

АЛМАЗОНОСНЫЕ ТУФОГЕННО-ОСАДОЧНЫЕ ПОРОДЫ ТРИАСА АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЫ СИБИРИ

С.А. Граханов^{1,4}, В.Ф. Проскурнин¹, О.В. Петров¹, **Н.В. Соболев^{2,3}**

¹ Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского, 199106, Санкт-Петербург, Средний просп., 74, Россия

² Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, 630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия

³ Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 1, Россия

⁴ АО «АЛМАР — АЛМАЗЫ АРКТИКИ», 677000, Якутск, ул. Чернышевского, 8/2, Россия

В арктической зоне Сибири открыты крупные проявления алмазов, которые сформированы в вулканокластических, осадочно-вулканокластических, вулканогенно-осадочных и осадочных породах верхов ладинского и основания карнийского ярусов триаса. Они приурочены к Приморской минерогенической зоне, которая вдоль акватории моря Лаптевых трассируется от Западного Верхоянья до Восточного Таймыра. В этих отложениях впервые установлен своеобразный спектр алмазов, где среди округлых кристаллов I, II, V и VII разновидностей присутствуют индивиды с облегченным изотопным составом углерода и высокими концентрациями азота. Они по своим типоморфным особенностям не имеют аналогов в известных коренных источниках Якутии, но имеют полное сходство с таковыми в рэтских, раннеюрских, позднеюрских, раннемеловых, неогеновых и четвертичных промышленных россыпях и россыпных проявлениях, что предполагает формирование их за счет размыва триасовых источников.

Алмаз, месторождение, россыпь, триас, арктическая зона Сибири

TRIASSIC DIAMONDIFEROUS TUFFACEOUS-SEDIMENTARY ROCKS IN THE ARCTIC ZONE OF SIBERIA

S.A. Grakhanov, V.F. Proskurnin, O.V. Petrov, **N.V. Sobolev**

In the Arctic zone of Siberia, large diamond occurrences have been discovered in volcanoclastic, sedimentary-volcanoclastic, volcanosedimentary, and sedimentary rocks of the upper Ladinian strata and the base of the Carnian (Triassic) strata. They are confined to the Primorye mineragenic zone, which is traced along the Laptev Sea water area from the western Verkhoyansk area to eastern Taimyr. We have first identified a specific range of diamonds in these deposits. Among the rounded crystals of varieties I, II, V, and VII, there are grains with a light carbon isotope composition and high nitrogen contents. They have no analogues in typomorphic features in the known primary deposits of Yakutia but are completely similar to diamonds in the Rhaetian, Early Jurassic, Late Jurassic, Early Cretaceous, Neogene, and Quaternary commercial placers and placer occurrences, which suggests their formation as a result of the erosion of Triassic sources.

Diamond, deposit, placer, Triassic, Arctic zone of Siberia

ВВЕДЕНИЕ

Статья посвящена рано ушедшим, но внесшим весомый вклад в изучение новых источников алмазов Арктики, нашим друзьям и коллегам д.г.-м.н. Смелову А.П. (ИГАБМ СО РАН) и к.г.-м.н. Егорову К.Н. (ИЗК СО РАН).

В пределах северо-восточной части Сибирской платформы известно более 700 кимберлитовых тел, локализованных в 15 полях палеозойского и мезозойского возрастов [Брахфогель, 1984; Зайцев, Смелов, 2010] (рис. 1) с очень низкой алмазонасностью, за исключением тр. Малокуонапская, датированной U/Pb методом по циркону (226 ± 6 млн лет) в Куранахском кимберлитовом поле [Lerexhina et al., 2008]. Содержание алмазов в этой трубке приближается к промышленному, а качество кристаллов высокое [Харьков и др., 1998]. На этой же территории открыты многочисленные крупные россыпные месторождения алмазов преимущественно четвертичного возраста и сосредоточено около 70 % всех

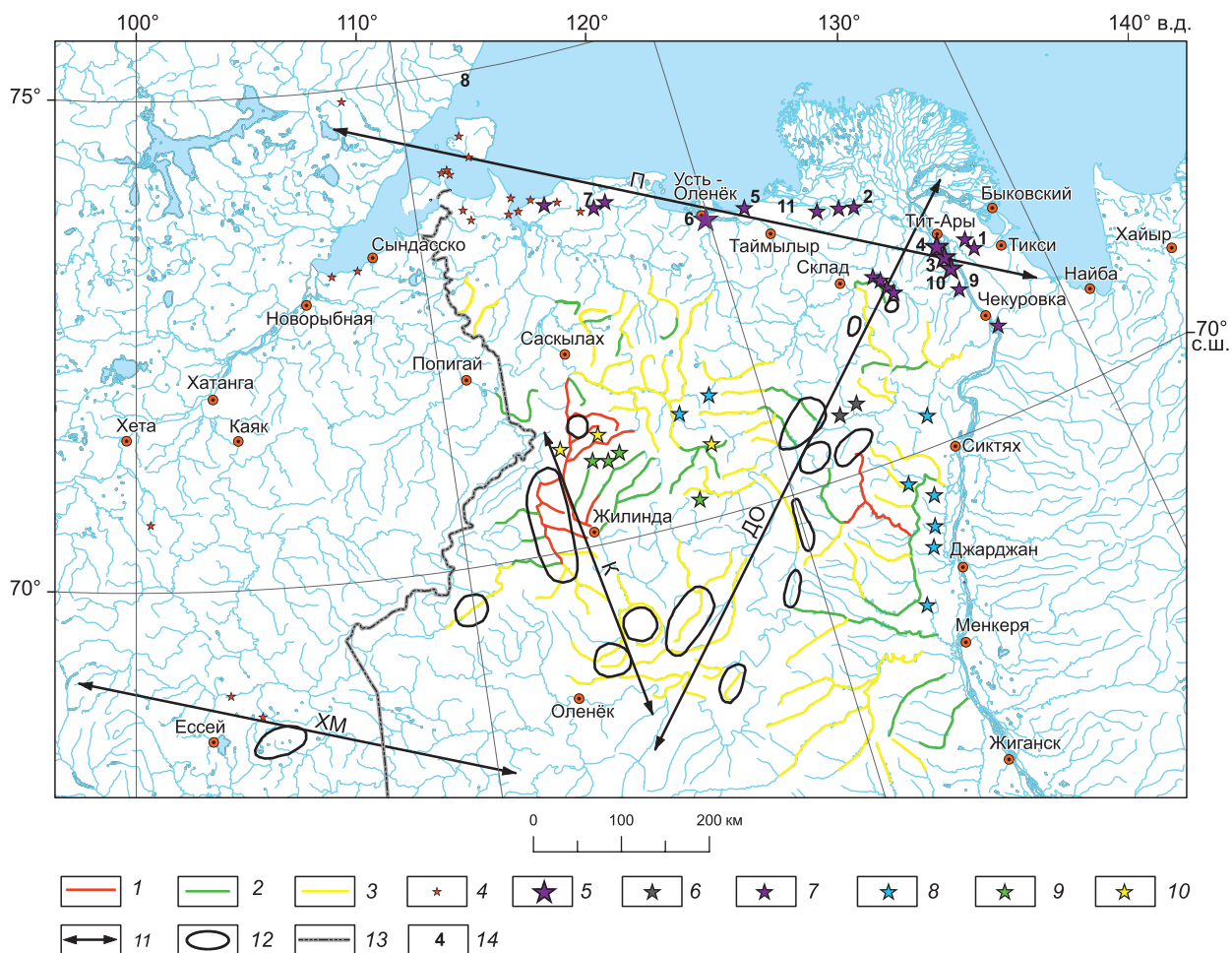


Рис. 1. Схема алмазности арктической зоны Сибири.

1—4 — россыпные месторождения и проявления алмазов: промышленные четвертичные россыпи эксплуатируемые (1); россыпи средней и низкой продуктивности (2); россыпи с убогой алмазностью (3); единичные находки алмазов в четвертичном аллювии (4); 5—10 — находки алмазов в древних промежуточных коллекторах с ураганскими (5) и средними, низкими (6—10) значениями алмазности: в каменноугольных (6), триасовых (7), юрских (8), меловых (9) и неогеновых (10) отложениях; 11 — осевые части минерагенических зон: Далдыно-Оленекской (ДО), Куонамской (К), Приморской (П), Харамайско-Мунской (ХМ); 12 — кимберлитовые поля; 13 — административная граница; 14 — изученные разрезы ангардамтасского комплекса кенгдейской пачки (1 — Ольховый, Хараулахский хребет, 2 — Кенгей-Юряге, кряж Чекановского) и булкурской пачки (3 — Булкурская антиклиналь, т. н. ПГ2, 4 — Булкурская антиклиналь, т.н. БГ1, 5 — Оленекский залив, м. Улахан-Крест, 6 — дельта р. Оленек, м. Тумул, 7 — кряж Прончищева, р. Урасалаах, 8 — море Лаптевых, м. Цветкова, 9 — р. Улахан-Алджархай, хр. Туора-Сис, 10 — Булкурская антиклиналь, р. Хатыстах, 11 — кряж Чекановского, р. Тас-Крест-Юряге).

разведанных и прогнозируемых запасов россыпных алмазов Российской Федерации. Переотложенные четвертичные россыпи алмазов оторваны друг от друга на большие расстояния. Наиболее крупные россыпные месторождения находятся в Анабарском алмазном районе [Подчасов и др., 2005; Граханов и др., 2007; Vochneva et al., 2021] (см. рис. 1, р. Эбелях).

Мезозойские отложения на северо-востоке Сибирской платформы развиты довольно широко. Они представлены осадочными образованиями триасовой, юрской и меловой систем. Высокопродуктивными являются отложения на границе ладинского и карнийского ярусов [Натапов и др., 1980; Граханов, Коптиль, 2003; Граханов и др., 2009, 2010б; Березнер и др., 2016]. Средней продуктивностью выделяются отложения рэтского яруса [Граханов и др., 2010а]. К слабоалмазным следует отнести юрские и меловые отложения, последние установлены в карстовых воронках и эрозионно-карстовых депрессиях в бассейнах рек Анабар и Оленек [Граханов и др., 2007, 2013]. В пределах арктической зоны Сибири масштабной продуктивностью выделяется Приморская минерагеническая зона (см. рис. 1), где в верхах ладина и основании карния установлены вулканокластические, осадочно-вулканокластические, вулканогенно-осадочные и осадочные образования кенгдейской и булкурской пачек, описанию алмазности которых и посвящена настоящая статья.

ИСТОРИЯ ОТКРЫТИЯ И ИЗУЧЕНИЯ ТРИАСОВОЙ АЛМАЗОНОСНОСТИ

Впервые алмаз в карнийских отложениях верхнего триаса был найден в 1979 г. на о. Таас-Ары [Гогина, 1979]. В последующем (1980—1985 гг.) работами Ю.М. Сибирцева, Р.О. Галабалы, А.Ю. Егорова, В.В. Селивановой и многих других (НПО «Аэрогеология») был открыт Нижнеленский алмазоносный узел с высокой и ураганной алмазоносностью карнийских отложений на Булкурской антиклинали, средней и низкой продуктивностью ладинских образований Западного Верхоянья и кряжа Чекановский, проведены минералогические, стратиграфические и палеогеографические исследования, доказано, что коренные источники алмазов расположены в непосредственной близости [Натапов и др., 1980; Егоров и др., 1987; Селиванова, 1991].

Стратиграфические и литологические исследования триасовых отложений были выполнены новосибирскими учеными [Дагис, Казаков, 1984; Казаков и др., 2002].

В 1989—1990 гг. С.А. Грахановым и Н.И. Горевым («Якутскгеология») установлена алмазоносность базальных отложений карнийского яруса и современного аллювия (который формировался за счет размыва продуктивной пачки) на кряже Прончищева.

В 2004—2007 гг. большой объем биостратиграфических исследований триасовых отложений в нижнем течении р. Лена выполняли ученые ИНГГ СО РАН (А.Г. Константинов, Е.С. Соболев, А.В. Ядренкин) [Константинов и др., 2007].

С 2006—2013 гг. изучением алмазоносности триасовых отложений от Западного Верхоянья до м. Цветкова было занято ОАО «Нижнеленское». В результате поисковых работ открыт новый Усть-Оленекский алмазоносный узел с ураганной продуктивностью карнийских отложений (С.А. Граханов, А.В. Черемкин, А.В. Ядренкин), установлены повышенные концентрации ювелирных алмазов в ладинских отложениях на кряже Чекановского (В.И. Павлов), найдены пиропы в основании осипайской свиты на м. Цветкова на Восточном Таймыре, по всей минерагенической зоне проведены минералогические, петрографические, литологические исследования и выполнены U-Pb датирование кимберлитовых цирконов, которое указывает на триасовый возраст коренных источников, и фаунистическое обоснование основания ангардамтасского комплекса на участках Тумул и Булкур (определение Е.С. Соболева, А.М. Трущелева, А.В. Ядренкина) [Граханов, Ядренкин, 2007; Граханов и др., 2009, 2015а; Граханов, Смелов, 2011].

