий руководитель поисками алмазов в СССР А. П. Буров (Буров, 1962) нашел еще один алмаз (рис. 1, а). С 1946г. в юго-

западной части Сибирской платформы начались работы, направленные на поиски алмазных россыпей в долинах крупных рек под дражные полигоны. В результате подтвердилась алмазоносность аллювия на р. Бол. Пит и были выявлены алмазные россыпи на р. Вельмо и ее левых притоках. В 1952 г. сотрудники ЦНИГРИ нашли первые алмазы в аллювии на р. Уда (Дибров и др., 1960), а несколько позже алмазы в ассоциации с пиропом, пиропальмандином, хромшпинелидами, перов-

скитом были выявлены на других реках рассматриваемой территории: Нижняя Кочема, Тычаны, Большой Ерёма, Вельмо, Илим, Катанга, Бирюса, Чуна и др. Эти алмазы имели преимущественно октаэдрический и додекаэдрический габитус, по весу варьировались от 10 до 1500 мг – самые большие были с р. Тычаны (до 700 мг) и с Туманшет-Бирюсинского междуречья (до 1500 мг). На некоторых речных водоразделах из юрских терригенных отложений тоже были извлечены алмазы и минералы-индикаторы кимберлитов.

К настоящему времени в бассейне р. Подкаменная Тунгуска в ходе геологической съемки м-ба 1:200000 не только установлены речные россыпи (В.В. Божко), но и открыт так называемый проме-

жуточный коллектор – базальный гравелит-конгломератовый горизонт среднекаменноугольного возраста (Тарыдакский алмазоносный участок). В результате опробования здесь из россыпей были извлечены более 100 алмазов общим весом 5.4 г, а из базальных галечников – более 600 алмазов общим весом около 10 г. Алмазы размером 1–4 мм характеризовались бесцветностью, октаэдрическим габитусом, без- или малоазотностью, агрегацией структурного азота лишь до А-типа дефектов. По изотопному составу углерода эти алмазы варьировались в очень широком диапазоне значений  $\delta^{13}C$  от –1 до –31 ‰, подразделяясь на три группы (‰): 1) –1...–10; 2) –11...–21; 3) –22 ... –31 (Афанасьев и др., 2005).



**Рис. 1.** Первооткрыватели енисейских алмазов (а), структурно-тектоническое районирование территории юго-западного фланга Сибирской платформы (б) и схема алмазоносности (в). Условные обозначения на б: 1 – Западно-Сибирская плита; 2 – Енисейский горст (кряж); 3 – Байкитская антиклизза; 4 – Тунгусская синеклизза; 5 – АГМЗ, 6 – Терянская впадина; 7 – Ангара-Канская глыба; 8 – Мурская впадина; 9 – Восточно-Саянская складчатая область; 10 – Канская глыба; 11 – Агульский грабен; 12 – УТМЗ, 13 – Бирюсинская глыба. Условные обозначения на в: 1 – блоки архейского возраста (архоны) в фундаменте на юго-западной окраине платформы; 2 – главные тектоно-минерагенические линейменты (ЧДО – Чадобецко-Далдыно-Оленекская); 3 – эпицентры «вторичных» мантийных плюмов, влияющих на эволюцию мантийного протолита (Розен и др., 2008); 4 – кимберлитовые поля (1 – Чадобецкое, 2 – Тайгикун-Нембинское, 3 – Окинское); 5 – территории Якутской алмазоносной провинции (ЯАП-центр и ЯАП-север) и продуктивные на алмазы участки на юго-западной окраине Сибирской платформы (ЧБ – Чуна-Бирюсинский, ИК – Илимо-Катангский, БЕ – Большие-Ерёмский, Т – Тарыдакский, ЕК – Енисейский кряж); 6 – исследованный алмазоносный участок в междуречье Панимба-Чиримба. АТ, Е, ПС – алмазоносные субпровинции, соответственно Ангаро-Тунгусская, Енисейская, Присаянская

После открытия Якутской алмазонасной провинции поиски алмазов на юго-западном фланге Сибирской платформы были сильно сокращены. Теоретическим основанием для этого послужило мнение об образовании промышленных алмазных месторождений только в кимберлитах и только в условиях кратонов архейского возраста консолидации («правило Клиффорда»). Структуры же на юго-западе Сибирской платформы (рис. 1, б) в те годы рассматривались как внеплатформенно-складчатые, т. е. неперспективные на алмазы. Позже, однако, выяснилось, что территория, расположенная к западу от Анкиновской разломной зоны и вплоть до Саяно-Худосеевского дизъюнктива уже в раннем протерозое представляла собой единую с байкитским кратоном платформенную область, а геологическое развитие Енисейского кряжа происходило в протерозое–палеозое в неразрывной связи со структурами собственно Сибирской платформы. В настоящее время Енисейский кряж рассматривается как типичное горстовое поднятие, образовавшееся в результате орогенеза внутриплатформенной мобильной зоны. Сильным аргументом в пользу внутриплатформенной природы Енисейского кряжа выступают выявленные в его пределах Чапинское поле потенциально алмазонасных кимберлит-лампроитов вендского возраста (Динер, 2003), Орловское проявление флогопит-пироксеновых сильно ожелезненных пикритов и эксплозивные пикритоиды, установленные в нижнем течении р. Ангары.

К этому можно добавить, что за пределами Енисейского кряжа на территории юго-западного фланга Сибирской платформы известны еще, по крайней мере, три кимберлит-лампроитовых поля – Чадобецкое, Тайгикун-Нембинское и Окинское. На первом из этих полей в мезозойских лампроитах были найдены алмазы преимущественно додекаэдрического габитуса размером 1–2 мм и весом до 11 мг (Секерин и др., 1999).

Обобщение современной геологической информации позволяет в пределах

юго-западного фланга Сибирской платформы выделить три алмазонасных субпровинции (рис. 1, в): – 1) *Ангаро-Тунгусскую* – зона скрытых разломов фундамента; 2) *Енисейскую* – Енисейский кряж; 3) *Присаянскую* – коллизионные зоны краевых дислокаций (Курганьков и др., 2005; Курганьков, Кузьмин, 2006; Курганьков, Кузьмин, 2008). Эти субпровинции существенно различаются по геологическому строению, составу горных пород, набору минералов-индикаторов в шлиховых ореолах и разновидностям алмазов. Например, только в Присаянье среди алмазов установлены балласы – сферолитовые алмазы VI разновидности с голубой люминесценцией, оптически активными азотными дефектами систем N3, N3V и N3 (Каминский и др., 1982). Перспективность упомянутых субпровинций оценивается в настоящее время по-разному. Если в отношении Ангаро-Тунгусской субпровинции она практически никем не оспаривается, а в отношении Присаянской активно обсуждается, то перспективность Енисейского кряжа, несмотря на находки здесь алмазов не только в аллювии, но и в терригенных мезокайнозойских отложениях на речных водоразделах, до сих пор оценивается как сомнительная.

Основу пликативной структуры Енисейского горста составляют элементы первого порядка – Приенисейский, Центральный, Панимбинский и Татарский антиклинории, а также Исаковский и Ангаро-Тисский синклинории, которые разграничены протяженными зонами главных разломов северо-западного простирания – Приенисейского, Исаковского, Татарского, Ишимбинского и Анкиновского. Поперечным разломам северо-восточного простирания, играющим подчиненную роль в структуре самого кряжа, исследователями придавалось значение геологических факторов второго порядка. Между тем для истории системы Енисейский кряж–Байкитская антеклиза эти разломы имели весьма существенное значение, на что одним из первых указывал еще

Е.А. Долгинов (1964). Позднее поперечные структуры с различной металлогенической нагрузкой выявлялись многими исследователями преимущественно по гравиметрическим, магнитометрическим и геохимическим данным (Старосельцев и др., 2003; Сурков и др., 1997; Зверев, Ладынин, 2002). Согласно современным представлениям, на рассматриваемую территорию протрассированы Ангаро-Сользаводская (Ангаро-Вилуйская, по Д.И. Балицкому и Г.Н. Бровкову, или АТМЗ, по В.А. Бутану (Бутан, 1999), Тохомо-Питская (Большепитско-Кислоканская, по А.В. Крюкову) и Тунгусская (Касско-Байкитская) поперечные структуры. При этом наиболее сложные и контрастные геохимические аномалии (Zr, Ba, Sr, Cr, Cu, Zn, Au) приурочены к узлам пересечения разломных зон северо-западного (Приенисейская, Ишимбинская, Анкиновская) и северо-восточного (Касско-Байкитская, Большепитско-Кислоканская) простираний. Как известно, в районах проявления кимберлитового и лампроитового магматизма именно упомянутые выше элементы и образуют вокруг алмазоносных трубок незначительно смещенные вторичные литохимические ореолы и водные потоки рассеяния.

Рассматривая историю находок алмазов на юго-западе Сибирской платформы, нельзя не упомянуть и о фактах их обнаружения на территориях южного складчатого обрамления, непосредственно прилегающих к упомянутой выше Присяянской субпровинции. Как известно, первые алмазы здесь были найдены еще в 1930-е гг. М. Ф. Шестопаловым в углеродизированных перидотитах и углеродисто-кварц-полевошпатовых метасоматитах на Оспино-Китойском офиолитовом массиве (Шестопалов, 1938). Это были бесцветные и зеленоватые обломки и осколки тверже корунда, плотностью  $3.25 \text{ г/см}^3$ , сгоравшие при  $700\text{--}800 \text{ }^\circ\text{C}$  (рис. 2). К 1939 г. объем опробования здесь достиг семи тонн, из которых извлекли до 100 алмазов зеленоватого цвета с голубой катодолюминесценцией размером  $100\text{--}900 \text{ мкм}$ .

Алмазы были надежно диагностированы в ЦНИЛКОМС Треста «Русские самоцветы», ВИМСе и ЦНИГРИ под общим кураторством В. Н. Лодочникова<sup>1</sup>. В 1951 г. в результате ревизионных работ, проведенных под руководством И. С. Иванова (один участок, 36 проб общим весом 180 кг), в «обуглероженных» перидотитах нашли только муассанит. На этом основании был сделан вывод о том, что «шестопаловские» алмазы являлись вовсе не алмазами, а карбидами (Михайлов, Полякова, 1959). Однако в 1988–1992 гг. в ходе ГДП-50 геологами ПГО «Бурятгеология» из штучных проб углеродизированных перидотитов и углеродистых метасоматитов с Оспино-Китойского массива опять было извлечено более 30 алмазов, очень похожих на «шестопаловские». Кристаллы были бесцветными, сероватыми, желтоватыми и коричневыми, имели октаэдрический и декаэдрический габитус, по размеру варьировались от 200 мкм до 1.5 мм. Фазовый диагноз на этот раз осуществили в специализированной лаборатории ИРГИРЕДМЕТ и институте ТулНИГП. Остается добавить, что нами с Б. Б. Дамдиновым в 2010 г. были исследованы кериты из углеродизированных серпентинитов Оспино-Китойского массива, изотопный коэффициент углерода в которых составил  $-9.8 \pm 4.5 \text{ ‰}$  (Силаев и др., 2015а), что более всего соответствует эндогенным углеродным веществам, вероятно, с глубинным источником углерода.

Таким образом, практически вся территория юго-западной окраины Сибирской платформы, включая Енисейский кряж и даже прилегающее с юга складчатое обрамление, являются алмазоносными, причем в виде не только речных россыпей, но и коренных источников – как минимум вторичных коллекторов.

Тем не менее вплоть до настоящего времени юго-запад Сибирской платформы остается в статусе так называемых территорий с нереализованными перспективами

<sup>1</sup> Интернет-сведения от А. А. Миронова, директора ООО «Сибирь Геопоиск»



алмазоносности (Афанасьев и др., 2005), хотя современный уровень геологической изученности позволяет ожидать здесь значительных открытий (Мкртычян и др.,

2004). Основанием для таких ожиданий могут служить следующие геологические соображения.



**Шестопалов Михаил Фёдорович**



**Рис. 2.** Типичная морфология «шестопаловских» алмазов с Осино-Китойского офиолитового массива

Во-первых, в фундаменте рассматриваемого региона геофизиками (Stepashko, 2013) выявлены крупные блоки архейской кратонизации, которые неплохо совмещаются и с известными здесь кимберлитовыми полями, и с алмазоносными участками. Во-вторых, алмазоносные участки на территории юго-западной окраины Сибирской платформы располагаются практически в створе Чадобецко-Далдыно-Оленекской алмазо-минерагенической зоны, к которой в центральной части ЯАП приурочены наиболее алмазоносные кимберлитовые трубки. В-третьих, вблизи рассматриваемой территории располагается один из эпицентров «вторичных» мантийных плюмов (Розен др., 2008), обуславливающих конвективное преобразование глубинных подкорковых протолитов и разнообразный магматизм, который в свою очередь может оказаться продуктивным на алмазы.