В 2010—2014 гг. геологами и учеными ОАО «Нижнеленское», ВСЕГЕИ, ИГАБМ СО РАН, ИГМ СО РАН, ИЗК СО РАН, ЦНИГРИ в ряде разрезов основания кенгдейской и булкурской пачек выделены прослой вулканогенных и вулканогенно-осадочных пород, объединенных в ангардамтасский комплекс [Граханов и др., 2010б; Проскурнин и др., 2012; Летникова и др., 2013; Государственная..., 2014].

На м. Цветкова Восточного Таймыра геологами ВСЕГЕИ (В.Ф. Проскурнин, А.В. Гавриш) в разрезе пород нижнего триаса установлены мелкие секущие тела флюидно-эксплозивных брекчий со спутниками алмаза [Проскурнин и др., 2017]. Накоплен большой научный материал по особенностям минералов-спутников алмаза [Афанасьев и др., 1986, 2008, 2009; Селиванова, 1991; Граханов и др., 2007, 2009, 2010а,б, 2015а; Соболев и др., 2013б, 2018; Биллер и др., 2018; Николенко и др., 2018].

Типоморфные особенности алмазов из продуктивных триасовых горизонтов изучались в Амакинской экспедиции (аналитик В.И. Коптиль), НИГП АК «АЛРОСА» (аналитики В.И. Коптиль, Б.С. Помазанский), содержание азота измерялось в НИГП АК «АЛРОСА» (аналитик И.Н. Богущ) и в ИГАБМ СО РАН (аналитик А.Е. Молотков), изучение пленок на кристаллах проводилось в ИГАБМ СО РАН (аналитик А.Д. Павлушин), определения изотопного состава углерода — в ИГМ СО РАН (аналитик В.Н. Реутский), химический состав включений в алмазах — в ИГиГ СО РАН (Н.В. Соболев, Э.С. Ефимова) [Зинчук, Коптиль, 2003; Граханов, Коптиль, 2003; Граханов и др., 2007, 2015а,б; Павлушин и др., 2010, 2016]. Дополнительно определен химический состав более 400 минеральных включений в алмазах северных россыпей в ИГМ СО РАН [Sobolev et al., 1999, 2009; Shatsky et al., 2014, 2015].

В настоящее время на западном склоне Булкурской антиклинали Арктическая горная компания производит поисково-оценочные работы.

ГЕОЛОГИЯ ВЫСОКОПРОДУКТИВНЫХ АЛМАЗОНОСНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ ПРИМОРСКОЙ МИНЕРАГЕНИЧЕСКОЙ ЗОНЫ

Особенностью Приморской минерагенической зоны (см. рис. 1), протягивающейся вдоль акватории моря Лаптевых от Западного Верхоянья до Восточного Таймыра, является ее приуроченность к зоне сочленения Восточнотаймырско-Оленекской позднекиммерийской складчатой системы верхоянид с Быррангской раннекиммерийской складчатой системой таймырид в обрамлении Сибирской платформы. Общим геологическим потенциально алмазоносным процессом для северного складчатого обрамления Сибирской платформы явилось проявление тектономагматических деформаций платформенных осадков на рубеже ладинско-карнийского веков в позднем триасе.

С этим этапом в пределах Таймыра и Сибирской платформы связано внедрение раннемезозойских малых интрузий пестрого состава [Соболев, 1937; Моор, 1941; Равич, Чайка, 1959; Гулин, 1970; Погребицкий, 1971; Беззубцев и др., 1986; Золотухин, 1990; Верниковский и др., 2001; Романов, 2002; Проскурнин и др., 2010; Проскурнина и др., 2019; и др.]: от шрисгеймитов, шонкинитов, монцогаббро до умеренно щелочных и щелочных сиенитов, граносиенитов и гранит-порфиров, от калиевых лампрофиров, лампроитов до альнеитов и лампрофиров камптонит-мончикитового ряда, «коровых» карбонатитов и кимберлитов раннемезозойского возраста. В пределах Восточнотаймырско-Оленекского региона в последние годы установлены проявления триасового базальт-дацитового вулканизма на р. Чернохребетная, трубки основного состава на кряже Прончищева и широкое развитие дайкового умеренно щелочного феррогаббро-долеритового комплекса [Государственная..., 2013].

В составе отложений карнийского горизонта описаны алмазоносные туффиты [Граханов и др., 2010б], часть из которых выделена в дальнейшем в ангардамтасский вулканический алмазоносный гидроэксплозивно-обломочный комплекс, слагаемый лапиллиевыми туфами, ксенотуфами, туффитами ультрамафитов [Проскурнин и др., 2012], возможно, кимберлитов [Государственная..., 2014] или лампроитов [Летникова и др., 2013], формирование которых проходило при активной роли фреатомагматических процессов. На м. Цветкова установлены мелкие инъективные тела флюидно-эксплозивных брекчий со спутниками алмаза [Проскурнин и др., 2017, 2021]. На северо-востоке Сибирской платформы раннекиммерийский тектономагматический этап проявлен в формировании потенциально промышленной кимберлитовой тр. Малокуонапская, слабоалмазоносных трубок Куранахского и Лучаканского полей.

Ангардамтасский вулканический алмазоносный комплекс выделен из состава кенгдейской пачки ладинского яруса и осипайской свиты (булкурская пачка) карнийского яруса и закартирован в пределах участков от Западного Верхоянья до кряжа Прончищева, где он образует маломощные тела, не выдержанные по простиранию [Государственная..., 2014] (рис. 2).

На основании реликтовых структурных особенностей выделены несколько петрографических разновидностей измененных эксплозивно-обломочных пород [Граханов и др., 2010б; Проскурнин и др., 2012], среди которых доминируют пепловые псаммитоалевритовые туфы и литовитрокластические мелколапиллиевые туфы, различающиеся размерностью сцементированной тефры, но не имеющие принципиальных различий в составе литокластического материала. В цементе отмечается также ксеногенный материал (0.5—5.0 %), представленный оскольчатыми кварцем и плагиоклазом. Помимо туфов, в составе комплекса по мере удаления от них по простиранию контакта осипайской и олимпийской (устье оленекской) свит (граница среднего и верхнего триаса) выделены ксенотуфы, иногда с обломками древесины, и туффиты. Рассматриваемый переход пород в ангардамтасском комплексе характеризует смену эксплозивно-обломочных вулканокластических пород осадочно-вулканокластическими. Вулканогенно-осадочные туфопесчаники и туфоалевролиты относятся уже к осипайской свите или кенгдейской пачке. В целом они с ангардамтасским комплексом образуют осадочно-вулканокластическую ассоциацию.

Триасовые алмазоносные образования имеют широкое распространение от Восточного Таймыра до Западного Верхоянья и, как правило, обнажаются в ядрах антиклинальных складок. В пределах севера Сибирской платформы самое масштабное обнажение осипайской свиты расположено на м. Цветкова Восточного Таймыра. Выходы алмазоносного основания осипайской свиты установлены на м. Тумул (дельта р. Оленек), м. Улахан-Крест (Оленекский залив), в среднем течении левого притока Лены — р. Булкур и на о. Таас-Ары (устье Лены). Представлены они вулканомиктовыми аргиллитами, алевролитами, песчаниками, конгломератами, туфопесчаниками, туфоалевролитами. Продуктивные базальные отложения осипайской свиты карнийского яруса залегают на среднетриасовых ладинских континентальных песчаниках туус-балыкской пачки или, реже, на образованиях кенгдейской пачки. Туус-балыкскую пачку ладина слагают толстоплитчатые серые кварцевые песчаники с массой обугленных растительных остатков. Пачка песчаников хорошо выражена в рельефе кустообразными грядами, и, напротив, осипайская свита, преимущественно сложенная аргиллитами, эродирована и создает отрицательные формы. Для триасовых отложений района характерно ритмичное строение, нижняя трансгрессивная часть, представленная морскими аргиллитами и алевролитами, и верхняя регрессивная часть — алевролитами и песчаниками прибрежно-морского—лагунно-континентального генезиса. На границе ритмов отмечаются поверхности размыва, фиксируемые горизонтами гравелитов, реже конгломератов [Дагис, Казаков, 1984; Казаков и др., 2002]. Мощность осипайской свиты варьирует от 3—9 до 60 м. Наибольшая мощность свиты наблюдается в стратотипе (р. Осипа, Таймыр) — 60 м, в Лено-Оленекском районе — 3—9 м, в Нижнеленском районе — до 25 м.

Кенгдейская алмазоносная пачка, относимая к ангардамтасскому комплексу, выделена на западном склоне Хараулахского антиклинория в бассейне р. Кенгдей и на уч. Ангардам-Тас кряжа Чекановского в бассейне р. Кенгдей-Юряге геологами НПО «Аэрогеология» и была отнесена к ладинскому ярусу [Егоров и др., 1987; Березнер и др., 2016]. Были обозначены два продуктивных горизонта в триасе — ладинский и карнийский, однако фаунистически алмазоносная пачка ладина была охарактере-

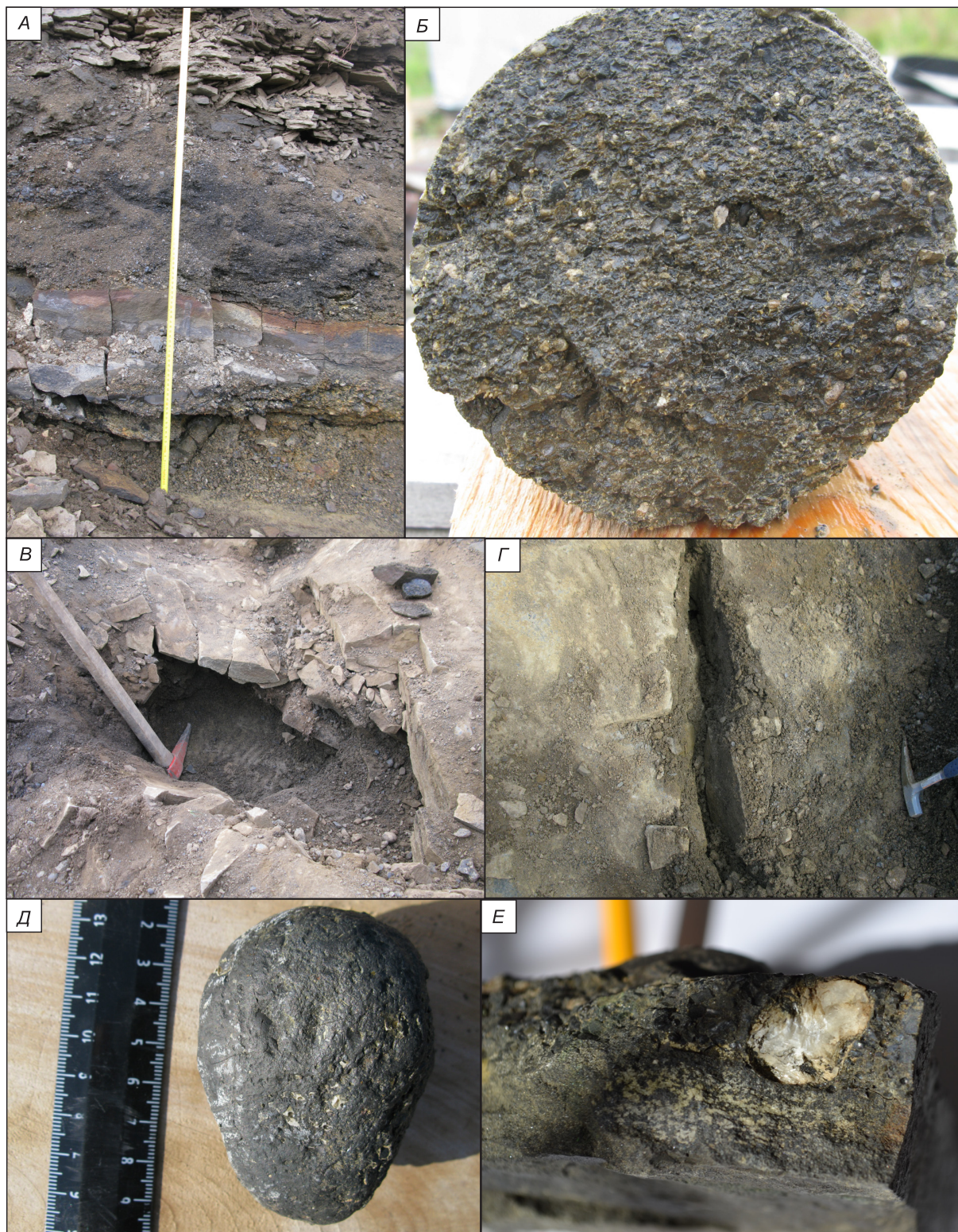


Рис. 4. Особенности строения булкурской пачки ангардамтасского комплекса в районе Булкурской антиклинали (см. канава БГ1 на рис. 3):

разрез булкурской пачки (А); ксенотуфы в скв. БГ1/2, диаметр керна 108 мм (Б); округлые вертикальные полости, заполненные туфами и ксенотуфами (В); трещины, залеченные туфогенным материалом (Г); вулканические бомбы (Д); миндалины кальцита 2,5 см (Е). Фото С.А. Граханова.