Не исключено также, что в рамках Сибирской платформы рассматриваемая территория закономерно вписывается в региональную минерагеническую симметрию, выражающуюся в смене в направлении от центра Якутской алмазоносной провинции на ее фланги кимберлитовой алмазоносности на некимберлитовую, в частности на флюидо-эксплозивную или туффи-

зитовую (Избеков и др., 2006). Как известно, в настоящее время такого рода некимберлитовые первоисточники алмазов уже установлены на северном фланге Сибирской платформы (Граханов и др., 2009; Шкодзинский, 2014) и вполне вероятны на ее юго-западном фланге.

### Объекты и методы исследований

В ходе поисков коренных источников самородного золота на Енисейском кряже в 2006–2008 гг. в междуречье Панимба–Чиримба (правые притоки р. Б. Пит) двумя скважинами были вскрыты алмазодержащие породы псаммитового облика, первоначально отнесенные к эрозионно-карстовым образованиям. Участок расположен в узле пересечения Большепитско-Кислоканской тектонической зоны и Ишимбинского продольного разлома, где в 1950 г. в русловых отложениях на р. Бол. Пит были найдены два небольших алмаза декаэдрического габитуса массой 10,2 и 10,7 мг, а также один алмаз массой 36 мг из водораздельных песчано-гравийных отложений предположительно неоген-палеогенового возраста.

В ходе бурения в упомянутом выше междуречье до глубины 38 м прослеживались красновато-желтоцветные глины, ин-

терпретированные как глинистая кора выветривания неогенового возраста (кирнэвская свита). В керне этих глин обнаружались зерна амфибола, альмандина, ильменита, хромшпинелидов, сильно окисленного пирита. Ниже в интервале от 38 до 44 м скважина прошла по доломитам и вошла в преимущественно рыхлые щебнисто-гравийно-песчаные отложения, которые не прерывались до глубины 59 м. Именно эти отложения и были восприняты геологами как эрозионно-карстовые. Обломки в них были представлены измененными, сильно ожелезненными породами апомагматического облика, слюдистыми кварцитами, мергелями и в разной степени перекристаллизованными известняками. В качестве связующей массы выступали желтовато-бурые полимиктовые пески, местами сцементированные до гравелито-песчаников. Ниже рыхлого горизонта залежали мраморизованные известняки и доломиты, слабо пиритизированные и местами кремненые.

При отмывке гравийно-песчаного материала из интервала 44–59 м минералами были обнаружены полнотелесные алмазы грязновато-зеленого цвета размером до 1 мм. На каждый полученный шлих приходилось по 2–3 алмаза, что свидетельствует о весьма значительном их валовом содержании в исходных гравийных псаммитах. Уральский опыт дает основание предполагать, что обнаруженный на Енисейском кряже 15-метровый по мощности щебнисто-гравийно-песчаный горизонт имеет не карстогенное, а флюидизатное происхождение, т. е. сложен туффизитами – породами осадочного облика, но с флюидалными текстурами и интрузивным залеганием (Голубева, 1998; Голубева, 1999; Махлаев, Голубева, 2001). Как известно, такие образования на Урале тоже долгое время принимались именно за отложения в эрозионно-карстовых депрессиях (Сычкин, 2000), но в настоящее время убедительно трактуются как флюидално-эксплозивные образования (Рыбальченко и др., 2011).

Практически сразу после находки алмазов в керне щебнисто-гравийных псаммитов с междуречья Панимба–Чиримба появились сомнения в их природном происхождении, что на десять лет затормозило естественный ход событий. Лишь в 2015 г., благодаря инициативе И.А. Кузьмина и поддержке со стороны главного геолога ОАО «Красноярскгеолсъемка» Е.И. Берзона, появилась возможность провести исследования четырех алмазных кристаллов и нескольких типичных образцов обломков горных пород из алмазонасного гравийно-песчаного горизонта. В ходе исследований был использован следующий комплекс методов: оптическая микроскопия (компьютеризированный комплекс OLYMPUS BX51); аналитическая СЭМ (JSM-6400 Jeol); рентгенофлуоресцентный анализ (XRF-1800 Shimadzu); определение содержания микроэлементов методом ИСП-МС – породы и ЛА ИСП-МС – алмазы (Perkin Elmer ELAN 9000); рентгенодифрактометрический анализ (Shimadzu XRD-6000) и рентгенофазовый анализ с фоторегистрацией (УРС-60); инфракрасная спектроскопия (Vertex-70 с микроскопом Hyperion 1000); рамановская и фотолюминесцентная спектроскопия (Renishaw in Via, лазеры 514 и 785 нм); изотопная масс-спектрометрия (аналитический комплекс, состоящий из элементного анализатора FlashEA-HT 1112, газового коммутатора Confo IV и масс-спектрометра Delta V+(Finnigan).

### Горные породы

Обломки горных пород в алмазонасном гравийно-песчаном горизонте представлены сильно ожелезненной по виду апомагматической породой, слюдистыми кварцитами, мергелями и мраморизованными известняками.

**Слюдисто-шамозитовая апомагматическая порода** характеризуется бурым цветом, массивностью и тонкокристаллическим строением. Под микроскопом матрикс породы сложен железистой массой,

на фоне которой выделяется слюдястый, очень разномасштабный (от 100 мкм до почти 1 мм), лепидобластовый агрегат (рис. 3). По химическому составу (табл. 1) порода является магнезиально-железистой оксидно-алюмосиликатной, а по нормативно-минеральному составу может быть определена как слюдястый шамозитолит с существенной примесью гётита состава  $(\text{Fe}_{0.94-0.97}\text{Al}_{0.03-0.06})\text{O}(\text{OH})$ . Характерна незначительная химическая примесь  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ . Слюды в соответствии с современной номенклатурой (Номенклатура слюд, 1998)

отвечают промежуточному мусковит-алюмоселадониту и железисто-магнезиальному флогопиту (табл. 2), что, вероятно, отражает первично магматическое происхождение этой горной породы. Кроме упомянутых минералов в породе установлены беспримесный циркон и никелистый троилит состава  $(\text{Fe}_{0.98-1.04}\text{Ni}_{0-0.01})\text{S}$ . На основании полученных данных можно предполагать, что протолитом для рассматриваемой породы послужили пикритовиды.

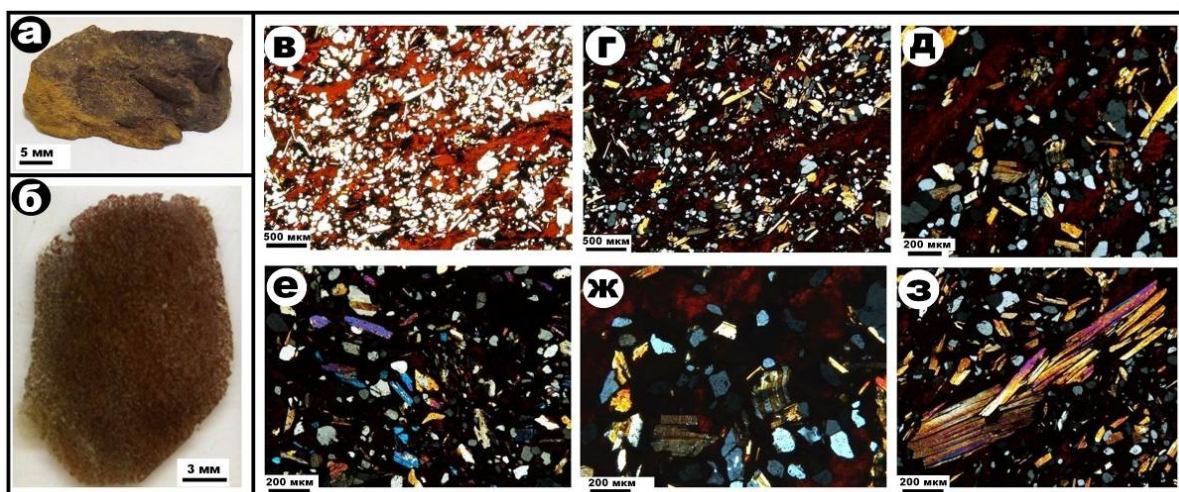


Рис. 3. Внешний вид (а – образец, б – шлиф) и микроструктура (в–з) слюдясто-шамозитовой апомагматической породы. Изображение под оптическим микроскопом в режимах без анализатора (в) и со скрещенными николями (г–з)

**Ожелезненные хлорит-слюдястые кварциты** – буровато-серая, массивная, микротонкозернистая, неравномерно ожелезненная хлорит-слюдясто-кварцевая порода (табл. 1). По структуре основной массы она мелко-тонколепидогранобластовая (рис. 4). Слюды представлены Ti-содержащим мусковит-алюмоселадонитом, магнезиально-железистые хлориты вполне уверенно диагностируются рентгендифрактометрическим методом. На anomalously железистых участках содержание гётита достигает 25–30 мол. %.

**Мергели** представлены двумя литотипами – мергелями глинистыми и мергелями доломитистыми.

**Мергель глинистый** (рис. 5, табл. 1) – светлая желтоватая, массивно-полосчатая порода с чередованием горизонтов карбо-

натного микрита толщиной 0.5–1 мм и более толстых (1.5–2 мм) микро-тонкозернистых горизонтов, сильно обогащенных кварцем. Последний образует изометричные грануловидные индивиды размером 50–100 мкм. В качестве примесей в рассматриваемой породе выступают доломит, мусковит (иллит) и магнезиальный хлорит.

**Мергель доломитистый** (рис. 6) отличается большей карбонатностью и существенной примесью доломита к кальциту (табл. 1). Светло-серая, массивная мелкозернистая порода с гранобластовой структурой. Имеет незначительную химическую примесь  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ . Доля доломита в карбонатном матриксе составляет 30–35%. Кварца в этом мергеле в два раза

меньше, чем в глинистом мергеле, но больше слюды.

**Известняки доломитсодержащие мраморизованные** – светло-серая, массивная, неравномерно-зернистая порода (рис. 7). На неперекристаллизованных участках она сложена мелкозернистым гранобластовым агрегатом с размером зерен 100–200 мкм. На резко очерченных участках мраморизации размер индивидов кальцита скачкообразно возрастает до 300 × 400 мкм (среднезернистая структура), а местами и до 2.5 × 4 мм (гигантозернистая

структура). Доля доломита в карбонатном матрикс составляет 7.5–8 %. В качестве примесей выступают в последовательности снижения содержания мусковит (иллит), магнезиальный хлорит, альбит, кварц (табл. 1).

Вычисленные литохимические модули – гидролизатный и железный (табл. 1) – обуславливают следующий вывод. Слюдисто-шамозитовая апомагматическая порода имеет все признаки сильного гидролитического изменения и вторичного ожелезнения.

**Таблица 1.** Химический состав обломков из туффизитоподобных пород с Енисейского кряжа, мас. %

Компоненты	1 (К)	2 (С-20/1а)	3 (С-20/1б)	4 (С-20/3)	5 (С-20/2)	6 (С-20/4)
SiO <sub>2</sub>	33.10	86.73	59.60	54.89	24.25	2.65
TiO <sub>2</sub>	0.77	0.07	0.08	0.03	0.06	0.08
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17.39	2.34	3.02	1.01	1.42	1.09
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.03	Не обн.	Не обн.	Не обн.	0.03	Не обн.
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	41.57	7.75	33.83	1.29	1.38	0.53
MnO	0.09	0.37	0.39	Не обн.	0.05	0.02
MgO	2.89	0.88	1.04	14.42	5.43	1.93
CaO	0.14	0.78	0.71	7.31	34.39	52.17
SrO	Не обн.	Не обн.	Не обн.	Не обн.	0.07	0.13
Na <sub>2</sub> O	«	«	«	«	Не обн.	0.11
K <sub>2</sub> O	3.37	0.94	0.80	0.21	0.37	0.22
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.56	0.14	0.53	0.05	0.12	0.04
SO <sub>3</sub>	Не обн.	Не обн.	Не обн.	Не обн.	Не обн.	0.04
CO <sub>2</sub>	«	«	«	20.79	32.43	40.99
Модуль гидролизатный (ГМ)	1.81	0.12	0.62	0.04	0.12	0.64
Модуль железный (ЖМ)	2.29	3.36	11.04	1.24	0.97	0.47
Нормативно-минеральный состав						
Кварц	1.53	82.44	59.62	61.63	30.90	1.34
Мусковит-алюмоселадонит и мусковит	20.92	8.12	8.02	2.11	4.55	3.09
Флогопит	12.09	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Не опр.
Хлорит	Не опр.	2.55	3.36	2.30	1.70	1.75
Альбит	«	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Не опр.	1.64
Кальцит	«	«	«	32.70	40.42	83.95
Доломит	«	«	«		20.71	7.27
Апатит	1.32	0.92	1.58	0.11	0.16	0.15
Хромит	0.04	Не опр.	Не опр.	Не опр.	0.04	Не опр.
Рутил	0.60	0.05	0.06	0.03	0.06	0.09
Пирит	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Не опр.	0.07
Шамозит	63.50	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Не опр.
Гётит		5.92	27.36	1.12	1.46	0.65

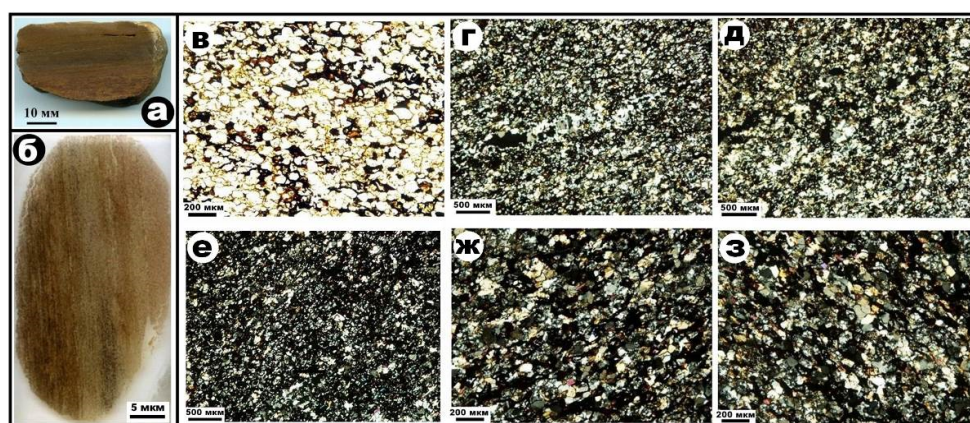
*Примечание.* Результаты рентгенофлюоресцентного анализа, приведенные к 100 %. Содержание CO<sub>2</sub> получено расчетом. 1 – слудисто-шамозитовая апомагматическая порода; 2 – ожелезненный хлорит-слудистый кварцит; 3 – то же, участок аномального ожелезнения; 4 – мергель глинистый; 5 – мергель доломитистый; 6 – известняк доломитсодержащий мраморизованный. Модули: ГМ = (TiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)/(SiO<sub>2</sub>); ЖМ = (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+MnO)/(TiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>).



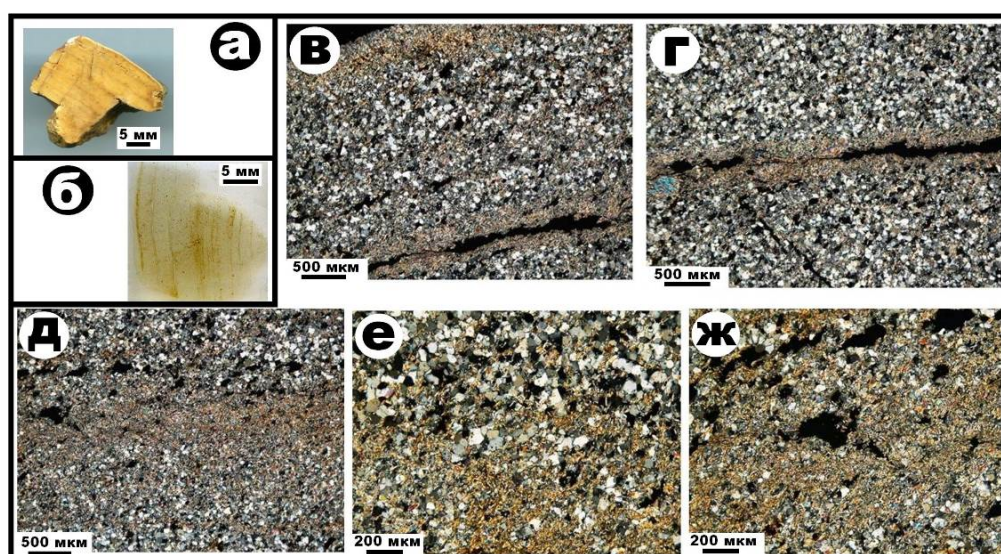
**Таблица 2.** Химический состав мусковита-алюмоселадонита (1–6) и флогопита (7–9) в слюди-сто-шамозитовой апомагматической породе и ожелезненном хлорит-сланцевом кварците, мас. %

Компоненты	1	2	3	4	5	6	7	8	9
SiO <sub>2</sub>	47.01	52.09	54.28	47.75	47.45	47.20	39.34	38.93	39.88
TiO <sub>2</sub>	1.04		1.71		0.87	2.43	1.26	1.54	1.79
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	35.21	29.09	24.10	35.07	35.00	33.61	11.14	12.80	11.75
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.66	1.79	2.71	2.59	2.73	2.38	26.92	23.36	22.33
MgO	1.81	1.54	3.05	2.28	1.71	2.16	12.99	13.24	14.40
K <sub>2</sub> O	12.27	15.49	14.15	12.31	12.24	12.22	8.35	10.13	9.94

Эмпирические формулы: 1 –  $KAl_{1.65}(Mg_{0.17}Fe_{0.13}Ti_{0.05})_{0.35}[AlSi_3O_{10}](OH)_{1.7}$ ; 2 –  $K_{1.04}Al_{1.81}(Mg_{0.12}Fe_{0.07})_{0.19}[AlSi_3O_{10}](OH)_{1.81}$ ; 3 –  $KAl_{1.57}(Mg_{0.25}Fe_{0.11}Ti_{0.07})_{0.43}[AlSi_3O_{10}](OH)_{1.57}$ ; 4 –  $KAl_{1.62}(Mg_{0.22}Fe_{0.12})_{0.35}[AlSi_3O_{10}](OH)_{1.54}$ ; 5 –  $KAl_{1.63}(Mg_{0.16}Fe_{0.13}Ti_{0.04})_{0.35}[AlSi_3O_{10}](OH)_{1.59}$ ; 6 –  $KAl_{1.53}(Mg_{0.21}Fe_{0.11}Ti_{0.12})_{0.44}[AlSi_3O_{10}](OH)_{1.47}$ ; 7 –  $K_{0.81}(Mg_{1.49}Fe_{1.54}Ti_{0.07})_{3.1}[AlSi_3O_{10}](OH)_{2.08}$ ; 8 –  $K_{0.99}(Mg_{1.53}Fe_{1.35}Ti_{0.09})_{2.97}[AlSi_3O_{10}](OH)_{2.2}$ ; 9 –  $K_{0.95}(Mg_{1.62}Fe_{1.26}Ti_{0.10})_{2.98}[Al_{1.04}Si_3O_{10}](OH)_{2.13}$

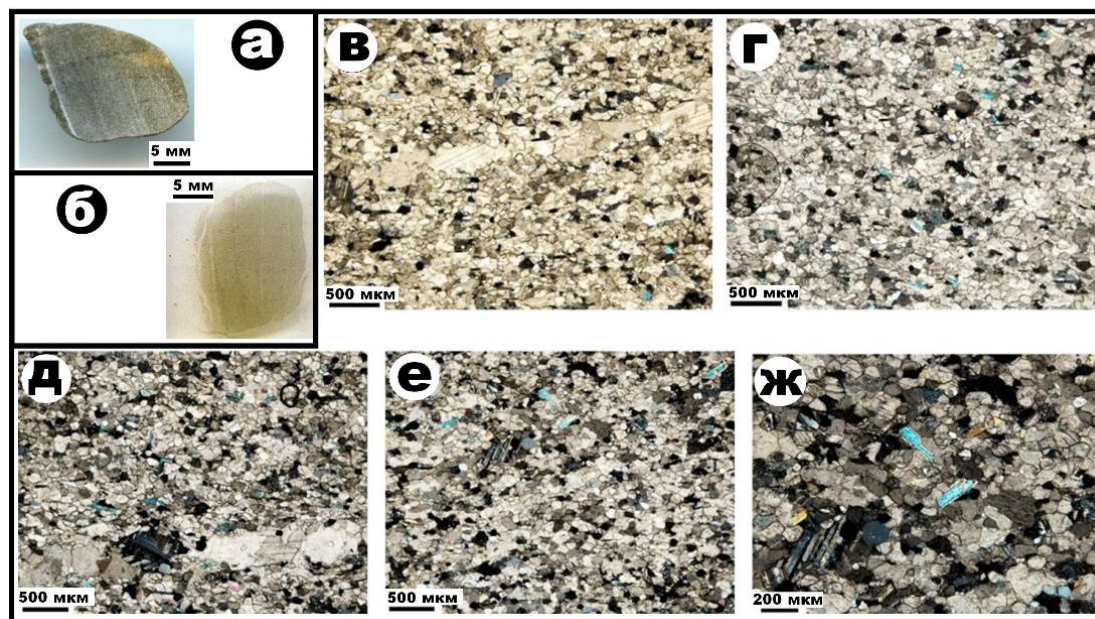


**Рис. 4.** Внешний вид (а – образец, б – шлиф) и микроструктура (в–з) ожелезненного хлорит-сланцевого кварцита. Изображение под оптическим микроскопом в режимах без анализатора (в) и со скрещенными николями (г–з)



**Рис. 5.** Внешний вид (а – образец, б – шлиф) и микроструктура (в–ж) глинистого мергеля. Изображение под оптическим микроскопом в режиме со скрещенными николями





**Рис. 6.** Внешний вид (а – образец, б – шлиф) и микроскопическое строение (в–ж) доломитистого мергеля. Изображение под оптическим микроскопом в режиме со скрещенными николями

С литохимических позиций она отвечает супержелезистому нормогидролизату. Ожелезненные хлорит-слюдистые кварциты в целом могут быть отнесены к супержелезистым силитам, но на участках аномального ожелезнения они соответствуют гипогидролизатам. Некарбонатная примесь в мергелях литохимически тестируется как супержелезистые силиты, а в известняках – как норможелезистый гипогидролизат.

В составе пород выявлено 45 микроэлементов, в том числе (табл. 3) 6 щелочных и щелочно-земельных литофилов, 11 литофилов-гидролизатов, 14 лантаноидов, 12 халькосидерофилов, 2 неметалла. Анализ показывает, что по своим геохимическим свойствам исследуемые породы достаточно четко подразделяются на три кластера.

Первому кластеру соответствует слюдисто-шамозитовая апомагматическая порода, аномально обогащенная практически всеми группами микроэлементов. Это устанавливается как по абсолютным значениям концентраций, так и по кларкам концентрации относительно РААС – среднего состава архей-протерозойских глинистых сланцев с Австралийской

платформы (рис. 8). Рассматриваемая порода сильно обогащена Be, Sc, Y, V, U, средними и особенно тяжелыми лантаноидами (самариевая и иттриевая подгруппы), Cu, Ag, Zn, Cd, Mo, W, Ni, Se. Очень показательным, что нормированный на РААС тренд лантаноидов имеет сильно положительный наклон, обусловленный последовательным обогащением рассматриваемой породы в направлении от Pr до Lu. В общем, все это вполне комплементируется со сделанным выше выводом о пикритовой природе соответствующего протолита.

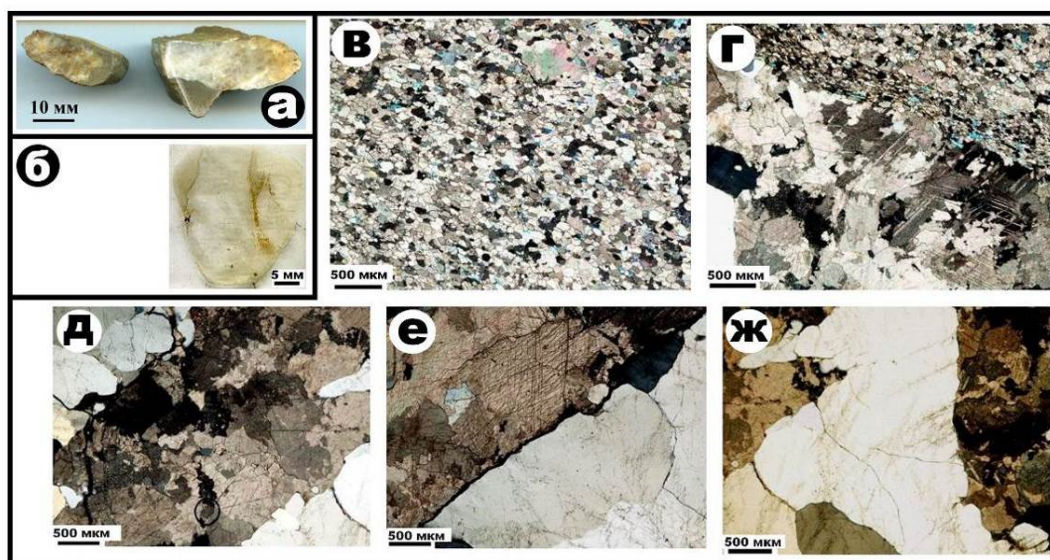
Во второй кластер объединяются образцы ожелезненных хлорит-слюдистых кварцитов. Они по концентрации микроэлементов геохимически уступают, конечно, вышерассмотренной апомагматической породе, но тем не менее обнаруживают обогащение V, Cd, Mo, W, Sb, Se. Тренд нормированных на РААС лантаноидов в рассматриваемом случае имеет субгоризонтальную форму, т. е. характер распределения лантаноидов в рассматриваемых кварцитах согласуется с таковым в эталонных глинистых сланцах.