многочисленной карнийской фауной (см. рис. 2). Туфоалевропесчаники до настоящего времени не опробованы и не изучены, поэтому нельзя исключать их потенциальную алмазоносность.

При проходке канавы БГ1 в подстилающих породы ладинских песчаниках установлены вертикальные округлые полости. Когда в канаве была расчищена кровля ладинских песчаников, то сразу обособилась локальная структура «взрывного» характера с пластами, задранными от ее центра, и интенсивной концентрической трещиноватостью (см. рис. 4, В). Вся полость была выполнена пелитовыми туфами — псефитовыми ксенотуфами. При этом заполнение наблюдалось и в межпластовом пространстве ладинских песчаников. Кровля ладинских песчаников разбита серией тектонических трещин. Некоторые трещины «сухие», но чаще всего залечены туфовым материалом, аналогичным заполняющему вертикальную полость (см. рис. 4, Г). Видимого смещения по системе субширотных трещин не фиксируется. Наблюдаются следы гидротермальной деятельности. На плоскостях отдельных трещин видны кальцитовые щетки. Тектоническое смещение фиксируется по разлому, который проходит через «взрывную структуру». Заполняющий полость и трещины туфогенный материал характеризуется ураганскими концентрациями МИК и алмазов.

Продуктивный пласт булкурской пачки выделяется сложным составом и фациальной изменчивостью. Весьма изменчива и его мощность. По данным бурения Арктической горной компании, мощность варьирует от 0.1 до 1.4 м, в среднем составляя 0.5 м, а по данным горных работ, мощность варьирует от 0.2 до 2.2 м, в среднем 1.0 м (буровые и горные работы производились на разных участках).

В составе туфогенного материала булкурской пачки встречаются вулканические бомбы (см. рис. 4, Д) и миндалины кальцита (см. рис. 4, Е). По устному сообщению Т.Г. Шумиловой (ИГ КомиНЦ УрО РАН), изучавшей кальцит из миндалины, в них установлены кристаллы графита с включениями рутила и анатаза. Данные изотопного анализа углерода и кислорода карбонатов указывают на их аномально тяжелый состав $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}} \pm 1\sigma = 12.3\text{—}13.4$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}} \pm 1\sigma = 22.3\text{—}22.8$.

ВОЗРАСТ АНГАРДАМТАССКОГО ВУЛКАНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

В эксплозивно-обломочных и осадочно-вулканокластических породах ангардамтасского комплекса находки фауны редки [Егоров и др., 1987; Константинов и др., 2007]. Обильная карнийская фауна установлена в прибрежно-морских туфоконгломератах м. Тумул [Граханов и др., 2009].

Из туфогенного основания ангардамтасского комплекса были сделаны определения абсолютного возраста [Граханов, Смелов, 2011; Граханов и др., 2015б]. Возраст определялся как кимберлитовых, так и детритовых цирконов (первые отличаются более крупными размерами и изометричными формами). Все кимберлитовые цирконы дали мезозойский возраст, причем обозначились две фазы: среднетриасовая—ладинская и верхнетриасовая—карнийская, а возраст гальки (ксенолитов) раннесреднетриасовый (см. табл. 1, доп. мат-лы, <https://sibran.ru/upload/medialibrary/20e/20e80e3a9b84636510d90ac20d602d9f.pdf>), что хорошо согласуется с раннемезозойским этапом проявления кимберлитового вулканизма на северо-востоке Сибирской платформы [Брахфогель, 1984], свидетельствует об унаследованности более молодых мезозойских и кайнозойских россыпей и подтверждает ранее полученные данные возраста прогнозируемого коренного источника четвертичных промышленных россыпей [Дэвис и др., 1980; Агашев и др., 2004].

Из проб алмазоносных гравелитов с левобережья р. Булкур U-Pb изотопным датированием цирконов получен возраст в интервале 234—236 млн лет [Летникова и др., 2013]. Дополнительные данные U-Pb датирования 116 мегакристов цирконов подтверждают их триасовый возраст в интервале 247—202 млн лет, соответствующий возрасту внедрения триасовых кимберлитов [Skuzovatov et al., 2021].

Новейшие данные по U-Pb датированию цирконов, полученные в результате совместных исследований с Университетом Маккуори (Австралия) мегакристаллов циркона ($n = 48$) из аллювия рч. Холломолох (приток р. Эбелях), были обработаны с использованием генетических классификационных схем [Belousova et al., 2002]. В результате сделан вывод, что 32 циркона генетически связаны с карбонатитами, а 16 образцов — с кимберлитами [Мальковец и др., 2021]. Таким образом, алмазы из россыпей Эбеляха, вероятнее всего, имеют полигенные коренные источники и могут быть связаны, учитывая палеозойский возраст алмаза V разновидности (334 ± 64 млн лет), определенным U-Pb методом по рутилу [Афанасьев и др., 2009], с полихронным и многоэтапным среднепалеозойским и мезозойским кимберлитовым и щелочно-ультраосновным магматизмом [Griffin et al., 1994; Agashev et al., 2008; Malkovets et al., 2016; Sun et al., 2018; Logvinova et al., 2019a,b; Schmitt et al., 2019; Мальковец и др., 2021].

ПЕТРОГРАФИЯ И ГЕОХИМИЯ ПОРОД АНГАРДАМТАССКОГО КОМПЛЕКСА

Проведенные петрографические исследования пород ангардамтасского комплекса позволяют отнести их к эксплозивно-обломочным (туфам, ксенотуфам) и осадочно-вулканокластическим (туффитам) образованиям. Основные петрографические и петрогеохимические описания продуктивных пород

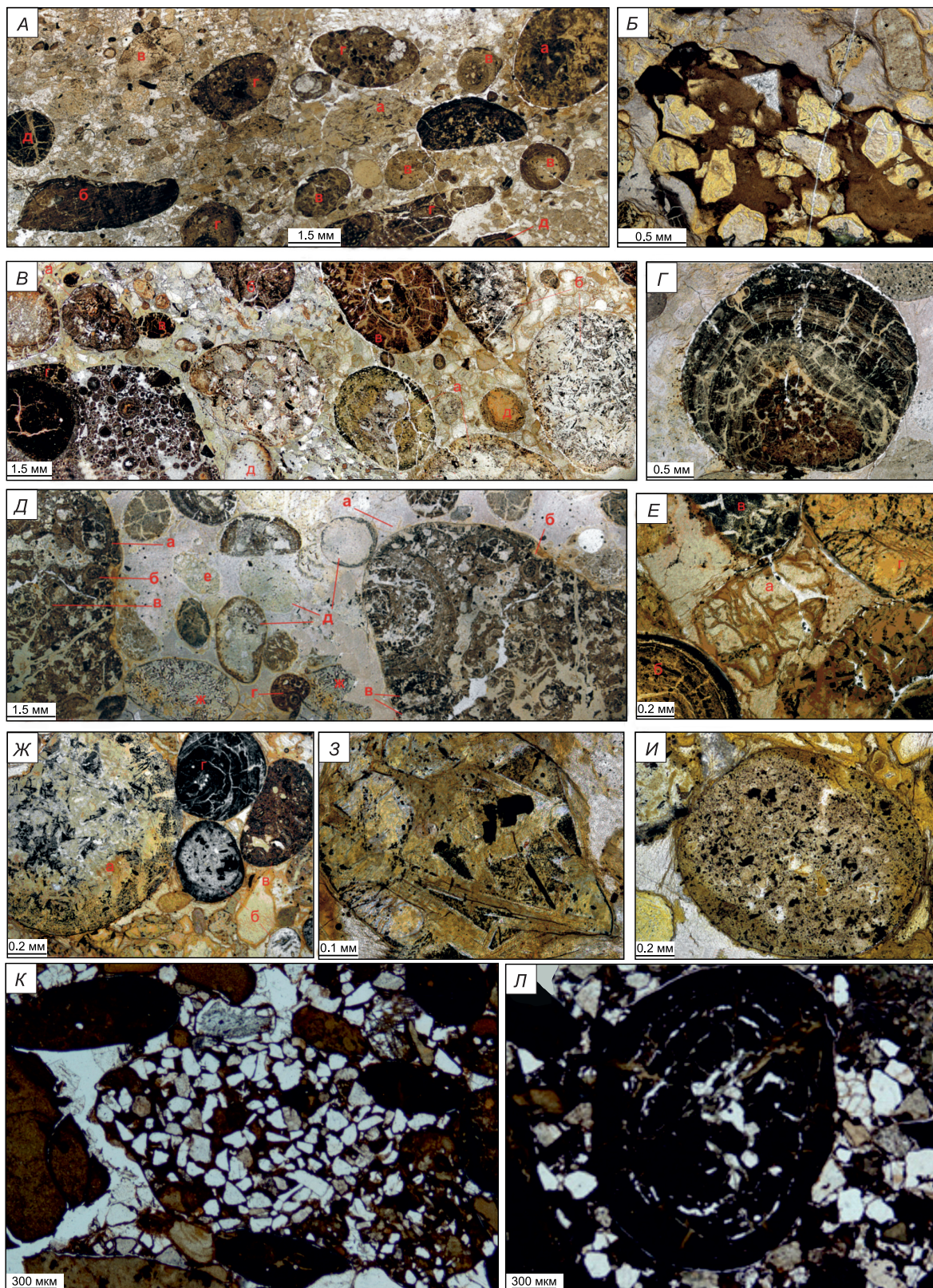


Рис. 5. Микрофотографии (б/ан) интенсивно измененных мелколапиллиевых туфов р. Улахан-Юрях, руч. Тас-Крест-Юряге [Проскурнин и др., 2012] и лапиллиевых туффитов с уч. Булкур [Граханов и др., 2010б] ангардамтасского комплекса.

А — преобразованный литовитрокластический туф «флюидальный», в котором наблюдаются округлые литокласты измененных магматических пород основного, возможно, ультраосновного состава (*а*), вулканического шлака (*б*), девитрифицированного вулканического стекла, измененного от периферии к центру (*в*), округлые литокласты со структурами типа автолитовых брек-

чий (г), округлые витрокласты, замещенные рудным материалом, иногда зонально (д), лапилли сцементированы близким по литологическому составу материалом псаммитоалевритовой размерности, шл. 19031/1, р. Улахан-Юрях; Б — преобразованный литовитрокластический туф, сложенный округлыми литокластами, псевдоморфно-замещенными септехлорит-септешамозитовым агрегатом: с зональным замещением по периферии (а), с реликтовыми структурами типа гиалопилитовой (б), зональными с массивным ядром и радиально-лучистым по периферии (в), со структурами типа автолитовых брекчий (г), шл. 19052/5, руч. Тас-Крест-Юряге; В — мелколапиллиевый туф, обогащенный крупнообломочным резургентным материалом типа агллотината (а), который сам содержит обломки со структурами автолитовых брекчий (б) и округлыми литокластами основного, возможно, ультраосновного состава (в), обломками шлаковидной породы (г), девитрифицированного вулканического стекла (д), в том числе с порфиоровой (за счет замещенного оливина?) структурой (е), округлыми обломками с реликтовыми витрокластическими и келифитовыми структурами (ж), шл. 19026, р. Улахан-Юрях; Г — обломок кластолавы размером 1.5 см, шл. 19029, р. Улахан-Юрях; Д — деформированный лапилль зонального строения, сложенный концентрическими зонами септехлоритового агрегата, в различной степени обогащенного тонкодисперсными лейкоксеном, гетитом, маггемитом, шл. 19031/1, р. Улахан-Юрях; Е—И — измененные лито- и витрокласты в лапиллиевом туфе, шл. 19027/3, р. Улахан-Юрях; Е — агрегатные псевдоморфозы септехлорита, септешамозита по деформированному фенокристаллу, видимо, оливина (а), фрагмент зональной лапилли (б), измененные литокласты (в, г); Ж — лапилли измененной магматической породы основного, возможно, ультраосновного состава (а), девитрифицированного вулканического стекла с включениями лейкоксенизированного ильменита (б), шлаковидной породы с мелкими фенокритами, возможно, оливина (в), зональные, замещенные несимметрично рудным материалом (г); З — фрагмент лапилля магнетит-септехлоритового состава, агрегатные псевдоморфозы которого отражают реликтовую структуру и морфологию оливин-мелилитовой породы; И — сферический обломок раскристаллизованного вулканического стекла с изменениями по периферии; К — туффит с аккреционными лапиллями сферической формы и остроугольными обломками кварца и полевых шпатов (шлиф, николи ||); Л — внутренняя структура лапиллей в туффитах с ретрокритами кварца и псевдоморфозами шамозита по округлому минералу (полированный шлиф, при косом освещении).