В третий кластер объединяются карбонатолиты – мергели и известняки. Все эти



породы характеризуются минимальными содержаниями литофилов-гидролизатов, лантаноидов, халькосидерофилов, неме-

таллов как в абсолютных значениях, так и в кларках концентрации относительно PAAS.



**Рис. 7.** Внешний вид (а, б) и микроскопическое строение (в–ж) мраморизованного известняка. Изображение под оптическим микроскопом в режиме со скрещенными николями

Тренд нормированных концентраций лантаноидов имеет субгоризонтальную форму, располагаясь на графике существенно ниже аналогичного тренда даже для хлорит-сланцевых кварцитов. Практически единственную геохимическую аномалию в карбонатолитах демонстрирует карбонатofil Sr, повышенная концентрация которого обусловлена, очевидно, преимущественно кальцитовым составом этих пород.

Статистический анализ показал, что в исследуемой коллекции горных пород

групповые концентрации литофилов-гидролизатов, лантаноидов и халькосидерофилов прямо и довольно сильно коррелируются между собой ( $r = 0.42 \dots 0.89$ ), но обратно коррелируются с групповой концентрацией щелочных и щелочно-земельных литофилов ( $r = 0 \dots -0.42$ ).

Значительный интерес представляет геохимический анализ исследуемых пород с позиции космогеохимической классификации Ю. Г. Щербакова (1982).

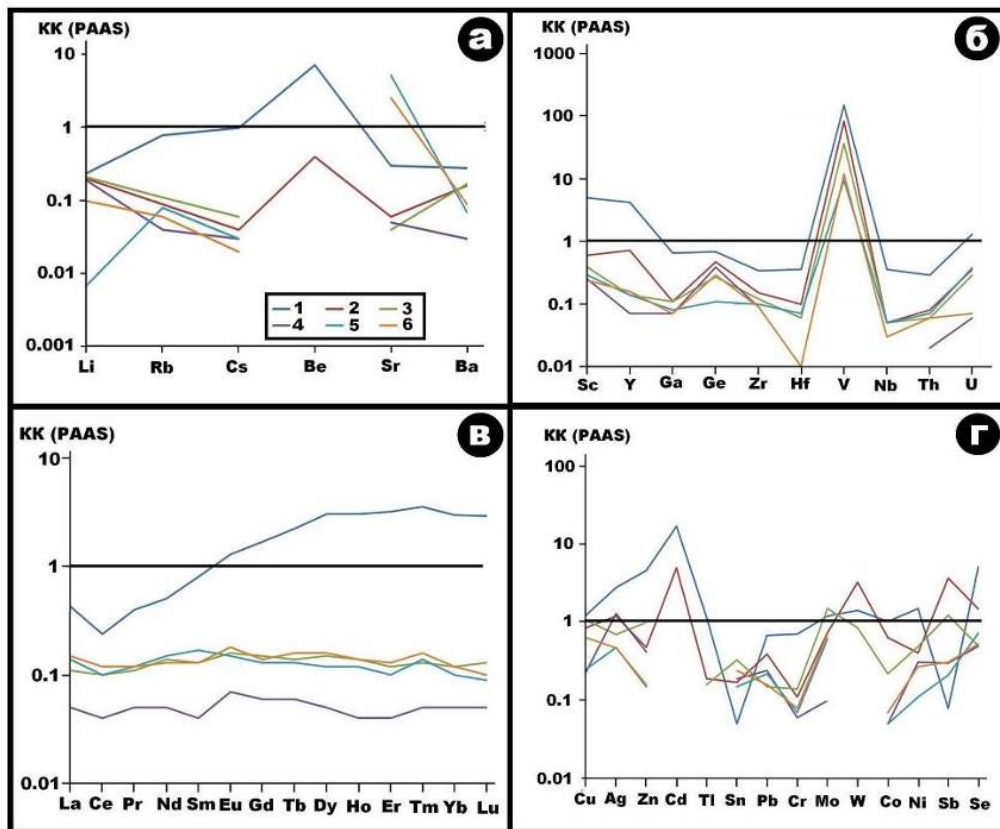
**Таблица 3.** Содержание микроэлементов в обломках из алмазосодержащих туффизитоподобных пород с Енисейского кряжа, г/т

Элементы	1	2	3	4	5	6
Li	18	14.9	15.8	14.2	0.51	7.45
Rb	124	14.4	18.1	5.75	12.1	10.5
Cs	14.9	0.61	0.90	0.47	0.44	0.26
Be	21.7	1.21	Не обн.	Не обн.	Не обн.	Не обн.
Sr	60	12.1	7.56	9.31	1040	515
Ba	180	106	109	17.1	47.6	61.7
Сумма щелочных и щелочно-земельных литофилов	418.6	149.22	151.36	46.83	1100.65	594.91
Sc	19.7	2.39	1.57	1.01	1.16	0.97
Y	113	19.5	3.9	1.78	3.75	4.42
Ga	12.9	2.29	2.24	1.44	1.61	1.84

Таблица 3. Окончание

Элементы	1	2	3	4	5	6
Ge	1.35	0.94	0.54	0.78	0.21	0.57
Zr	70.9	31.3	25.5	19.1	20.5	17.9
Hf	1.81	0.51	0.31	Не обн.	0.33	0.03
V	149	82.5	36.5	9.3	9.5	11.9
Nb	6.77	1.01	1.02	Не обн.	0.96	0.61
Ta	0.5	0.14	Не обн.	Не обн.	Не обн.	Не обн.
Th	4.34	1.19	0.95	0.31	1.08	0.85
U	3.93	1.08	0.88	0.19	1.15	0.21
Сумма литофилов-гидролизатов	384.2	142.85	73.41	33.91	40.25	39.3
La	16.2	8.34	4.22	1.9	5.48	5.53
Ce	19.5	17.7	8.19	2.87	8.29	9.48
Pr	3.56	2.13	0.96	0.45	1.12	1.1
Nd	16.3	8.52	4.36	1.72	4.8	4.15
Сумма лантаноидов цериевой подгруппы	55.56	36.69	17.73	6.94	19.69	20.26
Sm	4.52	1.49	0.73	0.25	0.93	0.73
Eu	1.44	0.39	0.18	0.07	0.17	0.2
Gd	8.23	1.87	0.73	0.28	0.67	0.72
Tb	1.74	0.32	0.11	0.05	0.1	0.12
Dy	13.6	1.87	0.65	0.23	0.53	0.7
Ho	3.08	0.45	0.14	0.04	0.1	0.14
Сумма лантаноидов самариевой подгруппы	32.61	6.39	2.54	0.92	2.50	2.61
Er	9.38	1.56	0.36	0.11	0.3	0.37
Tm	1.43	0.23	0.05	0.02	0.05	0.06
Yb	8.45	1.62	0.33	0.14	0.27	0.34
Lu	1.27	0.26	0.06	0.02	0.04	0.04
Сумма лантаноидов иттриевой подгруппы	20.53	3.67	0.80	0.29	0.66	0.81
Иттриевая / цериевая подгруппы	0.37	0.10	0.05	0.04	0.03	0.04
Сумма лантаноидов	108.7	46.75	21.07	8.15	22.85	23.68
Cu	61.4	42.5	53.5	11.6	12.5	32.2
Ag	0.28	0.12	0.07	0.13	0.05	0.05
Zn	389	40.6	85.3	35.6	12.8	13.3
Cd	0.51	0.15	Не обн.	Не обн.	Не обн.	Не обн.
Tl	1.15	0.19	0.16	«	«	«
Sn	0.2	0.7	1.31	0.77	0.61	0.95
Pb	13.6	7.88	2.95	4.86	4.43	3.13
Cr	78	11.8	15.2	7.09	8.01	8.4
Mo	1.2	0.74	1.51	0.1	0.61	0.7
W	2.84	6.56	1.7	Не обн.	Не обн.	Не обн.
Co	20.4	12.8	4.35	0.96	1.09	1.4
Ni	82.6	22.7	26.8	16.8	5.9	14.6
Сумма халькосидерофилов	651.18	146.74	192.85	61.11	46.0	74.73
Sb	0.17	7.36	2.48	0.6	0.43	0.61
Se	3.08	0.89	0.3	0.3	0.44	0.32
Сумма неметаллов	3.25	8.25	2.78	0.9	0.87	0.93
Общее содержание микроэлементов	1565.93	493.81	441.47	150.9	1210.62	733.55

Примечание. 1 – слюдисто-шамозитовая апомагматическая порода; 2 – ожеженный хлорит-слюдистый кварцит; 3 – то же, участок аномального ожелезнения; 4 – мергель глинистый; 5 – мергель доломитистый; 6 – известняк доломитсодержащий мраморизованный.



**Рис. 8.** Нормированные на PAAS концентрации микроэлементов в исследуемых образцах из туффзитоподобных пород с Енисейского кряжа. Породы: 1 – слюисто-шамозитовая апомагматическая порода; 2, 3 – ожелезненные хлорит-слюистые кварциты; 4 – мергель глинистый; 5 – мергель доломитистый; 6 – известняк. Микроэлементы: а – щелочные и щелочно-земельные литофилы; б – литофилы-гидролизаты; в – лантаноиды; г – халькосидерофилы и неметаллы

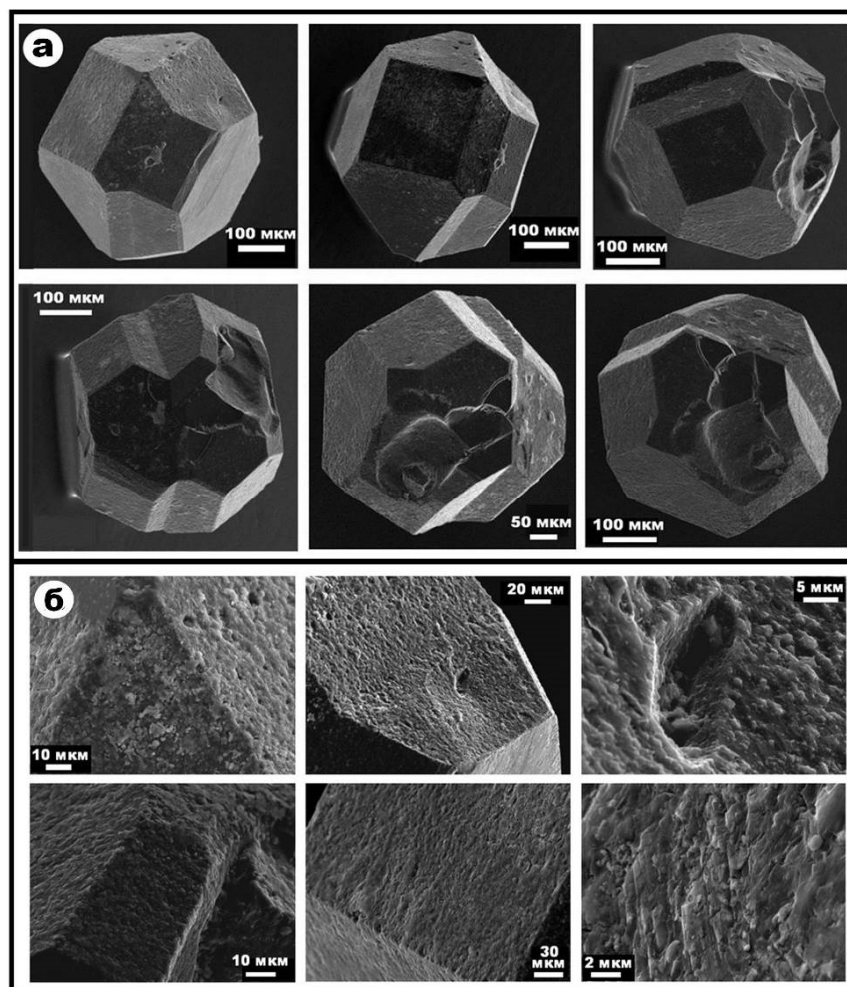
Проведенные расчеты показали, что в апомагматической породе, кварцитах и глинистом мергеле центростремительные – Ц<sub>1</sub> и минимально-центробежные – Ц<sub>2</sub> микроэлементы отчетливо преобладают над дефицитно-центробежными – Ц<sub>3</sub> и центробежными – Ц<sub>4</sub> (коэффициент Ц<sub>1+2</sub> / Ц<sub>3+4</sub> = 1.25–1.5). В доломитистых мергелях и известняках, напротив, резко преобладают дефицитно-центробежные и центробежные микроэлементы (коэффициент Ц<sub>3+4</sub> / Ц<sub>1+2</sub> = 7.5–22.15).

Выявленная минералого-геохимическая неоднородность исследуемых обломков из туффзитоподобных гравийных псаммитов явно указывает на гетерогенность обломков. Можно обоснованно предполагать, что последние представлены, во-первых, сильно измененными первоначально магматическими породами,

скорее всего, пикритовыми базальтоидами; во-вторых, эндогенно-преобразованными хлорит-слюистыми кварцитами; а в-третьих, карбонатолитами экзогенного происхождения – мергелями и известняками. Некоторые обломки осадочных карбонатных пород несут следы эндогенного преобразования – обогащение некоторыми некогерентными микроэлементами, перекристаллизация. Важно также подчеркнуть, что апомагматиты и слюистые кварциты обнаруживают признаки существенного гидrolитического разложения, проявляющегося в сильном оксидном ожелезнении. Последнее, как известно, весьма характерно для флюидизатов, которые по этой причине довольно часто ошибочно принимаются за продукты обычного гипергенеза.



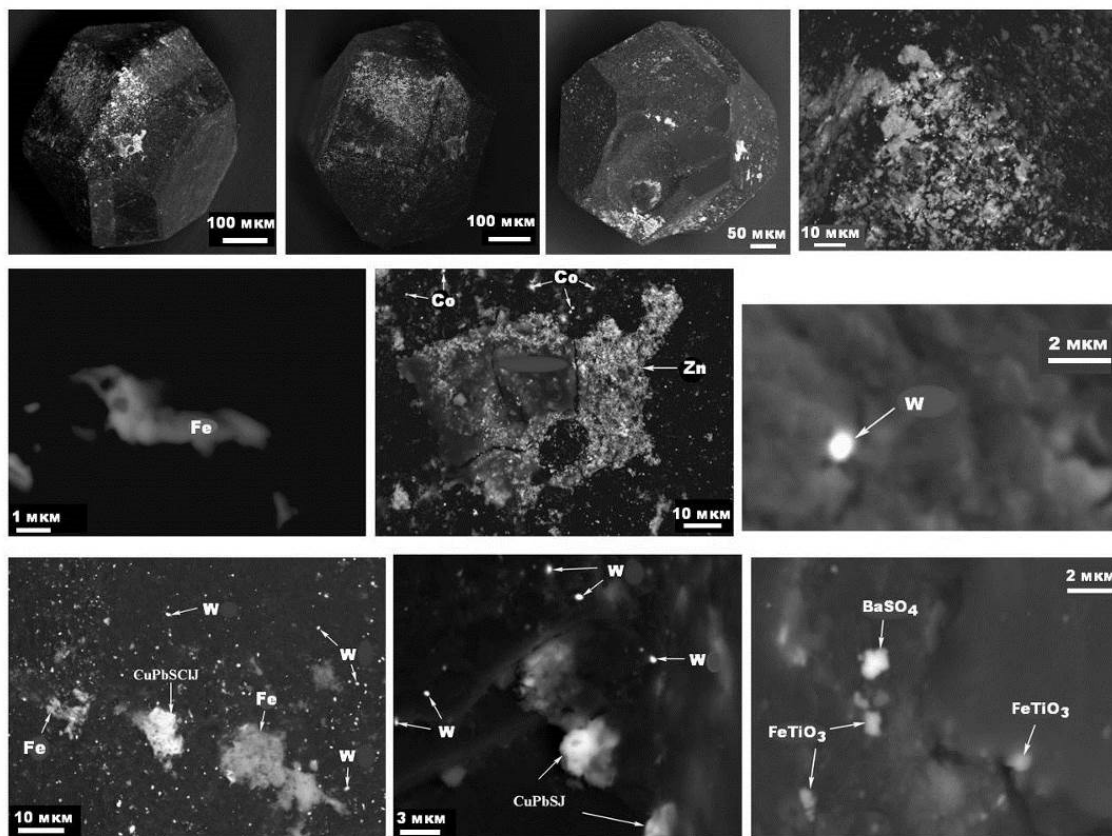




**Рис. 10.** Габитус (а) и микроскульптура поверхности (б) алмазов с Енисейского края. СЭМ-изображения в режиме вторичных электронов

Таким образом, практически все примесные минеральные образования на гранях енисейских алмазов можно признать естественными, уже неоднократно встречавшимися на поверхностях природных алмазов. Предпринятое трехкратное стачивание одного из енисейских алмазов выявило его внутреннюю фазовую гомогенность, осложняющуюся лишь трещинами спайности и субмикронными ограниченными пустотами, которые в минералогии природных алмазов называются «отрицательными кристаллами». Кроме того, в единичных случаях были встречены субмикронные включения ближе не диа-

гностированной фазы  $\text{SiO}_2$ . Методом ИСП-МС с предварительной лазерной абляцией были проанализированы три фрагмента исследуемых алмазов. В результате в них были выявлены элементы-примеси, главными из которых являются (г/т): Ni – 15–150, Fe – 50–100, Mn – 55–220. Можно отметить, что именно такие микроэлементы определялись как основные и в кубоктаэдрических алмазах из южно-тибетских офиолитовых перидотитов (Howell *et al.*, 2015) и толбачинских островодужных вулканитов (Карпов и др., 2014; Силаев и др., 2015в).



**Рис. 11.** Основные ксеноминеральные фазы на поверхности алмазов. СЭМ-изображения в режиме упруго-отраженных электронов: Fe, Co, Zn – самородно-металлические фазы; W – вольфрам-кобальтовые сплавы и квансонгит; CuPbSJ – галогенсульфиды; FeTiO<sub>3</sub> – ильменит; BaSO<sub>4</sub> – барит

### Рентгеноструктурные и спектроскопические свойства алмазов

Фазовая диагностика енисейских алмазов осуществлялась рентгеновским и спектроскопическими методами.

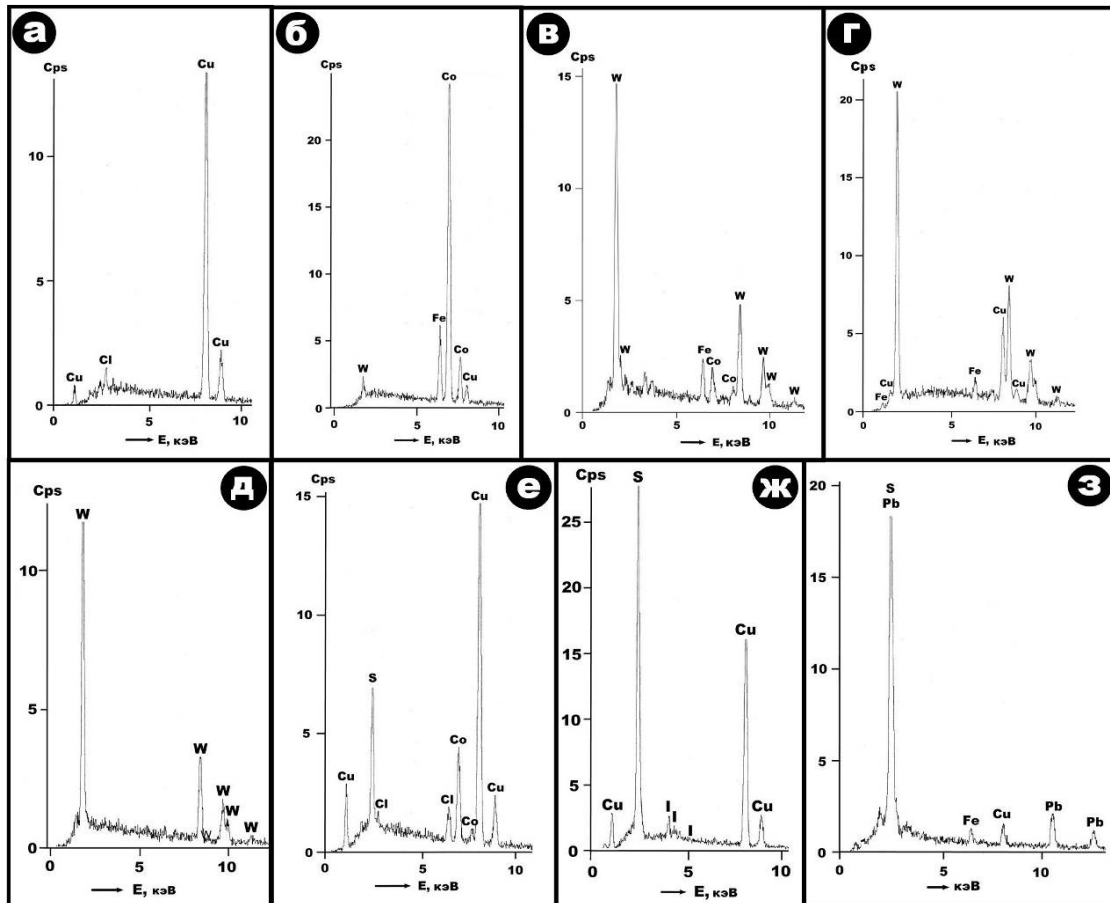
На полученных фоторентгенограммах (Б. А. Макеев) присутствуют все основные отражения, отвечающие алмазу (нм): 0.2050–0.2062 (111); 0.1260–0.1263 (220); 0.1075–0.1077 (311). При этом наблюдается фрагментация полос засветки, свидетельствующая о микроблочности индивидов. Рассчитанные значения параметра э. я. составляют  $(0.3563–0.3571) \pm 0.001$  нм.

Спектроскопические исследования алмазов проводились в оптическом инфракрасном диапазоне и в режиме комбинационного рассеяния с регистрацией флуоресценции. Спектры оптической плотности записывались с разрешением 2

см<sup>-1</sup> и усреднением по 32 сканам, образец при съемке лежал на диафрагме диаметром 0.1 мм. В полученных ИК- спектрах (рис. 13, а) проявились линии с максимумами при 1130 и 1344 см<sup>-1</sup>, которые соответствуют инфракрасному поглощению в алмазах на структурных азотных дефектах С-типа (отдельные атомы).

Концентрация азота, рассчитанная по классическим уравнениям (Boyd et al, 1994), составляет 300 г/т. Кроме упомянутых линий в спектре енисейских алмазов присутствуют полосы ИК-поглощения с максимумами при 720, 875 и 1400 см<sup>-1</sup>, соответствующие карбонатам. Полосы при 1040, 1600–1700 см<sup>-1</sup> (валентные колебания ОН-групп) и 3000–3750 см<sup>-1</sup> (деформационные колебания ОН-групп) отвечают, вероятно, поглощению на примазках глинистых минералов.





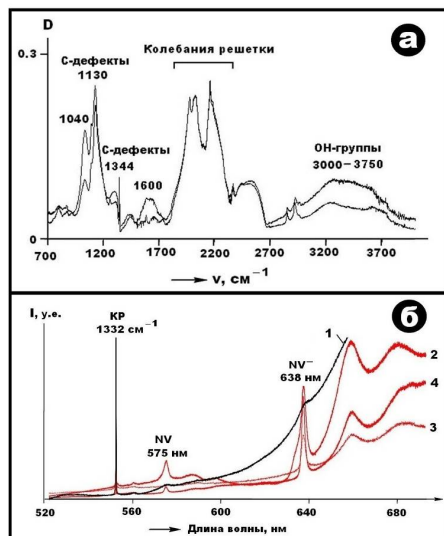
**Рис. 12.** Энергодисперсионные спектры, полученные от основных примесей, обнаруженных в ксеноминеральных плёнках на поверхности енисейских алмазов: а – самородная медь; б – самородный кобальт; в – вольфрам-кобальтовый сплав; г – Cu-Fe-Co-вольфрамовый сплав; д – предположительно квансонгит; е, ж – медные галогенсульфиды; з – сульфидный твердый раствор системы  $PbS-(Cu,Fe)_2S$

При исследовании в режиме КР с использованием лазера 514.5 нм (рис. 13, б) регистрируются «алмазная» рамановская линия при  $1332\text{ см}^{-1}$  и системы люминесценции с бесфононными полосами с максимумами при 575 и 638 нм. Для более четкой идентификации фотолюминесценция записывалась при температуре  $-196\text{ }^\circ\text{C}$ . Зарегистрированные полосы соответствуют простейшему азотно-вакансионному центру NV соответственно в нейтральном и отрицательно заряженном состоянии. По опыту исследований синтетических алмазов типа Ib (Dishler, 2012) известно, что такие оптически активные центры являются производными именно азотных C-дефектов.

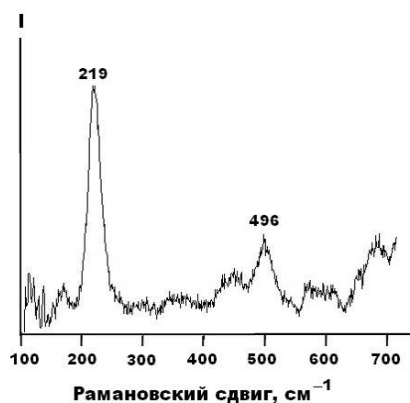
В проходящем свете микроскопа видно, что енисейские алмазы имеют центральные включения, близкие по форме к сульфидным «розочкам», часто встречающимся в природных алмазах (Тейлор, Ли, 2009). Судя по КР-спектру (рис. 14), это могут быть никелистый троилит или пирротин.

Таким образом, проведенные спектроскопические исследования показали, что исследуемые енисейские алмазы являются умеренно азотными, но при этом с практически неагрегированными азотными дефектами. Следовательно, эти алмазы не подвергались мантийному отжигу, возможно, они вообще имеют внемантийное происхождение. На сводной диаграмме В.Р. Тейлора (рис. 15) енисейские алмазы

отождествляются с алмазами устойчивого кубоктаэдрического габитуса из южно-тибетских офиолитовых перидотитов и продуктов последнего извержения Толбачинского вулкана, что может свидетельствовать об их генетическом сходстве.