ангардамтасского комплекса выполнены А.П. Смеловым в ИГАБМ СО РАН; К.Н. Егоровым в ИЗК СО РАН; Н.П. Виноградовой и М.В. Наумовым в ВСЕГЕИ; Е.Ф. Летниковой в ИГМ СО РАН; Ю.Ю. Голубевой в ЦНИГРИ и ранее частично опубликованы [Граханов и др., 2010б; Проскурнин и др., 2012; Летникова и др., 2013; и др.].

В результате петрографического изучения разрезов вулканогенных обломочных и осадочно-вулканокластических пород кенгдейской и булкурской пачек (см. рис. 1) было установлено, что на хр. Туора-Сис, бассейн р. Улахан-Алджархай, правый приток р. Лена (см. рис. 1, разрез 9), в основании булкурской пачки залегают туффиты с кальцит-хлоритовым цементом, пирокластический материал представлен лапиллями андезибазальтового состава (?) с реликтово-афанитовой структурой. В булкурской пачке на р. Хатыстаах, левый приток р. Лена (разрезы 4, 10), и в кенгдейской пачке участков Ангардам-Тас кряжа Чекановского и Ольховый Западного Верхоянья (разрезы 1, 2) описаны мелколапиллиевые среднекрупнообломочные и псефитовые туфы на стекловатом филлосиликатном цементе с большими размерами лапиллиевых обособлений (1—6 мм) и присутствием трещиноватых зерен пиропов неправильно-изометричной формы (трещины залечены агрегатно-зеленым хлоритом и мелкозернистым кальцитом). На мысе Улахан-Крест, что в Оленекском заливе моря Лаптевых (см. рис. 1, разрез 5), в основании карния залегают туффиты и пирокластический материал представлен лапиллями андезибазальтового (?) состава. На мысе Тумул (дельта р. Оленек, разрез 6) продуктивное основание осипайской свиты сложено конгломератами с органогенным детритом на кальцитовом цементе с реликтами пирокластического материала [Граханов и др., 2009]. На кряже Прончищева, в верховьях р. Урасалаах (см. рис. 1, т. н. 7) основание карнийского яруса представлено лапиллиевыми туффитами основного (?) состава на кальцит-хлорит-цеолитовом цементе. На мысе Цветкова (разрез 8) в основании карнийского яруса выходят конгломераты песчаников полевошпатово-кварцевых разнозернистых на глинисто-кальцитовом цементе, с сульфидной минерализацией и массой органогенного детрита.

Среди вулканогенных эксплозивно-обломочных и осадочно-вулканокластических пород ангардамтасского комплекса, а также вулканогенно-осадочных отложений осипайской свиты выделены псаммитоалевритовые, лапиллиевые туфы, ксенотуфы (содержат до 50 об. % эксплозивных ксенокластов), туффиты (с примесью до 50 % осадочного материала), туфоконгломераты, туфопесчаники, туфоалевролиты. Туфы, ксенотуфы, туффиты (рис. 5) изучены наиболее детально, поскольку являются продуктивным горизонтом алмазов ангардамтасского комплекса.

Характерной особенностью туфов изученных участков являются измененные зональные лапилли, составляющие до 5—20 % объема туфов и близкие подобным образованиям (по М.В. Наумову, ВСЕГЕИ), описанным для диатремовых фаций кимберлитов Лесото [Mitchell, 1997]. По мнению А.П. Смелова (устное сообщение), текстурно-структурные особенности туфов с западной части Булкурской антиклинали аналогичны лапиллиевым туфам лампроитов тр. Аргайл.

Вследствие интенсивного изменения тонкодисперсного вулканокластического материала первичные силикаты вулканогенного протолита псевдоморфно замещены смесью вторичных филлосиликатов, в которой, согласно данным рентгеноструктурного анализа [Проскурнин др., 2012], преобладают септешамозиты (преимущественно бертьерин), септехлориты (ферриамезит) и клинохлор с примесью кли-

нохризотила, нонтронита, бемита, вермикулита. Рудные минералы разложены с образованием агрегатов лейкоксена, ильменита, анатаза, гетита, маггемита, гематита, марказита. На западном склоне Булкурской антиклинали было установлено [Граханов и др., 2010б], что основная масса лапиллей сложена агрегатом тонкокристаллического шамозита. В последнем установлены реликты таких минералов, как высокоглиноземистый ромбический пироксен, а также ограненные зерна хромшпинелида, сростки рутила и пикроильменита. В подчиненном количестве присутствуют глауконит, анальцим, гидрогетит, кальцит, возможны псевдоморфозы иллита по калиевому полевоому шпату.

Петрогеохимические особенности лапиллиевых туфов, ксенотуфов и туффитов рассмотрены ранее для районов Булкурской антиклинали [Граханов и др., 2010б; Летникова и др., 2013] и хр. Ангардам-Тас [Проскурнин и др., 2012]. Химический состав лапиллиевых туфов характеризуется резко повышенными содержаниями алюминия и железа и низкими — магния, кальция. По сравнению с типичными песчаниками туфы, ксенотуфы и туффиты ангардамтасского комплекса имеют повышенные содержания сидерофильных (Cr, Fe), высокие — халькофильных (Cu, Zn, Sb) элементов и обеднены литофилами (Y, REE, Nb, Ta, Rb, Th, U). Кроме того, они характеризуются аномально высокими содержаниями Sr, Ba, As, Li. Пониженные содержания Ni, Co в туфах обусловлены, видимо, полным разложением в них оливина и выносом этих элементов совместно с магнием. Низкие содержания MgO, CaO связываются с формированием вулканических пород в подводных условиях, тотальным выносом этих оксидов и замещением водными филлосиликатами с обогащением пород железом и глиноземом. Петрогеохимическая специфика вулканических пород ангардамтасского комплекса, отсутствие значимых признаков переноса как алмазов, так и индикаторных минералов (пирропа, пикроильменита, магнезиохромита) кимберлитов позволяют косвенно оценить состав гипотетического вулканического источника как умеренно щелочной базит-ультрабазитовый, возможно, кимберлитовый [Граханов и др., 2010б; Проскурнин и др., 2012; Государственная..., 2014]. Присутствие в обломках гравелитоподобных пород сильно измененных ультраосновных пород с флогопитом и парагенезисом калиевого полевого шпата, клинопироксена, биотита и хромита при полном отсутствии плагиоклаза дало основание [Летникова и др., 2013] связать источник рассматриваемой вулканической деятельности с трахитами лампроитовой серии. Безусловно, определение первичного состава алмазоносных магматитов требует дополнительного сбора фактического материала и продолжения исследований.

МИНЕРАЛОГИЯ ВУЛКАНОГЕННЫХ ПОРОД АНГАРДАМТАССКОГО КОМПЛЕКСА

Минералогия алмазоносных пачек ангардамтасского комплекса имеет большое сходство. В составе легкой фракции осадочно-вулканогенных пород основания кенгдейской пачки кряжа Чекановский (см. рис. 1, разрез 2) преобладают гидрослюда, хлорит и вулканическое стекло, отдельные прослои содержат значительное количество карбоната. Содержание плагиоклаза варьирует от 0.0 до 7.0 %, а кварц в породе практически отсутствует. В аналогичных по возрасту туфогенно-осадочных образованиях Западного Верхоянья хлорит и гидрослюда отсутствуют, а доминирует кварц (48.3 %) при значительной доле карбоната. В составе тяжелой минеральной фракции основания кенгдейской пачки уч. Ольховый (разрез 1) много лимонита, в меньшей доле присутствует ильменит и магнетит, в большем количестве встречаются пироп, пикроильменит и хромшпинелид.

В качестве главных минералов-индикаторов кимберлитов в настоящей работе рассматриваются пироп, пикроильменит и хромшпинелид.

Если пироп и Mg-Fe-Са гранаты полностью рассматриваются как связанные с кимберлитом и глубинными метаморфическими породами [Соболев, 1964; Тычков и др., 2018], то пикроильмениты и в особенности хромшпинелиды могут быть преимущественно связаны и с другими источниками [Соболев и др., 1975, 2009, 2013а, 2018; Шамшина, 1986; Шпунт, Шамшина, 1989; Николенко и др., 2018]. Для разбраковки хромшпинелидов требуется дополнительное изучение содержания примесных элементов, преимущественно Ni и Zn [Griffin et al., 1993].

В основании кенгдейской пачки содержится вся гамма минералов-индикаторов кимберлитов. При этом их концентрации в Западном Верхоянье на два порядка выше, чем на кряже Чекановский. Если на уч. Ольховый содержание пирропа и пикроильменита в пробе объемом 20 л превышает тысячи знаков, то в бассейне Кенгдей-Юряге (см. рис. 1) в этом же объеме содержание этих минералов не достигает десяти знаков. Содержание хромшпинелидов в Западном Верхоянье также в десять раз выше. Среди минералов-индикаторов кимберлитов более окатаны индивиды кряжа Чекановский, для пирропов этих участков также характерно более высокое содержание лиловых разностей и очень мало оранжевых — эклогитовых парагенезисов, неустойчивых при транспортировке.

Детальное изучение минералов-индикаторов кимберлитов из основания кенгдейской пачки Западного Верхоянья позволило сделать вывод о близком положении подводящих кимберлитовых каналов. Основанием для этого послужило постоянное присутствие знаковых содержаний хромдиопсидов

на всем протяжении выходов кенгдейской пачки; слабая сортировка МИК; включения в гранатах и клинопироксенах; реликты келифитовых кайм на пиропе и реакционные каймы на пикроильмените; трещиноватые зерна пиропов с келифитовыми замещениями по трещинам; сростки минералов и присутствие агрегатных пикроильменитов [Селиванова, 1991].

В составе минералов тяжелой и легкой фракций алмазоносной булкурской пачки наиболее распространенным является хлорит, его доля по отдельным пробам достигает 90—99 %. Среднее содержание хлорита по участкам Булкур, Хатыстах, Улахан-Алджархай и др. (см. рис. 1, разрезы 3—5, 9—11) превышает 50 %. Естественно, что в разрезах, где преобладает осадочная компонента, доля хлорита мала — на уч. Тумул (разрез 6), на м. Цветкова (разрез 8) он отсутствует, а на переходном к осадочным породам разрезе уч. Урасалаах (разрез 7) его доля существенно уменьшается. В свою очередь, в этих разрезах основными минералами тяжелой фракции являются лимонит, пирит и магнетит. Для туфов и туффитов характерно повышенное содержание титановых минералов — рутила, анатаза и лейкоксена. Так, на уч. Булкур (см. рис. 1, т. н. БГ1) сумма этих минералов превышает 50 %.

Были отобраны и изучены литологические пробы из основных разрезов вулканогенно-осадочных пород основания карнийского яруса, включая подстилающие и перекрывающие отложения по опорным разрезам от хр. Туора-Сис до м. Цветкова (Таймыр). Результаты анализов показали, что вулканыты четко отличаются от осадочных пород по содержанию кварца, хлорита, гидрослюд, плагиоклаза, карбонатов (рис. 6), тем самым разделяясь на туфы, туффиты, туфогравелиты, осадочные гравелиты и конгломераты, содержащие небольшую примесь туфогенного материала и без нее.

По площади яркими признаками неперемещенных и неперетолженных туфогенных пород выделяется Булкурская антиклиналь, где в породах минимальна примесь кварца и максимальные концентрации гидрослюд, хлорита и вулканического стекла. Небезынтересно отметить, что в туфах и туффитах Булкурской антиклинали довольно редка фауна, которая изобилует в типично прибрежно-морских разрезах (мысы Тумул и Цветкова, см. рис. 1). В этих разрезах резко возрастает доля кварца или карбоната.

Минеральный состав тяжелой фракции туфогенных пород основания булкурской пачки является уникальным по содержанию, широкому спектру цветовых разновидностей пиропов, а также содержанию хромшпинелидов, пикроильменита и рутила. В составе тяжелой фракции туфов доминируют минералы-индикаторы кимберлитов, их содержание превышает половину веса тяжелой фракции. Среди них господствует пироп, в меньшей доле фиксируются хромшпинелид и пикроильменит. В составе тяжелой фракции необычно высока доля рутила, анатаза и лейкоксена, содержание которых имеет прямую корреляционную связь с концентрациями пиропов и алмазосностью отложений.

Максимальные концентрации пиропов отмечаются в туфах и туффитах Булкурской антиклинали (уч. Булкур: БГ1 — 23.1 тыс. зн./20 л, ПГ2 — 23.7 тыс. зн./20 л; Таас-Ары: 5028 — 31.6 тыс. зн./20 л; Улахан-Алджархай: 5007 — 22.9 тыс. зн./20 л) и в туффитах кряжа Прончищева, где в одной пробе эта цифра достигла 39.0 тыс. зн./20 л. По своим типоморфным особенностям пиропы из туфов и туффитов Булкурской антиклинали приближаются к таковым из коренных источников (табл. 2, см. доп. материалы) [Афанасьев и др., 1986, 2008].