**Рис. 13.** Спектроскопические особенности енисейских алмазов: а – спектры оптической плотности в ИК диапазоне; б – спектры КР (1, при  $T = 23^\circ\text{C}$ ) и фотолюминесценции (2–4, при  $T = -196^\circ\text{C}$ ), полученные при возбуждении лазером 514 нм. Кривые на б: 1 – кристалл № 1; 2, 3 – кристалл № 1, соответственно поверхность и внутренняя часть; 4 – кристалл № 2

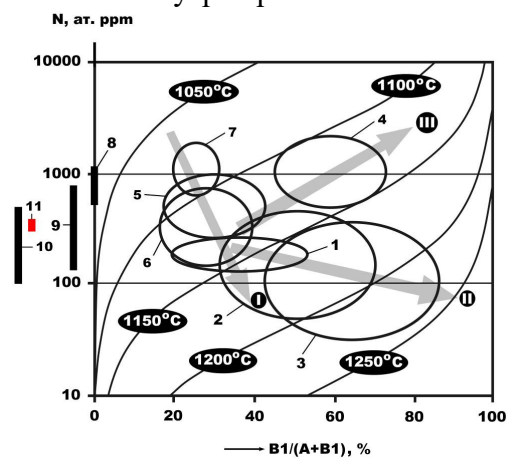


**Рис. 14.** Спектр КР, полученный от сульфидного включения в енисейском алмазе при возбуждении лазером 785 нм

### Изотопный состав углерода

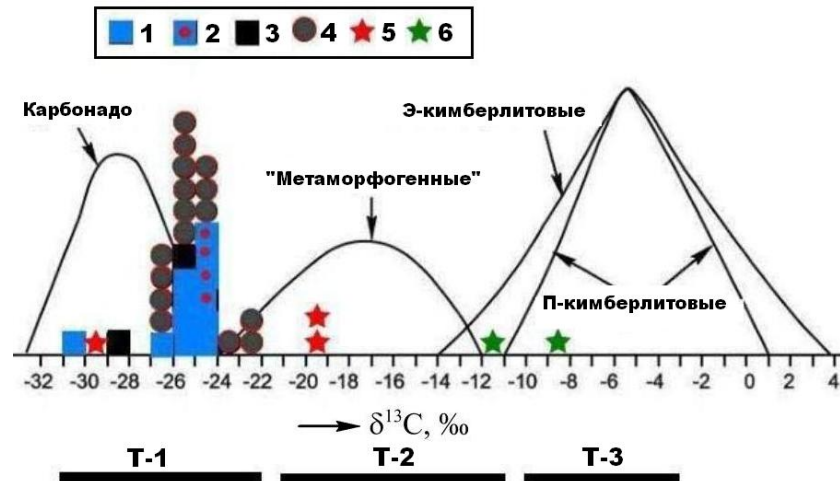
Изотопной масс-спектрометрии были подвергнуты два енисейских алмаза, при

этом анализ производился ступенчато – в 2–3 измерения в зависимости от размера кристалла и в последовательности от краевых частей внутрь кристаллов.



**Рис. 15.** Диаграмма Тейлора (Taylor, 1990; Taylor e. a., 1996), отражающая корреляцию концентрации структурного азота и степени агрегации азотных дефектов в алмазах с температурой посткристаллизационного отжига последних. Поля: 1 – Южная Африка; 2 – Бразилия, Минас Жерайс; 3 – Бразилия, Жуина; 4 – Северный Урал, Рассольнинское месторождение; 5 – Якутская алмазоносная провинция; 6 – Украина; 7 – Архангельская алмазоносная провинция. Тренды: I – кимберлитовый; II – бразильский; III – уральский. Отрезки: 8 – месторождение Кумдыколь, Северный Казахстан; 9 – алмазы из продуктов Толбачинского трещинного извержения (ТТИ-50), Камчатка; 10 – алмазы из перидотитов офиолитового массива Лубоуза, Южный Тибет (Howell e. a., 2015); 11 – енисейские алмазы

В результате были получены пять значений изотопного коэффициента  $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ , ‰. Кристалл № 1: 1)  $-19.05$ ; 2)  $-19.42$ ; 3)  $-28.14$ . Кристалл № 2: 1)  $-11.6$ ; 2)  $-8.63$ . Из этих данных следует, что изученные алмазы, во-первых, характеризуются разным изотопным составом углерода, во-вторых, обнаруживают значительную и при этом разнонаправленную изотопную неоднородность, а в-третьих, выявленная неоднородность – явно нелинейная, поскольку с переходом от ядерной части кристаллов на их края изменение изотопного состава алмазного углерода происходит скачкообразно.



**Рис. 16.** Изотопный состав углерода в углеродных фазах и алмазах: 1–4 – продукты Толбачинского трещинного извержения (ТТИ-50), соответственно лавы, лавы с алмазами, 3 – некристаллическое углеродное вещество, алмазы; 5, 6 – енисейские алмазы. Т-1, 2, 3 – изотопные группы алмазов с Тарыдакского алмазоносного участка

Из сводной диаграммы изотопного состава углерода в природных алмазах (рис. 16) следует, что углерод в енисейских алмазах охватывает интервал от – 8 до – 30 ‰, перекрывая диапазон вариаций изотопии углерода в ряду от эклогит-кимберлитовых алмазов до бразильских карбонадо. Кроме того, полученные для енисейских алмазов данные перекрывают большую часть диапазона колебаний изотопного состава углерода в алмазах Тарыдакского алмазоносного участка. Следует подчеркнуть, что выявляющийся разброс изотопных данных характерен именно для природных алмазов, наблюдаясь, например, практически в каждой крупной алмазоносной кимберлитовой трубке (Силаев и др., 2006).

Изотопная неоднородность углерода в масштабе индивидов енисейских алмазов может быть охарактеризована таким образом. В кристалле № 1 в направлении от внутренней его части к краю происходит изотопное утяжеление относительно центральной части индивида сначала на 31.6 ‰, а затем еще на 1.2 ‰. В более мелком кристалле № 2 при переходе от внутренней части к краю выявляется однократное изотопное облегчение на 34 ‰.

### Заключение

Алмазы с междуречья Панимба–Чиримба на Енисейского кряже, выявленные в крновом материале, вероятно, впервые обнаруженных на юго-западном фланге Сибирской платформы туффизитов, характеризуются зеленым цветом и устойчивым кубоктаэдрическим габитусом с примерно одинаковым развитием соответствующих простых форм. Как известно, алмазы такого габитуса ранее не встречались на Сибирской платформе, не учтены в общепринятой классификации алмазов (Орлов, 1973), но уже вполне достоверно установлены в целом ряде природных алмазоносных объектов, например, в лампрофирах и коматиитах района Паркер Лейк на Северо-Американской платформе (Каминский, Саблуков, 2002); в хромитоносных перидотитах офиолитового массива Луобуза в Южном Тибете (Howell e. a., 2015); в продуктах извержения Толбачинского (Карпов и др., 2014; Силаев и др., 2015<sub>в</sub>) и Ключевского (Силаев и др., 2016) камчатских вулканов; в золото-карбидвольфрамовых рудах Озерновского месторождения на Камчатке (Дёмин, 2015; Силаев и др., 2015<sub>б</sub>).

Изученные нами енисейские алмазы являются умеренно азотными, но при этом содержат неагрегированные азотные дефекты, что также объединяет их с кубоктаэдрическими толбачинскими, ключевскими и тибетскими алмазами. Отсутствие признаков существенной агрегации упомянутых дефектов может свидетельствовать о том, что исследованные алмазы не претерпевали мантийного отжига, а возможно, и вообще имеют внемантийное происхождение.

На поверхности исследованных алмазов выявлены ксеноминеральные пленки, в составе которых установлены разнообразные самородно-металлические, карбидные, сульфидные и галогенсульфидные, сульфатные и оксидные фазы, часть которых уже отмечалась в связи с природными алмазами. Внутри алмазов обнаружены включения ближе неопределенной фазы  $\text{SiO}_2$  и, вероятно, сульфидов. В качестве основных элементов-примесей установлены Ni, Fe и Mn, которые ранее были определены как типичные в южно-тибетских и толбачинских кубоктаэдрических алмазах.

Енисейские алмазы обнаружили широкий диапазон изотопных вариаций углерода в масштабе изученной популяции, а также очень резкую изотопную неоднородность по углероду в масштабе индивидов, что не характерно для синтетических алмазов, но часто наблюдается в природных.

Обобщение результатов исследований даёт возможность сделать вывод о естественном происхождении енисейских кубоктаэдрических алмазов и их генетической связи с туффизитоподобными образованиями, что подтверждает ранее выдвинутую С.А. Грахановым, В.П. Афанасьевым и В.С. Шкодзинским идею о полигенности алмазов на Восточно-Сибирской платформе. Учитывая это, мы высказываемся в пользу того, что выявленные недавно в керне, полученном на Кингашском платиноидно-медно-никелевом месторождении в Восточном Саяне, алмазы тоже могут оказаться не результатом тех-

нического засорения керна, как это предполагается в настоящее время, а вполне естественным природным феноменом.

Авторы выражают благодарность за содействие, сотрудничество и помощь в исследованиях заместителю директора по науке ГП КК «КНИИГиМС», к. г.- м. н. П.П. Курганькову; главному геологу ОАО «Красноярскгеолсъемка» (в настоящее время руководитель проекта Отдела РГ и ПИ Восточной Сибири ФГБУ ВСЕГЕИ), к. г.-м. н. Е. И. Берзону; кристаллографу д. г.- м. н. В. И. Ракину; рентгенологу к. г.-м. н. Б. А. Макееву; научным сотрудникам В. А. Салтанову (ВСЕГЕИ) и В. А. Капитановой; высококвалифицированным инженерам-технологам А. Е. и П. Е. Шныровым.

### Библиографический список

- Афанасьев В. П., Гриффин В. Л., Натанов Л. М. О перспективах алмазоносности юго-западного фланга Тунгусской синеклизы // Геология рудных месторождений. 2005. Т. 47. № 1. С. 51–69.
- Буров А. П. Как искали алмазы. М.: Госгеолтехиздат, 1962. 37 с.
- Бутан В. А. Конгломератовидные брекчии Ангарской тектоно-магматической зоны Енисейского кряжа // Минералы и руды Красноярского края. Красноярск, 1999. С. 67–74.
- Голубева И. И. Коварная конвергенция // Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН. 1999. № 3. С. 6–7.
- Голубева И. И. Туффизит – порода или явление? // Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН. 1998. № 11. С. 5–6.
- Граханов С. А., Зарукин А. О., Богуш И. Н., Ядренкин А. В. Открытие верхнегриясовых россыпей в акватории Оленёкского залива моря Лаптевых // Отечественная геология. 2009. № 1. С. 53–63.
- Дёмин А. Г. Озерновское месторождение как новый перспективный рудный объект Центральной Камчатки с комплексными рудами на золото, вольфрам, серебро и медь (своеобразие геологического строения, рудный потенциал и методика изучения) // Золото и технологии. 2015. № 1 (27). С. 100–106.
- Дибров В. Е., Миронов И. К., Холь Ф. И., Андрианов В. Т. Геологическое строение и алмазоносность юго-западной части Си-