Среди пиропов присутствуют зерна всех цветовых разновидностей. Максимальные содержания оранжевых пиропов отмечены в туфах Булкурской антиклинали (рис. 7, А). В туфогенных породах, где начинает появляться и доминировать осадочная компонента, доля оранжевых индивидов заметно падает. Оранжевые пиропы являются самыми неустойчивыми в условиях гипергенеза, их доля заметно сокращается в зависимости от удаленности коренного источника, а число высокохромистых красно-фиолетовых разновидностей растет. В этом случае опять выделился Оленекский залив, где преимущественно развиты осадочные и туфогенно-осадочные породы (см. рис. 1, разрезы 5, 6). Установлена четкая закономерность уменьшения износа пиропов с востока на запад и с запада на восток к Булкурской антиклинали (см. рис. 7, Б). В туфах западного склона Булкурской антиклинали пиропы не окатаны, на части зерен фиксируются келифитовые и хлоритовые каймы.

Содержание пиропов алмазной ассоциации дунит-гарцбургитового парагенезиса постоянное, но невысокое и редко превышает 1—2 % (табл. 3, см. доп. материалы) [Соболев и др., 1969; Соболев, 1971; Sobolev et al., 1973]. В северной части западного склона Булкурской антиклинали, где установлены алмазоносные туфы в основании карнийского яруса, отмечаются максимальные содержания эклогитовых гранатов (см. рис. 1, разрез 3). Среди них значительная доля (12.5 %) гранатов эклогитового парагенезиса с примесью MnO > 0.5 мас. %, что характерно для высокоалмазоносных пород [Соболев и др., 2013а].

Распределение пикроильменита и хромшпинелида в вулканогенно-осадочных породах осипайской свиты крайне неравномерное, причем содержание первого в ряде разрезов составляет единичные знаки, а второго в пробе объемом 20 л превышает тысячи знаков [Граханов и др., 2010б], что убедительно подчеркивает примесь из других источников [Шпунт, Шамшина, 1989; Николенко и др., 2018].

Максимальные концентрации пикроильменита тяготеют к западному склону Булкурской антиклинали, причем крайне неравномерно. Например, на участке Булкур в т. н. БГ1 (см. рис. 1) пикро-

уч. Булкур, скв. БГ1/1

№ пробы	Порода, возраст	Содержание, %						хлорит+вулк. ст.		
		кварц		гидрослюда		карбонат				
		10	20	30	40	50	60	70	80	90
БГ 1/1-1	T ₃ k	48.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.7	
БГ 1/1-3	T ₃ k	0.0	3.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	92.0	
БГ 1/1-6	T ₃ l	38.4	0.0	0.0	0.0	0.0	31.3	0.0	1.2	

уч. Булкур, скв. БГ1/2

№ пробы	Порода, возраст	Содержание, %						хлорит+вулк. ст.		
		кварц		гидрослюда		карбонат				
		10	20	30	40	50	60	70	80	90
БГ 1/2-1	T ₃ k	59.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
БГ 1/2-3	T ₃ k	0.9	3.6	0.0	0.0	0.0	2.0	0.0	69.6	
БГ 1/2-5	T ₃ l	75.6	0.0	0.0	0.0	0.0	6.8	0.0	0.6	

уч. Булкур, скв. БГ1/3

№ пробы	Порода, возраст	Содержание, %						хлорит+вулк. ст.		
		кварц		гидрослюда		карбонат				
		10	20	30	40	50	60	70	80	90
БГ 1/3-1	T ₃ k	72.3	0.0	0.0	0.0	0.0	7.2	0.0	1.2	
БГ 1/3-2	T ₃ k	4.0	14.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	73.9	
БГ 1/3-4	T ₃ l	54.5	0.0	0.0	0.0	0.0	9.1	0.0	0.0	

уч. Булкур, скв. БГ1/4

№ пробы	Порода, возраст	Содержание, %						хлорит+вулк. ст.		
		кварц		гидрослюда		карбонат				
		10	20	30	40	50	60	70	80	90
БГ 1/4-2	T ₃ k	55.1	0.0	0.0	0.0	0.0	2.2	0.0	0.0	
БГ 1/4-3	T ₃ k	48.4	0.0	0.0	0.0	0.0	34.2	0.0	0.6	
БГ 1/4-4	T ₃ l	63.1	0.0	0.0	0.0	0.0	16.7	0.0	0.0	



Рис. 6. Содержание минералов легкой фракции в туфогенно-осадочных породах основания булкурской пачки (см. рис. 1, разрез 4).

1 — содержание минералов, %; 2 — туфы, 3 — песчаники, 4 — алевролиты; 5 — ракушники.

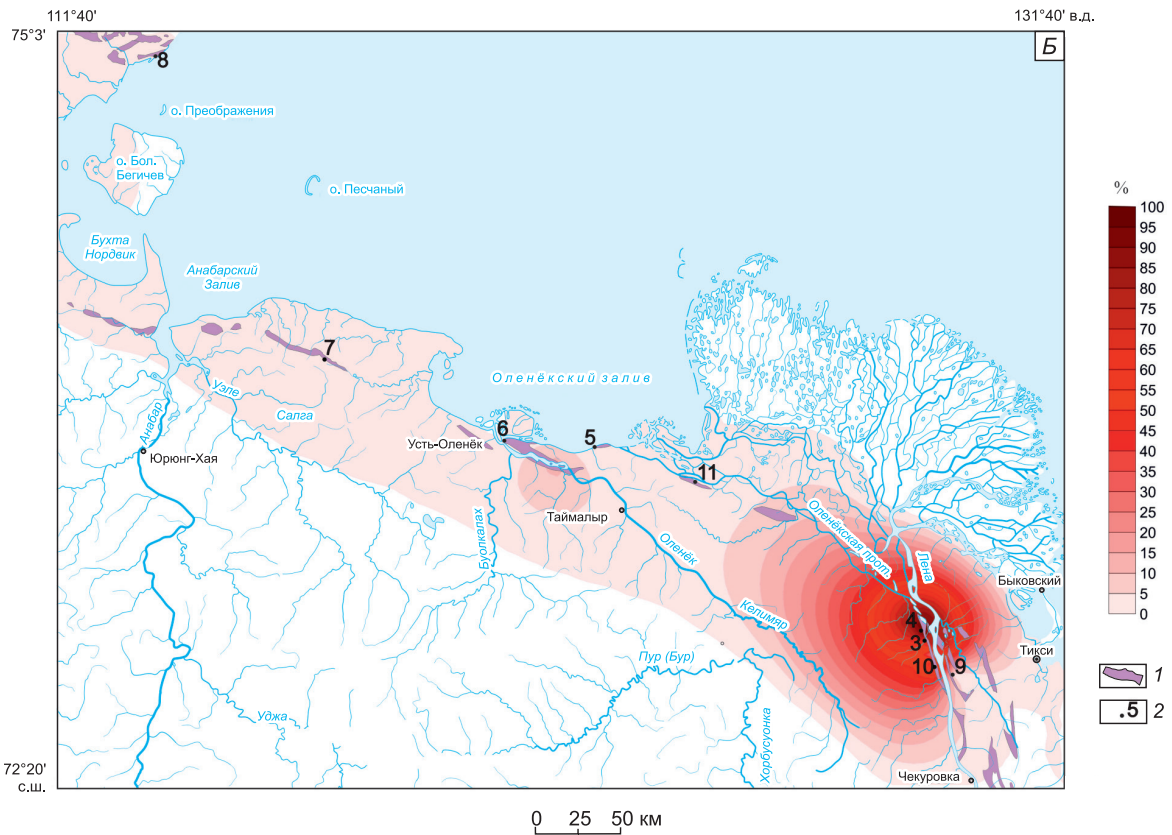


Рис. 7. Пиропы класса $-2...+1$ мм из основания булкурской пачки западного крыла Булкурской антиклинали (фото А.О. Зарукина) (А); содержание (%) неокатанных (I + II классов) зерен пиропов в вулканогенно-осадочных породах булкурской пачки ангардамтасского комплекса (Б).

1 — выходы пород булкурской пачки на уровень современного среза; 2 — изученные разрезы (см. рис. 1).

ильменит практически отсутствует, тогда как в т. н. ПГ2, расположенной в 8 км, его концентрации достигают нескольких сотен знаков в пробе объемом 20 л. Ураганские концентрации хромшпинелида типичны для кряжа Прончищева и Булкурской антиклинали, где содержание этого минерала в шлиховой пробе превышает тысячи знаков. Зерна пикроильменита и хромшпинелида из туфов Булкурской антиклинали не изношены. На многих зернах фиксируются примазки лейкоксена и анатаза.

В целом, подводя итог по характеристике МИК, можно сказать, что минеральный состав тяжелой фракции туфов на северном фланге западного крыла Булкурской антиклинали уникален по ураганному содержанию пиропов и хромшпинелидов с полным отсутствием каких-либо следов механического износа или гипергенного растворения. Концентрация пиропов и хромшпинелидов достигает в изученных пробах 50 % и более от общего веса минералов тяжелой фракции породы (табл. 4, см. доп. материалы).

Пироп встречается в тяжелой фракции туфов во всех классах крупности, повышенное количество характерно для класса +0.50 и +0.25 мм, такое распределение типично и для кимберлитов. Он представлен преимущественно обломками и осколками трещиноватых зерен с поверхностями протосколов, на которых отмечается тончайший микрорельеф магматического растворения. Следов гипергенных преобразований (кубоидного и дислокационного типа растворения) на поверхности зерен пироба не наблюдается. На единичных зернах отмечаются фрагменты келифитовых кайм травяно-зеленого цвета, эмалевидного блестящего облика [Селиванова, 1991; Граханов и др., 2010б].

Пиропы характеризуются полным спектром цветовых разновидностей: от желтых, оранжевых до темно-фиолетовых разновидностей. Причем содержания гранатов предположительно эклогитового парагенезиса желтой и оранжевой окраски в туфах могут достигать 30—35 % от общей массы гранатов.

Среди хромшпинелидов размером от 0.2 до 1.5—2.0 мм встречены следующие морфологические разновидности: 1 — плоскогранные, остросеребряные октаэдры; 2 — мириоэдрические кристаллы, оформленные многочисленными вичинальными гранями, придающими кристаллу округлую форму; 3 — кристаллы переходного типа октаэдр-мириоэдр и 4 — обломки и осколки неправильной и неопределенной формы. На поверхности отдельных кристаллов отмечаются признаки магматической коррозии, некоторая часть хромшпинелидов имеет гладкую блестящую поверхность. Хромшпинелидов со следами гипергенной трещиноватости или механического износа не наблюдается.

Обобщая опубликованные материалы по алмазным месторождениям мира, еще в конце тридцатых годов XX века В.С. Соболев привел краткую, но вместе с тем исчерпывающую характеристику пироба. Он писал: «Особенный интерес представляет красный магнезиальный гранат-пироп (с содержанием около 30 % алмандиновой молекулы и до 5 % Cr_2O_3), являющийся типичным спутником алмаза как в кимберлитах, так и в россыпях». Эта характеристика пироба, прямо указывающая на его особую роль типичного спутника алмаза [Wagner, 1914; Williams, 1932], опубликована [Соболев, 1951] за три года до открытия якутских кимберлитов в книге, изданной Госгеолиздатом, содержащей основную часть специального отчета, хранящегося в фондах ВСЕГЕИ с 1941 г. Комментируя многолетние усилия геологов по поискам алмазных месторождений на Сибирской платформе по методике, использованной при поисках россыпей алмаза на Урале, В.С. Соболев писал: «Настоящий успех был достигнут тогда, когда обратились к старому классическому приему, распознав типичные спутники — кимберлитовые пиропы. И по гранатовой дорожке подошли (Н.Н. Сарсадских, Л.А. Попугаева) к первой якутской трубке, которой дали поэтическое название «Зарница» [Соболев, 1979].

Составы пиропов из различных опробованных участков по соотношению содержания примесей CaO и Cr_2O_3 [Соболев, 1971; Sobolev, 1977] показаны на рисунках 8 и 9. Преобладающее количество анализированных зерен концентрируется в области лерцолитового парагенезиса (L). Минимальное количество зерен находится в области гарцбургит-дунитового парагенезиса — от 2 до 3 % от общего количества зерен пироба. Только в одном случае (см. рис. 8, пр. ПГ13) в эту область не попало ни одно зерно. Заметим, что в пробе исключительно малого объема на м. Цветкова ранее было отмечено типичное зерно пироба «алмазной ассоциации» [Граханов, Ядренкин, 2007].

Кроме пиропов в анализированных образцах присутствуют Mg-Fe гранаты с переменной примесью Ca, в основном в количестве нескольких зерен в каждой пробе. Исключением является только одна проба с уч. Булкур (см. рис. 9), где почти половина проанализированных зерен по соотношению Cr_2O_3 и CaO относится к эклогитам, эклогитоподобным породам и кристаллическим сланцам [Бобриевич, Соболев, 1957; Соболев, 1964]. В более молодых мезозойских и кайнозойских россыпях (кроме районов Кютюнгде и Молодо) также доминируют гранаты лерцолитового парагенезиса с минимальной примесью гарцбургит-дунитового (см. рис. 9).

Хромшпинелиды, как известно, входят в качестве акцессорной фазы в состав многих магматических пород, включая щелочные вулканические образования, в том числе кимберлиты, в которых хромшпинелиды характеризуются максимальным разнообразием состава [Соболев и др., 1975; Шамшина, 1986; Шпунт, Шамшина, 1989; Соболев, Логвинова, 2004; Симонов и др., 2016; Николенко и др., 2018]. В алмазах включения хромшпинелидов (магнезиохромитов) часто присутствуют в ассоциации с оливи-

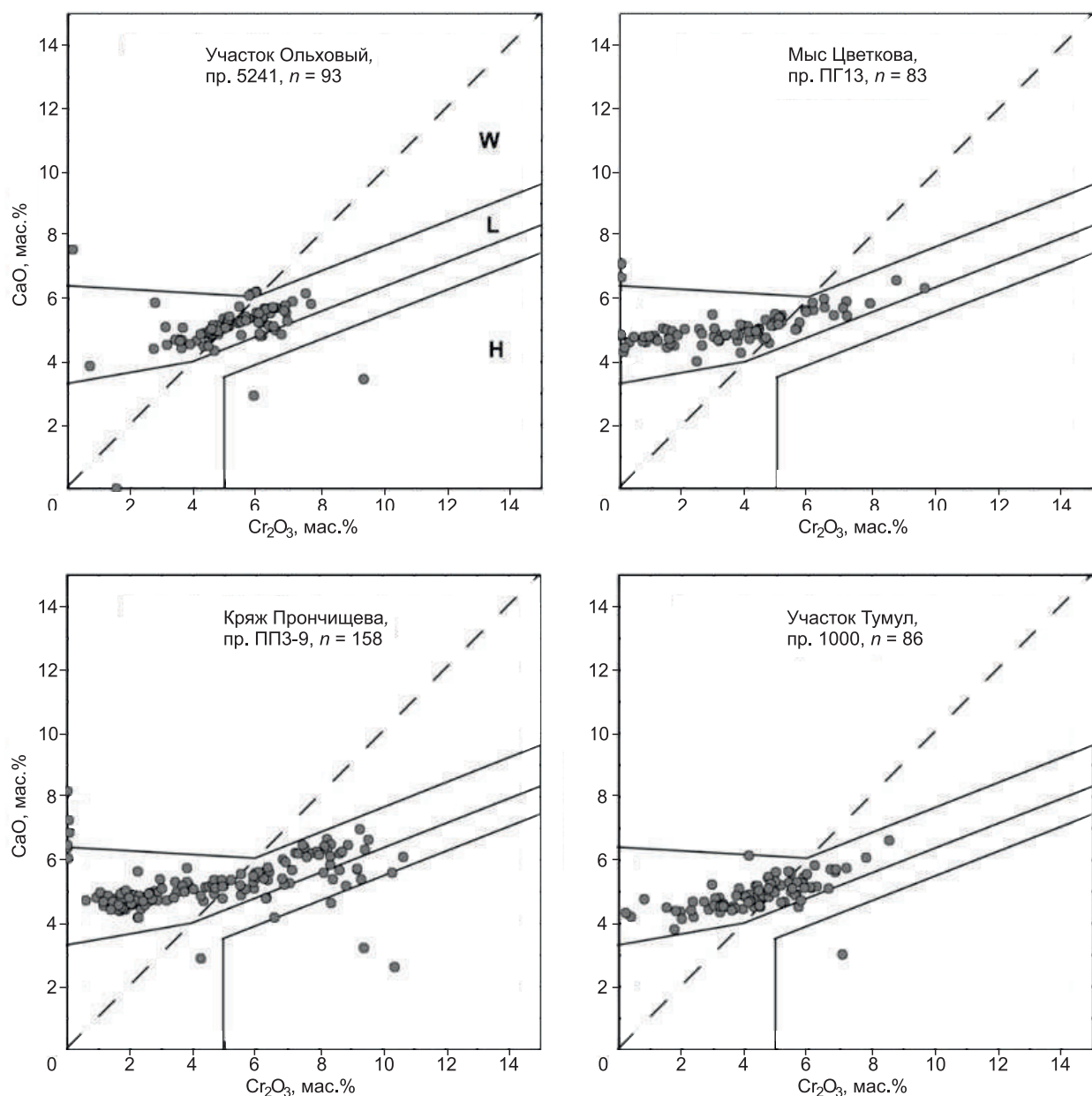


Рис. 8. Диаграммы [Соболев, 1971] соотношения CaO—Cr₂O₃ в составе пиропов из осадочно-вулканокластических пород ангардамтасского комплекса.

H — область гарцбургит-дунитового парагенезиса (пиропы «алмазной ассоциации»); L — область лерцолитового парагенезиса; W — область верлитового парагенезиса. Диагональ разделяет область вхождения CaO в уваровитовый компонент (слева от диагонали) и в кноррингитовый компонент MgCr (справа от диагонали). Аналитики Д.В. Кузьмин, Л.В. Усова.

ном (в виде сростков), содержащим более 90 % форстерита [Логвинова и др., 2021], а также в сростках с пиропом [Туркин, Соболев, 2009]. Исследования состава хромшпинелидов из алмазоносных отложений карнийского яруса, включающие изучение состава полифазных включений в них, в частности, высокие концентрации CaO в оливинах (0.2—0.8 мас. %), привели к выводу, что в качестве источника доминирующей разновидности хромшпинелидов предполагаются множественные трубки взрыва калиевых щелочных базитов, расположенных в районе Оленекского поднятия [Sobolev, 1977; Шпунт, Шамшина, 1989; Николенко и др., 2018], а также щелочно-ультраосновные породы Гулинского массива [Соболев и др., 2009; Васильев, Гора, 2012, 2014; Симонов и др., 2016].

Пикроильмениты, так же как и хромшпинелиды, встречаются в кимберлитах и других щелочно-ультраосновных породах [Шпунт, Шамшина, 1989]. Сопоставление анализов из двух проб, практически одинаковых по соотношению TiO₂, Cr₂O₃ и Al₂O₃ с кимберлитовыми пикроильменитами, содержащими

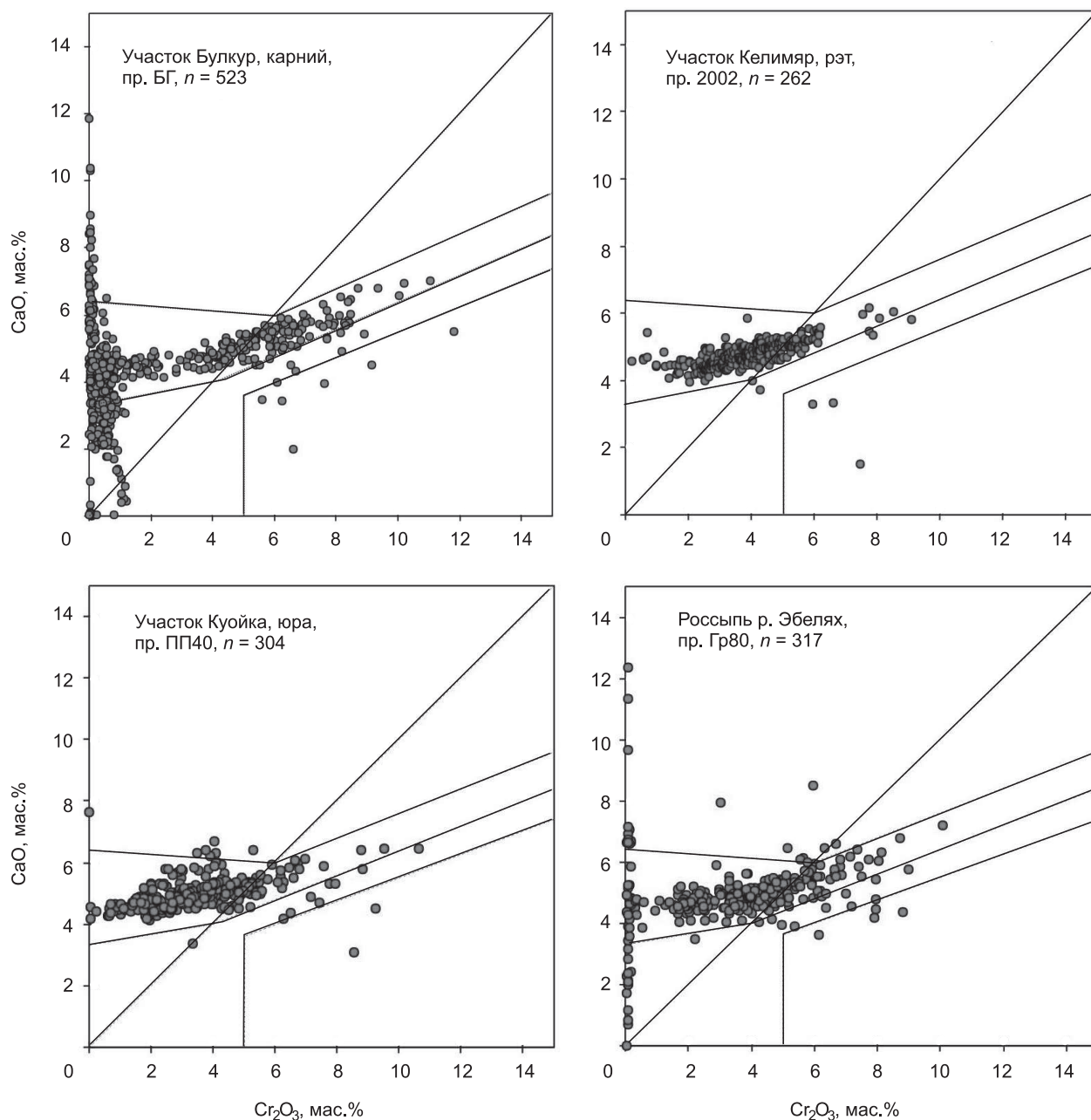


Рис. 9. Диаграммы [Соболев, 1971] соотношения $\text{CaO—Cr}_2\text{O}_3$ в составе пиропов из разновозрастных алмазонасных отложений северо-востока Сибирской платформы [Граханов, Смелов, 2013].

Усл. обозн. см. на рис. 8.

в абсолютном большинстве случаев от 6 до 10 мас. % MgO [Green, Sobolev, 1975; Sobolev, Yefimova, 2000], позволяет сделать заключение, что только существенно менее 50 % проанализированных пикроильменитов можно отнести к кимберлитовым (рис. 10).

АЛМАЗОНОСНОСТЬ ВУЛКАНОГЕННО-ОСАДОЧНЫХ ПОРОД АНГАРДАМТАССКОГО КОМПЛЕКСА

Алмазонасным являются основания кенгдейской и булкурской пачек, только первая характеризуется низкой и средней продуктивностью, а вторая — высокой и ураганной. Ранее, по данным НГО «Аэрогеология», на участке Ольховый (см. рис. 1, Западное Верхоянье, разрез 1) по одной пробе уровень алмазонасности достиг 0.40 кар/м^3 , а на краже Чекановского зафиксированы единичные находки кристаллов.