- бирской платформы. М.: Изд-во АН СССР, 1960. 98 с.
- Динер А. Э.* Позднедокембрийский щелочной магматизм севера Енисейского кряжа // Щелочные комплексы центральной Сибири. Красноярск, 2003. С. 14–24.
- Долгинов Е. А.* Роль поперечных тектонических зон в строении заангарской части Енисейского кряжа // Вопросы геологии Красноярского края. М.: Изд-во МГУ, 1964. С. 52–63.
- Зверев В. В., Ладынин А. А.* Некоторые особенности регионального геохимического поля заангарской части Енисейского кряжа в связи с перспективами выявления кимберлитовых полей // Геология и минеральные ресурсы Центральной Сибири. Красноярск: Изд-во КНИИГиМС, 2002. Вып. 3. С. 69–79.
- Избеков Э. Д., Подъячев Б. П., Афанасьев В. П.* Признаки симметричной алмазоносности восточной части Сибирской платформы (относительно Вилюйской синиклизы) // Доклады РАН. 2006. Т. 411, № 3. С. 352–353.
- Каминский Ф. В., Кирикилица С. И., Полканов Ю. А.* Балласы Присяяня // Доклады АН СССР. 1982. Т. 267. С. 1218–1221.
- Каминский Ф. В., Саблуков С.М.* Нетрадиционные месторождения алмазов // Наука в России. 2002. № 1. С. 6.
- Карнов Г.А., Силаев В.И., Аникин Л.П., Ракин В.И., Васильев Е.А., Филатов С.К., Петровский В.А., Флеров Г.Б.* Алмазы и сопутствующие минералы в продуктах трещинного Толбачинского извержения 2012–2013 гг. // Вулканология и сейсмология. 2014. № 6. С. 3–20.
- Курганьков П. П., Кузьмин И. А.* Новые данные о перспективах коренной алмазоносности Енисейского кряжа // Алмазы и благородные металлы Тимано-Уральского региона: матер. Всерос. совещания. Сыктывкар: Геопринт, 2006. С. 78–79.
- Курганьков П. П., Кузьмин И. А.* О перспективах открытия некимберлитовых источников алмазов в пределах Енисейской провинции (Енисейский кряж) // Проблемы прогнозирования и поисков месторождений алмазов на закрытых территориях: матер. конф., посвящ. 40-летию ЯНИГП ЦНИГРИ АК «АЛРОСА». Якутск: Изд-во ЯНЦ СО РАН, 2008. С. 252–260.
- Курганьков П. П., Кузьмин И. А., Чурилин М. А.* Енисейский кряж – новая алмазоносная провинция // Геология и минеральные ресурсы Центральной Сибири. 2005. Вып. 6. С. 65–105.
- Макеев А. Б., Иванух В.* Морфология кристаллов, пленки и примазки на поверхности тиманских и бразильских алмазов // Проблемы минералогии, петрографии и металлогении. Научные чтения памяти П.Н. Чирвинского. Перм. гос. ун-т. Пермь, 2004. Вып. 6. С. 193–216.
- Махлаев Л. В., Голубева И. И.* Флюидизаты требуют внимания // Природа. 2001. № 9. С. 59–68.
- Михайлов Н. П., Полякова Е. А.* Об одном ошибочно выделенном типе коренных месторождений алмазов // Советская геология. 1959. № 6. С. 134–135.
- Мкртычъян А. К., Кавицкий М. Л., Курганьков П. П., Мкртычъян Г. А., Ваганов А. С.* Перспективы алмазоносности Красноярского края // Минеральные ресурсы Красноярского края / Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. М.: Геоинформмарк, 2004. С. 66–71.
- Номенклатура слюд:* заключительный доклад подкомитета по слюдам Комиссии по новым минералам и названиям минералов Международной минералогической ассоциации (КНМ НМ ММА) // Записки ВМО. 1998. № 5. С. 55–65.
- Орлов Ю. Л.* Минералогия алмаза. М.: Наука, 1973. 222 с.
- Розен О. М., Манаков А. В., Горев Н. И., Зинчук Н. Н.* Кимберлиты, ультраосновные щелочные комплексы с карбонатами и траппы – разные формы плюмового магматизма на Сибирском кратоне // Проблемы прогнозирования и поисков мантийных алмазов на закрытых территориях. Якутск: Изд-во ЯНЦ СО РАН, 2008. С. 32–38.
- Рыбальченко А. Я., Рыбальченко Т. М., Силаев В. И.* Теоретические основы прогнозирования и поисков коренных месторождений алмазов туффизитового типа // Известия Коми НЦ УрО РАН. 2011. № 1. С. 54–66.
- Секерин А. П., Егоров К. Н., Лащенко В. А.* Проблемы алмазоносности юго-западной части Сибирской платформы // Отечественная геология. 1999. № 1. С. 15–18.
- Силаев В. И., Вергасова Л. П., Васильев Е. А., Карнов Г. А., Сухарев А. Е., Филатов С. К.* Микропарагенезис алмаза и самородного алюминия в продуктах современного вулканизма // Вулканология и сейсмология. 2016. № 1. С. 71–77.

- Силаев В. И., Дамдинов Б. Б., Смолева И. В., Голубева И.И. Симакова Ю. С. Конденсированное углеродистое вещество в серпентинитах и альбититах Оспино-Китойского офиолитового массива (Восточный Саян) // Проблемы минералогии, петрографии и металлогении. Научные чтения памяти П. Н. Чирвинского / Перм. гос ун-т, Пермь, 2015а. Вып. 18. С. 301–327.
- Силаев В. И., Карпов Г. А., Васильев Е. А., Ракин В. И., Сухарев А. Е. Камчатский алмазный феномен в связи с проблемой некимберлитовой алмазоносности // Минералы: строение, свойства, методы исследования: матер. VII Всерос. молод. науч. конф. Екатеринбург: Изд-во ИГГ УрО РАН, 2015б. С. 110–112.
- Силаев В. И., Карпов Г. А., Ракин В. И., Аникин Л. П., Васильев Е. А., Филиппов В. Н., Петровский В. А. Алмазы в продуктах Трещинного Толбачинского извержения 2012–2013, Камчатка // Вестник Пермского университета. Геология. 2015в. Вып. 26, № 1. С. 6–27.
- Силаев В. И., Петровский В. А., Сухарев А. Е. Изотопная неоднородность углерода в мантийных производных, включая карбонадо. Сыктывкар: Геопринт, 2006. 40 с.
- Силаев В. И., Чайковский И. И., Ракин В. И., Филиппов В. Н., Исаенко С. И., Лютовое В. П. Алмазы из флюидизатно-эксплозивных брекчий на Среднем Урале. Сыктывкар: Геопринт, 2004. 114 с.
- Старосельцев В. С., Мигурский А. В., Старосельцев К. В. Енисейский кряж и его сочленение с Сибирской платформой и Западно-Сибирской плитой // Геология и геофизика. 2003. Т. 44, № 1–2. С. 76–85.
- Сурков В. С., Старосельцев В. С., Кузнецов В. Л. Строение земной коры нижнего Приангарья // Геофизические исследования в Средней Сибири. Красноярск: Изд-во КНИИГиМС, 1997. С. 99–113.
- Сычкин Г. Н. Карстовые промежуточные коллекторы алмазов Урала – основной резерв расширения минерально-сырьевой базы на ближайшие годы // Проблемы литологии, геохимии и рудогенеза осадочного процесса. М.: Геос, 2000. Т. 2. С. 283–284.
- Тейлор Л. А., Ли Я. Включения сульфидов в алмазах не являются моносульфидным твёрдым раствором // Геология и геофизика. 2009. Т. 50, № 12. С. 1547–1559.
- Шестопалов М. Ф. Находки алмазов и алмазоносных пород в СССР // Труды ЦНИЛКС. 1938. Вып. 4.
- Шкодзинский В. С. Петрология литосферы и кимберлитов (модель горячей гетерогенной аккреции Земли). Якутск: Изд. дом СВФУ, 2014. 452 с.
- Щербаков Ю. Г. Периодическая система и космогеохимическое распределение элементов // Геология и геофизика. 1982. № 1. С. 77–87.
- Boyd S. R., Kiflawi I., Woods G. S. The relationship between infrared absorption and the A defect concentration in diamond // Phil. Mag. B. 1994. Vol. 69. P. 1149–1153.
- Dishler B. Handbook of Spectral Lines in Diamond. Springer, 2012. Vol. 1. 467 p.
- Howell D., Griffin W. L., Yang J., Gain S., Stern R. A., Huang J.-X., Xu X., Stokes A. J., O'Reilly S. Y., Pearson N. J. Diamonds in ophiolites: Contamination or a new diamond growth environments? // Earth and Planetary Science Letters. 2015. Vol. 430. P. 284–295.
- Fang Q., Bai W., Yang J., Xu X., Li G., Shi N., Xiong M., Rong H. Qusongite (WC): A new Mineral // Am. Mineral. 2009. Vol. 94. P. 387–390.
- Stepashko A. A. The structure of the Lithospheric Mantle of the Siberian Craton and Seismodynamics of Deformation waves in the Baikal Seismic Zone // Geodynamics and Tectonophysics, 2013. Vol. 4, № 4. P. 387–415.
- Taylor W.R. Nitrogen-defect aggregation characteristics of some Australian diamonds: time-temperature constraints on the source regions of pipe and alluvial diamonds // Am. Mineral. 1990. Vol. 75. P. 1290–1310.
- Taylor W.R., Canil D., Milledge H.J. Kinetics of Ib to IaA nitrogen aggregation in diamond // Geochim. Cosmochim. Acta, 1996. Vol. 60, № 23. P. 4725–4733.



## Diamonds from Tuffisite on the Yenisei Ridge

V.I. Silaev<sup>a</sup>, I.A. Kuzmin<sup>b</sup>, V.M. Kolyamkin<sup>b</sup>, E.A. Vasiliev<sup>c</sup>,  
A.E. Sukharev<sup>a</sup>, I.V. Smoleva<sup>a</sup>, V.N. Filippov<sup>a</sup>, N.S. Kurbatova<sup>b</sup>,  
A.F. Khazov<sup>a</sup>, V.A. Petrovsky<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Institute of Geology, Komi Scientific Center, Russian Academy of Sciences, 54 Pervomayskaya Str., Syktyvkar 167982, Russia. E-mail: silaev@geo.komisc.ru

<sup>b</sup>Siberian Branch of JSC PGO, 3D Berezina, Krasnoyarsk 660020, Russia

<sup>c</sup>Saint Petersburg Mining University, VI, 21 Line 2, St. Petersburg 199106, Russia

First complete mineralogical and geochemical studies were conducted for diamonds and tuffisites-like source rocks identified at the Eniseyskiy Ridge. Studied diamonds are characterized by green color, cubo-octahedral morphology, moderate nitrogen content, and unaggregated nitrogen structural defects. The xenomineral film on the surface of diamond consist of a variety of native metal, carbide, sulfide and sulfate, halosulfide and oxide phases. The main micro-impurities are presented by Ni, Fe, Mn. The individual crystals as well as the diamonds in whole vary significantly in the isotopic composition of carbon. The results confirm the widespread dissemination of the diamonds on the Siberian Platform and their polygenesis.

Key words: *Siberian Platform; tuffisites; diamonds; mineralogical and geochemical properties; diamond forecast.*

### References

- Afanasev V.P., Griffin V.L., Natapov L.M. 2005. O perspektivakh almazonosnosti yugo-zapadnogo flanga Tungusskoy sineklizy [On the prospects of the diamond potential of the southwestern flank of the Tunguska syncline]. *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy*, 47(1):51–69. (in Russian)
- Burov A.P. 1962. Kak iskali almazy [As searched for diamonds]. Gosgeoltekhizdat, Moskva, p. 37. (in Russian)
- Butan V.A. 1999. Konglomeratovidnye brekchii Angarskoy tektono-magmaticheskoy zony Eniseyskogo kryazha [Conglomerate-like breccia of the Angara tectono-magmatic zone of the Yenisei Ridge]. In *Mineraly i rudy Krasnoyarskogo kraya*. Krasnoyarsk, pp. 67–74. (in Russian)
- Golubeva I.I. 1999. Kovarnaya konvergentsiya [The treacherous convergence]. *Vestnik IG Komi NC UrO RAN*. 3:6–7. (in Russian)
- Golubeva I.I. 1998. Tuffizit – poroda ili yavlenie? [Is tuffizite a rock or phenomenon?]. *Vestnik IG Komi NC UrO RAN*. 11:5–6. (in Russian)
- Grakhanov S.A., Zarukin A.O., Bogush I.N., Jadrenkin A.V. 2009. Otkrytie verkhnetri-  
asovykh rossypey v akvatorii Olenyokskogo zaliva morya Laptevykh [The discovery of Upper Triassic placers in the Olenyok Bay waters of the Laptev Sea]. *Otechestvennaya geologiya*. 1:53–63. (in Russian)
- Djomin A.G. 2015. Ozernovskoe mestorozhdenie kak novyy perspektivnyy rudnyy obyekt Tsentralnoy Kamchatki s kompleksnymi rudami na zoloto, volfram, srebro i med (svoeobrazie geologicheskogo stroeniya, rudnyy potentsial i metodika izucheniya) [Ozernovskoe deposit as a new promising ore deposit of Central Kamchatka with complex ores for gold, tungsten, silver and copper (geological structure, ore potential and methods of study)]. *Zoloto i tekhnologii*. 1(27):100–106. (in Russian)
- Dibrov V.E., Mironov I.K., Hol F.I., Andrianov V.T. 1960. Geologicheskoe stroenie i almazonosnost yugo-zapadnoy chasti Sibirskoy platformy [Geological structure and diamond content of the southwestern part of the Siberian Platform]. *Izd. AN SSSR, Moskva*, p. 98. (in Russian)
- Diner A.Je. 2003. Pozdnedokembriyskiy shchelochnoy magmatizm severa Eniseyskogo kryazha [Late Precambrian alkaline magmatism at the north of the Yenisei Ridge]. In *Sh-*