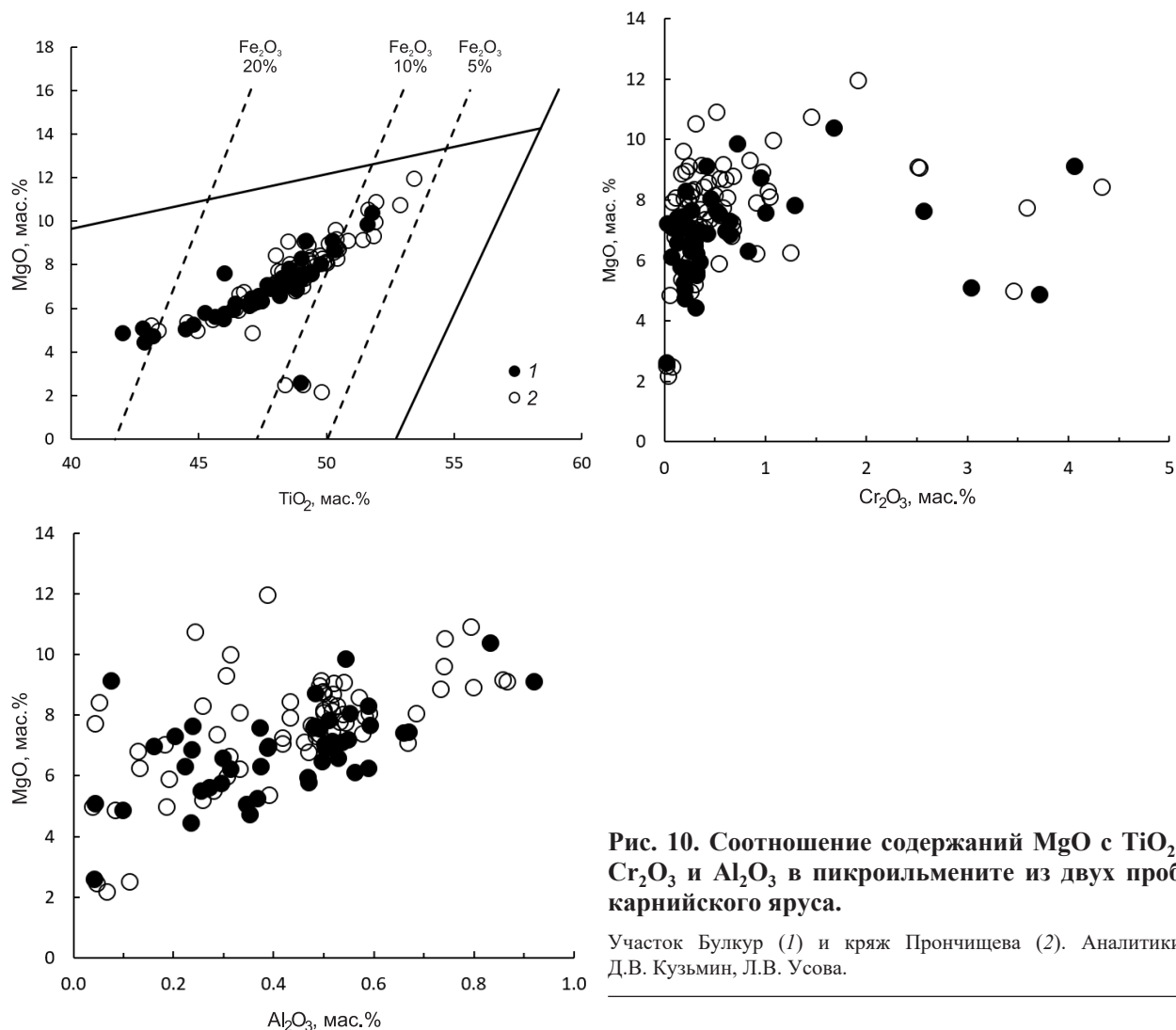


Рис. 10. Соотношение содержаний MgO с TiO_2 , Cr_2O_3 и Al_2O_3 в пикроильмените из двух проб карнийского яруса.

Участок Булкур (1) и кряж Прончищева (2). Аналитики Д.В. Кузьмин, Л.В. Усова.

Геологами ОАО «Нижнеленское» опробование базальных горизонтов кенгдейской пачки производилось в 2008—2013 гг. На кряже Чекановский общий объем опробования составил 6.5 м^3 в п.т., и при этом было извлечено 4 алмаза весом 362 мг, содержание по четырем пробам варьировало от 0.0 до 2.17 кар/м^3 , при среднем уровне 0.28 кар/м^3 . Высокое содержание по одной пробе было обусловлено тем, что в пробе небольшого объема был найден один кристалл высокого качества размерного класса $-8...+4 \text{ мм}$ и весом 304 мг.

На участке Ольховый в Западном Верхоянье общий объем опробования базального горизонта кенгдейской пачки составил 8.33 м^3 в п.т., при этом среднее содержание алмазов по представительной пробе (6.6 м^3) достигло 0.51 кар/м^3 . Проводя аналогию с базальными образованиями булкурской пачки, где содержание пиропов уверенно коррелируется с концентрациями алмазов, можно предположить, что в кенгдейских слоях Западного Верхоянья могут быть очень высокие концентрации алмазов, так как по этим параметрам они приближаются к высокоалмазоносным участкам Булкур, Хатыстаах, Улахан-Алджархай.

При характеристике алмазоносности булкурской пачки использованы данные ОАО «Нижнеленское», которое в 2006—2013 гг. проводило шлиховое, мелкообъемное и валовое опробование пород основания осипайской свиты. На 12 участках, которые трассируются от кряжа Прончищева до Западного Верхоянья, были отобраны сотни проб общим объемом 14.9 м^3 , из которых было извлечено 1326 алмазов, среднее содержание на опробованный объем составило 5.71 кар/м^3 при максимальных значениях алмазоносности 13.26 кар/м^3 . Наиболее представительные объемы опробования были выполнены на кряже Прончищева (см. рис. 1, разрез 7), м. Тумул (разрез 6), в бассейне р. Булкур (разрезы 3, 4). Ураганной алмазоносностью выделяются туфы западного крыла Булкурской антиклинали: 12.63 кар/м^3 (рис. 11, А), прибрежно-морские конгломераты м. Тумул, где в одной мелкообъемной пробе содержание



Рис. 11. Алмазы размерного класса $-4...+2$ и $-2...+1$ мм из туфов основания карнийского яруса западного склона Булкурской антиклинали, разрез 3 (А); образец конгломерата м. Тумул, разрез 6 с алмазом размером 3.2 мм (Б).

Фото С.А. Граханова.

алмазов достигло максимального уровня — 13.26 кар/м³. Высокая алмазоносность характерна для туфов бассейна р. Улахан-Алджархай (разрез 9), где максимальные значения по мелкообъемному опробованию составляют 9.31 кар/м³, при средних величинах 4.70 кар/м³. Пониженными параметрами продуктивности характеризуются туфы и туффиты кряжа Прончищева 0.22 кар/м³. Ураганная алмазоносность подчеркивается нередкими визуальными находками крупных алмазов в туфах и туфоконгломератах (см. рис. 11, Б).

Уровень алмазоносности продуктивных отложений булкурской пачки практически не зависит от количества и состава грубокластического материала в породе. На р. Булкур (см. рис. 1, разрез 3) ураганной продуктивностью выделяются песчано-глинистые образования. И противоположный пример, когда такая же алмазоносность установлена в конгломератах м. Тумул, где среди гальки преобладают породы верхоянского комплекса, а примесь вулканического материала фиксируется только в цементе. Авторы подметили прямую корреляционную связь между содержаниями крупных пиропов (+1 мм) и алмазоносностью. Это хорошо видно на примере участков Булкур и Тумул, где наряду с ураганной алмазоносностью содержатся высокие концентрации крупных пиропов. Ураганной алмазоносностью характеризуются линейные латеритные коры выветривания, где первичные породы преобразованы экзогенными процессами. Здесь уровень продуктивности в два раза выше, чем на участках, где породы не затронуты корообразованием.

Масса алмазов из туфогенно-осадочных пород ангардамтасского комплекса колеблется в широких пределах — от доли миллиграмма до 5.16 карата (кристалл V разновидности, см. табл. 5, доп. материалы). Алмазы из туфов и туффитов Булкурской антиклинали, кряжа Прончищева, уч. Ольховый по среднему весу и распределению их по классам крупности можно отнести к таковым из коренных кимберлитов или россыпей ближнего сноса [Граханов, Митюхин, 2003]. Перемыв алмазоносных туфогенных пород в прибрежно-морских условиях четко прослеживается по увеличению крупности и сортированности кристаллов и выносу мелких классов (см. табл. 5, уч. Тумул).

Типоморфные особенности алмазов из базального горизонта кенгдейской и булкурской пачек отличны от таковых из коренных источников и палеозойских россыпей северо-востока Сибирской платформы, но имеют полное сходство с кристаллами мезозойских и кайнозойских россыпей (табл. 6, см. доп. материалы).

Алмазы, характерные для коренных месторождений Якутии [Зинчук, Коптиль, 2003], представленные ламинарными кристаллами ряда октаэдр—ромбододекаэдр I разновидности в кенгдейской пачке, составляют 5.6 %, но их доля возрастает в булкурской пачке (до 21.6 %) (см. табл. 6). Среди них в равной степени встречаются октаэдры, переходные формы и ламинарные ромбододекаэдры.

Алмазы, преобладание которых типично для слабоалмазоносных кимберлитовых тел [Зинчук, Коптиль, 2003], представлены округлыми кристаллами уральского типа (см. табл. 6), которые составляют 63 % в кенгдейской пачке, но их доля существенно ниже в булкурской пачке, достигая минимальных значений на кряже Прончищева 25.4 %. Среди них в основном встречаются скрытослоистые (72 % от

кристаллов этой группы) и индивиды со сноповидной штриховкой (26 %), реже — алмазы с блоковой скульптурой.

Алмазы, представленные округлыми кристаллами «жильного типа» с шагренью и полосами пластической деформации, характерные для убогоалмазоносных кимберлитовых тел [Зинчук, Коптиль, 2003], встречаются в равных количествах в кенгдейской и булкурской пачках, но их доля существенно возрастает на кряже Прончищева (см. табл. 6). Половина из них — целые и незначительно поврежденные кристаллы. Обломки составляют 25 %. Все алмазы окрашены в лилово-коричневые и дымчато-коричневые цвета и имеют полосы пластической деформации, характерные для данной группы.

Уже в наиболее ранних описаниях россыпных «северных» алмазов, обобщенных в классификации алмазов [Орлов, 1984], подчеркивается их своеобразие и отличие от алмазов, известных в коренных месторождениях Якутии. Основным отличием является высокое содержание практически во всех россыпях округлых кривогранных алмазов, относимых к так называемому уральскому, или бразильскому, типу и преобладающих во всех известных россыпных месторождениях алмаза в мире. Другой особенностью является повышенная концентрация в ряде россыпей алмазов V и VII разновидностей, представляющих собой темные или совершенно черные кристаллы, окраска которых обусловлена большим количеством включений графита [Орлов, 1984]. В то же время в различных четвертичных россыпях фиксируется также достаточно стабильное содержание ламинарных алмазов. Наиболее высокое содержание таких алмазов отмечено для россыпей Молодо Приленского района (30.8 %) и Келимер (26.0 %) Нижнеоленинского алмазоносного района [Граханов и др., 2007].

Алмазы II, V и VII разновидностей, по [Орлов, 1984], «невьясненного» генезиса (северного или эбеляхского типов) и которые далее будут яркими маркерами в более молодых мезозойских и кайнозойских промышленных россыпях, встречаются в одинаковых пропорциях в кенгдейской и булкурской пачках, но аномально высокими концентрациями выделяется м. Тумул (33.3 %) и низкими — кряж Прончищева (9.5 %) (см. табл. 6, доп. материалы). Среди них доминируют кристаллы V разновидности над VII.

Туфогенные породы ангардамтасского комплекса являются наиболее древними, в которых установлены алмазы северного или эбеляхского типов (V + VII разновидности), составляющие основную долю в уникальных россыпных месторождениях Лено-Анабарской субпровинции [Граханов и др., 2007]. Характерной особенностью изученных алмазов (см. табл. 6) из карнийских туфов, туффигов и туфоконгломератов является высокое содержание серых, переполненных включениями графита кристаллов V разновидности и сложных двойников и сростков додекаэдров VII разновидности [Орлов, 1984] с легким (в среднем $\delta^{13}\text{C} = -22.5\%$) изотопным составом углерода. С ними ассоциируют (5—10 %) желто-оранжевые кубоиды II разновидности с промежуточным изотопным составом углерода (в среднем $\delta^{13}\text{C} = -13.6\%$) [Зинчук, Коптиль, 2003; Zedgenizov et al., 2016a]. Среди кристаллов I разновидности преобладают типичные округлые скрытослоистые додекаэдровиды (уральский тип) при сравнительно низком содержании додекаэдровидов с шагренью и полосами пластической деформации (жильный тип) и ламинарных алмазов. В дальнейшем этот необычный спектр алмазов прослеживается в норийских, рэтских, нижне- и верхнеюрских, нижнемеловых и кайнозойских россыпных проявлениях и месторождениях алмазов северо-востока Сибирской платформы (см. табл. 6). На западном крыле Булкурской антиклинали, р. Хатыстах (см. рис. 1, разрез 10) был найден один кристалл кубической формы III разновидности в классе $-8...+4$ мм [Павлушин и др., 2016]. Эта разновидность довольно экзотическая и установлена только в трубках Удачная, Ботуобинская, Нюрбинская и телах Верхнемунского поля [Зинчук, Коптиль, 2003].

По кристалломорфологическим особенностям алмазы всех триасовых россыпей имеют большое сходство. Высокое содержание кристаллов V и VII разновидностей на м. Тумул объясняется исключительно повышенной крупностью кристаллов (см. табл. 6). По северо-востоку Сибирской платформы алмазы эбеляхского типа выделяются высоким средним весом [Зинчук, Коптиль, 2003; Граханов и др., 2007]. В ассоциации изученных алмазов отмечено высокое (2/5—1/2) содержание сложносдвойникованных по шпинелевому закону кристаллов. Широко распространены индивиды с признаками травления в форме шрамов. Окрашенные алмазы составляют незначительную долю (около 1/3), а наиболее распространенными являются лилово-коричневая окраска I разновидности и серая (из-за включений графита) V разновидности. Общее содержание минеральных включений в алмазах является довольно высоким и достигает 61 % от общего количества кристаллов, причем среди них резко преобладают включения графита [Граханов, Коптиль, 2003], которые часто маскируют другие минеральные включения [Рагозин и др., 2002]. Суммарное содержание сингенетических включений составляет около 0.5 %, что является одной из наиболее низких цифр среди россыпей северо-востока Сибирской платформы.