- chelochnye komplekсы tsentralnoy Sibiri. Krasnojarsk, pp. 14–24. (in Russian)
- Dolginov E.A.* 1964. Rol' poperechnykh tektonicheskikh zon v stroenii zaangarskoy chasti Eniseyskogo kryazha [The role of transverse tectonic zones in the structure of the Zaangarye area of the Yenisei Ridge]. *In* Voprosy geologii Krasnoyarskogo kraya. Izd. MGU, pp. 52–63. (in Russian)
- Zverev V.V., Ladynin A.A.* 2002. Nekotorye osobennosti regionalnogo geokhimicheskogo polya zaangarskoy chasti Eniseyskogo kryazha v svyazi s perspektivami vyyavleniya kimberlitovykh poley [Some features of the regional geochemical field of the Zaangarye area of the Yenisei Ridge in connection with the prospects of identification the kimberlite fields]. *In* Geologiya i mineralnye resursy Tsentralnoy Sibiri. V. 3. Izd. KNIIGiMS, Krasnojarsk, pp. 69–79. (in Russian)
- Izbekov Je.D., Podyachev B.P., Afanasyev V.P.* 2006. Priznaki simmetrichnoy almazonosnosti vostochnoy chasti Sibirskoy platformy (otnositelno Vilyujskoy sineklizy) [Signs of symmetrical diamond content of the eastern part of the Siberian Platform (relative to the Vilyuyskaya syncline)]. *Doklady RAN*, 411(3):352–353. (in Russian)
- Kaminskiy F.V., Kirikilitza S.I., Polkanov Ju.A.* 1982. Ballasy Prisayanya [Ballas of PreSayan area]. *Doklady AN SSSR*. 267:1218–1221. (in Russian)
- Kaminskiy F.V., Sablukov S.M.* 2002. Netraditsionnye mestorozhdeniya almazov [Non-traditional diamond deposits]. *Nauka v Rossii*, 1:6. (in Russian)
- Karpov G.A., Silaev V.I., Anikin L.P., Rakin V.I., Vasiliev E.A., Filatov S.K., Petrovskiy V.A., Flerov G.B.* 2014. Almazy i soputstvuyushchie mineraly v produktakh Treshchinnogo Tolbachinskogo izverzheniya 2012–2013 gg. [Diamonds and associated minerals in the products of the Tolbachik Eruption 2012–2013]. *Vulkanologiya i seismologiya*, 6:3–20. (in Russian)
- Kurgankov P.P., Kuzmin I.A.* 2006. Novye dannye o perspektivakh korennoy almazonosnosti Eniseyskogo kryazha [New data on the prospects of the native diamondiferousness of the Yenisei Ridge]. *In* Almazy i blagorodnye metally Timano-Uralskogo regiona. Materialy Vserossiyskogo soveshchaniya. Geoprint, Syktyvkar, pp. 78–79. (in Russian)
- Kurgankov P.P., Kuzmin I.A.* 2008. O perspektivakh otkrytiya nekimberlitovykh istochnikov almazov v predelakh Eniseyskoy provintsii (Eniseyskiy kryazh) [On the prospects of discovery of the non-kimberlite sources of diamonds within the the Yenisei Province (Yenisei Ridge)]. *In* Problemy prognozirovaniya i poiskov mestorozhdeniy almazov na zakrytykh territoriyakh. Materialy konf, posvyashch. 40-letiyu YaNIGP CNIGRI AK ALROSA. Izd. YaNC SO RAN, Yakutsk, pp. 252–260. (in Russian)
- Kurgankov P.P., Kuzmin I.A., Churilin M.A.* 2005. Eniseyskiy kryazh – novaya almazonosnaya provintsiya [The Yenisei Range is a new diamondiferous province]. *Geologiya i mineralnye resursy Tsentralnoy Sibiri*, 6:65–105. (in Russian)
- Makeev A.B., Ivanukh V.* 2004. Morfologiya kristallov, plenki i primazki na poverkhnosti timanskikh i brazilskikh almazov [Morphology of crystals, films and coats on the surface of Timan and Brazilian diamonds]. *In* Problemy mineralogii, petrografii i metallogenii: Nauchnye chteniya pamyati P. N. Chirvinskogo. V. 6. Izd. Permskogo univ., Perm, pp. 193–216. (in Russian)
- Makhlaev L.V., Golubeva I.I.* 2001. Flyuidizaty trebuyut vnimaniya [Fluidizites need attention]. *Priroda*, 9:59–68. (in Russian)
- Mikhaylov N.P., Polyakova E.A.* 1959. Ob odnom oshibochno vydelennom tipe korennykh mestorozhdeniy almazov [On one mistaken identification of primary diamond deposits type]. *Sovetskaya geologiya*, 6:134–135. (in Russian)
- Mkrtychyan A.K., Kavitskiy M.L., Kurgankov P.P., Mkrtychyan G.A., Varganov A.S.* 2004. Perspektivy almazonosnosti Krasnoyarskogo kraya [Prospects of diamond resources of the Krasnoyarskiy kraj]. *In* Mineralnye resursy Krasnoyarskogo kraya. Mineralnye resursy Rossii. Ekonomika i upravlenie. Geoinformark, Moskva, pp. 66–71. (in Russian)
- Nomenklatura slyud: zaklyuchitelnyy doklad podkomiteta po slyudam Komissii po novym mineralam i nazvaniyam mineralov Mezhdunarodnoy mineralogicheskoy assotsiatsii (KNM NM MMA)* [Nomenclature of micas: final report of the Subcommittee on Mica of the Commission on New Minerals and minerals names of the International Mineralogical Association (KNM NM MMA)]. *Zapiski VMO*, 1998. 5:55–65. (in Russian)
- Orlov Ju.L.* 1973. Mineralogiya almaza [Diamond Mineralogy]. *Nauka*, Moskva, p. 222. (in Russian)

- Rozen O.M., Manakov A.V., Gorev N.I., Zinchuk N.N.* 2008. Kimberlity, ultrasnovnye shchelochnye komplekсы s karbonatami i trappy – raznye formy plyumovogo magmatizma na Sibirskom kratone [Kimberlites, ultrabasic alkaline complexes with carbonates and traps – different forms of plume magmatism at the Siberian craton]. *In Problemy prognozirovaniya i poiskov mantiynykhalmazov na zakrytykh territoriyakh.* Izd. YaNC SO RAN, Yakutsk, pp. 32–38. (in Russian)
- Rybalchenko A.Ya., Rybalchenko T.M., Silaev V.I.* 2011. Teoreticheskie osnovy prognozirovaniya i poiskov korenykh mestorozhdeniyalmazov tuffizitovogo tipa [Theoretical base of forecasting and prospecting of the primary diamonds deposits of tuffisite type]. *Izvestiya Komi SC UrO RAN.* 1:54–66. (in Russian)
- Sekerin A.P., Egorov K.N., Lashhenov V.A.* 1999. Problemy almazonosnosti yugo-zapadnoy chasti Sibirskoy platformy [Problems of diamondiferousness of the southwestern part of the Siberian Platform]. *Otechestvennaya geologiya.* 1:15–18. (in Russian)
- Silaev V.I., Vergasova L.P., Vasilev E.A., Karpov G.A., Suharev A.E., Filatov S.K.* 2016. Mikroparagenезis almaza i samorodnogo alyuminiya v produktakh sovremennogo vulkanizma [Microparagenesis of diamond and native aluminum in products of contemporary volcanism]. *Vulkanologiya i seysmologiya.* 1: 71–77. (in Russian)
- Silaev V.I., Damdinov B.B., Smoleva I.V., Golubeva I.I., Simakova Yu.S.* 2015a. Kondensirovannoe ughlerodistoe veshchestvo v serpentinitakh i albititakh Ospino-Kitoyskogo ofiolitovogo massiva (Vostochnyy Sayan) [Condensed carbonaceous substance in serpentinites and albitites of the Ospino-Kitoy ophiolite massif (Eastern Sayan)]. *In Problemy mineralogii, petrografii i metallogenii.* Nauchnye chteniya pamyati P.N. Chirvinskogo. V. 18.: Izd. Perm. univ., Perm, pp. 301–327. (in Russian)
- Silaev V.I., Karpov G.A., Vasilev E.A., Rakin V.I., Sukharev A.E.* 2015b. Kamchatskiyalmaznyy fenomen v svyazi s problemoy nekimberlitovoy almazonosnosti [Kamchatka diamond phenomenon in relation to the problem of non-kimberlite diamondiferousness]. *In Mineraly: stroenie, svoystva, metody issledovaniya.* Mat. VII Vserossiyskoy molodezhnoy nauchnoy konferentsii. Izd. IGG UrO RAN, Ekaterinburg, pp. 110–112. (in Russian)
- Silaev V.I., Karpov G.A., Rakin V.I., Anikin L.P., Vasilev E.A., Filippov V.N., Petrovskiy V.A.* 2015c. Almazy v produktakh Treshchinnogo Tolbachinskogo izverzheniya 2012–2013, Kamchatka [Diamonds in products of the Fissures Tolbachik Eruption 2012–2013, Kamchatka]. *Vestnik Permskogo universiteta. Geologiya.* 1(26):6–27. (in Russian)
- Silaev V.I., Petrovskiy V.A., Suharev A.E.* 2006. Izotopnaya neodnorodnost ughleroda v mantiynykh proizvodnykh, vklyuchaya karbonado [Isotopic heterogeneity of carbon in mantle derivatives, including carbonado]. *Geoprint, Syktyvkar,* p. 40. (in Russian)
- Silaev V.I., Chaykovskiy I.I., Rakin V.I., Filippov V.N., Isaenko S.I., Lyutoev V.P.* 2004. Almazy iz flyuidizatsno-eksplozivnykh brekchiy na Srednem Urale [Diamonds from fluid-explosive breccias in the Middle Urals]. *Geoprint, Syktyvkar,* p. 114. (in Russian)
- Staroseltsev V.S., Migurskiy A.V., Staroseltsev K.V.* 2003. Eniseyskiy kryazh i ego sochlenenie s Sibirskoy platformoy i Zapadno-Sibirskoy plitoy [The Yenisei Ridge and its junction with the Siberian Platform and the West Siberian Plate]. *Geologiya i geofizika,* 44(1–2):76–85. (in Russian)
- Surkov B.C., Staroseltsev B.C., Kuznecov V.L.* 1997. Stroenie zemnoy kory nizhnego Priangarya [The structure of the earth's crust of the Lower Angara region]. *In Geofizicheskie issledovaniya v Sredney Sibiri.* Izd. KNIIGiMS, Krasnoyarsk, pp. 99–113. (in Russian)
- Sychkin G.N.* 2000. Karstovye promezhutochnye kollektoraalmazov Urala – osnovnoy rezerv rasshireniya mineralno-syrievoy bazy na blizhayshie gody [Karst intermediate collectors of the Ural diamonds: the main reserve for the extension of the mineral resources base for the coming years]. *In Problemy litologii, geokhimii i rudogenezasadochnogo protsesssa.* T. 2, Geos, Moskva, pp. 283–284. (in Russian)
- Taylor L.A., Li Ya.* 2009. Vklyucheniya sulfidov v almazakh ne yavlyayutsya monosulfidnym tvyordym rastvorom [The inclusion of sulphides in diamonds is not a monosulfide solid solution]. *Geologiya i geofizika.* 50(12):1547–1559. (in Russian)
- Shestopalov M.F.* 1938. Nakhodkialmazov i almazonosnykh porod v SSSR [Findings of diamonds and diamond-bearing rocks in

- the USSR]. Trudy CNILKS, Vyp. 4. (in Russian)
- Shkodzinskiy V.S.* 2014. Petrologiya litosfery i kimberlitov (model goryachey geterogennoy akkretsii Zemli) [Petrology of the lithosphere and kimberlites (model of hot heterogeneous Earth's accretion)]. SVFU, Yakutsk, p. 452. (in Russian)
- Shcherbakov Yu.G.* 1982. Periodicheskaya sistema i kosmogeokhimicheskoe raspredelenie elementov [Periodic system and cosmogeochemical distribution of elements]. Geologiya i geofizika. 1:77–87. (in Russian)
- Boyd S.R., Kiflawi I., Woods G.S.* 1994. The relationship between infrared absorption and the A defect concentration in diamond. *Phil. Mag. B*, 69:1149–1153.
- Dishler B.* 2012. Handbook of Spectral Lines in Diamond. V. 1. Springer, p. 467.
- Howell D., Griffin W.L., Yang J., Gain S., Stern R.A., Huang J.-X., Xu X., Stokes A.J., O'Reilly S.Y., Pearson N.J.* 2015. Diamonds in ophiolites: Contamination or a new diamond growth environment? *Earth and Planetary Science Letters*. 430:284–295. doi: 10.1016/j.epsl.2015.08.023
- Fang Q., Bai W., Yang J., Xu X., Li G., Shi N., Xiong M., Rong H.* 2009. Qusongite (WC): A new Mineral. *Am. Mineral.*, 94:387–390. doi: 10.2138/am.2009.3015
- Stepashko A.A.* 2013. The structure of the lithospheric mantle of the Siberian Craton and seismodynamics of deformation waves in the Baikal Seismic Zone. *Geodynamics and Tectonophysics*. 4(4):387–415. doi: 10.5800/GT-2013-4-4-0108
- Taylor W.R. et al.* 1990. Nitrogen-defect aggregation characteristics of some Australian diamonds: time-temperature constraints on the source regions of pipe and alluvial diamonds. *Am. Mineral.*, 75:1290–1310.
- Taylor W.R., Canil D., Milledge H.J.* 1996. Kinetics of Ib to IaA nitrogen aggregation in diamond. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 60(23):4725–4733. doi: 10.1016/S0016-7037(96)00302-X