Специфика изученной ассоциации алмазов заключается также в относительно низком содержании кристаллов с сине-голубым свечением в ультрафиолетовых лучах (менее 1/4) при преобладании (свыше 40 %) индивидов с розово-сиреневым и фиолетовым свечением. Для изученных кристаллов характерно высокое (свыше 1/3) содержание обломков и осколков.

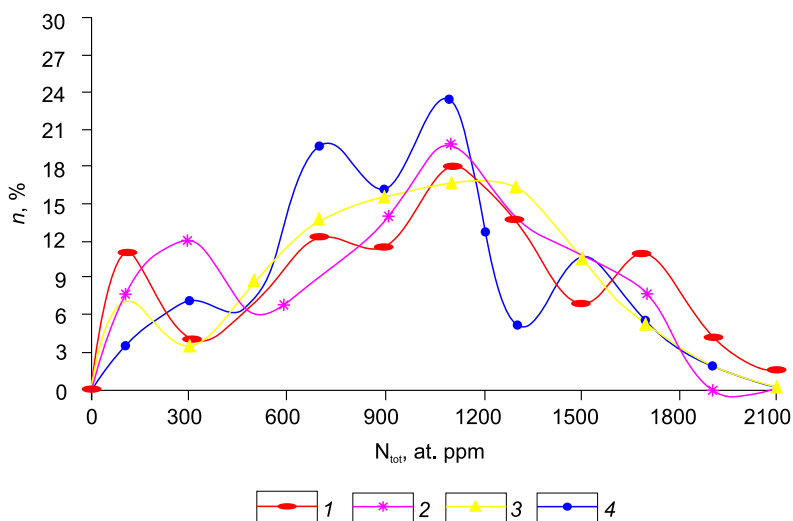


Рис. 12. Распределение алмазов по общему содержанию азота в туфогенно-осадочных породах ангардамтасского комплекса.

Аналитик к.г.-м.н. И.Н. Богуш, лаборатория алмазов НИГП АК «АЛРОСА». 1 — уч. Ольховый, разрез 1 ($n = 73$); 2 — уч. Тумул, разрез 6 ($n = 66$); 3 — уч. Булкур, разрез 3 ($n = 243$); 4 — уч. Улахан-Алджархай, разрез 9 ($n = 56$).

Механический износ истирания на алмазах всех разновидностей в туфогенных породах Булкурской антиклинали не фиксируется, но появляется на кристаллах V и VII разновидностей из прибрежно-морских образований на м. Тумул.

Содержание азота в алмазах из туфогенных и туфогенно-осадочных пород ангардамтасского комплекса подчеркивает общность их коренного источника (рис. 12), однако общее содержание азота в алмазах V—VII разновидностей северных россыпей может достигать 3000—3300 г/т [Cartigny et al., 2001; Shatsky et al., 2015; Ragozin et al., 2016].

Пленки и примазки на кристаллах алмаза. На кристаллах I, III, V и VII разновидностях из туфогенных пород Булкурской антиклинали были изучены пленки и примазки [Павлушин и др., 2010, 2016]. Все алмазы извлечены из шлиховых проб без дробления исходного материала, они не обрабатывались в кислотах, поэтому техногенные примеси на поверхностях кристаллов исключены. В пленках и примазках установлены: альмандин, альбит, галотрихит, жадеит, иллит, кальцит, мелантерит, нонтронит, рутил, тюрингит и шамозит. Анализ минеральных фаз позволяет выявить минеральные ассоциации, отражающие условия кристаллизации алмазов, их транспортировки к поверхности и последующих диагенетических преобразований алмазоносных пород.

Парагенетическая ассоциация шамозита и тюрингита отмечена в четко выраженном «послойном» распределении минералов на поверхности и в трещинах кристаллов сростка алмазов VII разновидности. Поверхность алмаза покрыта сплошным плотным чешуйчатым агрегатом железистых хлоритов — шамозита и тюрингита толщиной около 20 мкм. На ней наблюдается агрегат смешанных зерен жадеита, кальцита, кварца с редкими зернами пирита, кальцита, рутила и оксидов Mn, приближенных по составу к пиролюзиту и биксбиту. Их также можно охарактеризовать как продукты изменения вулканогенных и пирокластических пород в морских условиях осадконакопления [Павлушин и др., 2010].

Минералы группы сульфатов (натриевые и калиевые квасцы, галотрихит в парагенезисе с мелантеритом) образуются в областях активной вулканической деятельности [Palache et al., 1962] и при кислотном выщелачивании силикатных пород, сопутствующем этому процессу в условиях взаимодействия продуктов вулканической деятельности с морской водой. Образование слаборастворимого сульфата железа — мелантерита может также объясняться окислением пирита и пирротина, присутствующих среди исследованных фаз. При условии вулканогенного образования сульфатов в замкнутых водных бассейнах этот процесс закономерно сопровождается галогенезом, ведущим к образованию галогенных соединений и карбонатов. Таким образом, присутствие на поверхности алмазов из булкурской пачки фаз галита, сильвина, их механических смесей и сопровождающего галогениды кальцита еще раз подчеркивает фактор образования вышеописанных поверхностных фаз в зоне активной вулканической деятельности в условиях морского бассейна [Павлушин и др., 2010].

Соотношения разных морфологических типов алмазов в изолированных ореолах их распространения, как было отмечено еще на ранних этапах изучения (в 60-х годах XX в. З.В. Бартошинский для района Молодо), указывали на различные коренные источники. Сборы и изучение особенностей состава индикаторного минерала алмазоносных кимберлитов — высокохромистого субкальциевого пиропса [Соболев и др., 1969] — на основе оригинальной методики минералогического картирования перспективных районов [Соболев, 1971] позволили сделать заключение об отсутствии таких пиропсов в мезозойских кимберлитовых трубках, не содержащих алмазов. В то же время при опробовании гравелитов нижнекаменноугольного возраста, известных в Кютюнгинском прогибе, были выявлены не только их высокие концентрации [Соболев и др., 1981], но и алмазы [Pokhilenko, Sobolev, 1995]. Проведенное обогащение гравелитов, почти на 90 % состоящих из кальцита, методом полного разложения в соляной

кислоте, обеспечившее полный выход тяжелой фракции, включая алмазы, позволило выделить более 100 кристаллов алмаза, близких по морфологии кристаллам россыпи Молодо (см. табл. 6, доп. материалы) [Зинчук, Коптиль, 2003]. Сформулированный совместно с сотрудниками Амакинской экспедиции [Соболев и др., 1981] научный прогноз о вероятном наличии палеозойских алмазоносных кимберлитов в указанном регионе был позднее подтвержден открытием Амакинской экспедицией тр. Ивушка, перекрытой пермскими отложениями.

ИЗОТОПНЫЙ СОСТАВ АЛМАЗОВ СЕВЕРНЫХ РОССЫПЕЙ И ОСОБЕННОСТИ ВКЛЮЧЕНИЙ

Кроме морфологических особенностей, являющихся важным диагностическим признаком алмазов из кимберлитов и россыпей, позволяющим выявить значимые различия алмазов из различных кимберлитовых полей и трубок [Орлов, 1984], важное значение имеют исследования физических свойств алмаза [Соболев и др., 1966], в особенности изотопного состава углерода [Соболев и др., 1979; Meyer, 1987; Stachel et al., 2009; Shirey et al., 2013], а также оценка распространенности различных минеральных включений в алмазах и изучение их химического состава с помощью рентгеноспектрального микроанализа с электронным зондом.

Систематические многолетние исследования изотопного состава углерода, примеси азота и минеральных включений алмазов из россыпей северо-восточной части Сибирской платформы позволили сделать однозначный вывод о значимых отличиях от алмазов всех известных разрабатываемых коренных месторождений алмазов Якутии [Sobolev et al., 1999; Зедгенизов и др., 2001, 2011; Рагозин и др., 2002, 2009; Shatsky et al., 2014, 2015, 2019, 2020; Zedgenizov et al., 2016b]. Этот вывод базируется на четком отличии россыпных алмазов по значениям изотопного состава углерода [Соболев и др., 1979], а также на отчетливом преобладании эклогитового парагенезиса в россыпных алмазах по сравнению с перидотитовым [Ефимова, Соболев, 1977], достигающим 85 % [Shatsky et al., 2015]. Следует подчеркнуть уникально высокое значение алмазов, содержащих в виде включений парагенезис коэситовых эклогитов, представленный ассоциацией коэсита, Mg-Fe граната и омфацита в ряде кристаллов [Соболев и др., 1976]. Особая роль принадлежит установленному парагенезису коэситовых эклогитов наряду с устойчивым облегченным изотопным составом углерода в алмазах V разновидности [Рагозин и др., 2002, 2009; Shatsky et al., 2014, 2015]. Большое значение коэситсодержащих парагенезисов включений в алмазах северо-востока Сибирской платформы сопоставимо только с ролью коэсита в алмазах из кимберлитов Венесуэлы и лампроитовой тр. Аргайл в Австралии [Соболев, 2006] и полностью подтверждает представление о субдукции литосферы северной части Сибирской платформы [Соболев и др., 1975, 1980; Шацкий и др., 2016; Zedgenizov et al., 2016a, b; Zemnukhov et al., 2020].

Важной особенностью алмазов из россыпей северной части Сибирской платформы является содержание в отдельных кристаллах включений особо глубоких сублитосферных минералов, таких как ферропериклаз [Sobolev et al., 1999] и гранаты перидотитового и эклогитового парагенезисов с примесью майджоритового компонента [Шацкий и др., 2010]. В редких случаях аналогичные особенности зафиксированы и в алмазах кимберлитов [Соболев и др., 1997; Зедгенизов и др., 2001; Sobolev et al., 2004]. Эта особенность свидетельствует об особо сложном характере строения и состава наиболее глубоких областей верхней мантии региона [Соболев, Соболев, 1964].

При изучении изотопного состава алмазов из туфогенно-осадочных пород Булкурской антиклинали [Граханов и др., 2015a] подтверждено, что кристаллы с легким изотопным составом углерода полностью представляют не только V и VII разновидности (эбеляхский тип), но и составляют значимую долю среди округлых кристаллов I разновидности уральского или жильного типов [Соболев и др., 1979]. Легкая изотопия кристаллов эбеляхского типа в округлых алмазах I разновидности хорошо коррелируется с высокими концентрациями азота (табл. 7, см. доп. материалы).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В арктической зоне Сибири открыты крупные проявления алмазов, которые приурочены к вулканокластическим, осадочно-вулканокластическим, вулканогенно-осадочным и осадочным породам верхов ладинского и основания карнийского ярусов триаса. Первые результаты структурно-геологического изучения, петрографии, геохимии и минералогии алмазоносных пород этого ряда позволили выделить из его состава ангардамтасский вулканический алмазоносный комплекс, представленный взрывно-обломочными пирокластическими и гидроэсплозивными (туфами, ксенотуфами) и осадочно-вулканокластическими (туффитами) породами, сформированными в континентальных и прибрежно-морских обстановках. Основные компоненты кластической составляющей вулканитов — концентрически-зональные сферические лапилли и нодулы преобразованных бесполовошпатовых пород, фрагменты девитрифицированного вулканического стекла, обломки туфов и автолитовых брекчий [Граханов и др., 2010б; Проскурнин и др., 2012], минеральные фазы пленок и примазок на кристаллах алмазов [Павлу-

шин и др., 2010, 2016] — свидетельствуют о совмещении диатремовой и подводно-кратерных фаций и широком развитии гидроэксплозивных вулканокластических пород, образующихся при фреатических эксплозиях, происходящих при взаимодействии расплава с водой в условиях мелководья. Возможность сохранения от эрозии эксплозивно-обломочных алмазоносных фаций обусловлена тектоническим режимом территории — краевой частью Сибирской платформы, где их протяженные маломощные слои сразу же перекрыты прибрежно-морским терригенным материалом и собраны в пологоскладчатые верхожанские стуктуры.

В настоящее время можно предполагать, что эксплозивно-обломочные породы и туффиты имеют основной и(или) ультраосновной состав вулканизма с умеренно щелочным и щелочным уклоном. Данные породы по своему химическому составу не похожи на таковые известных коренных месторождений алмазов [Граханов и др., 2010б; Проскурнин и др., 2012; Летникова и др., 2013].

Минеральный состав тяжелой фракции туфогенных пород уникален по широкому спектру цветовых разновидностей пиропов, а также повышенному содержанию хромшпинелидов, пикроильменита и рутила. В цветовом спектре пиропов доминируют индивиды оранжевого цвета. Содержание пиропов алмазной ассоциации дунит-гарцбургитового парагенезиса редко превышает 1—2 %. В то же время значительна доля (12.5 %) гранатов эклогитового парагенезиса с примесью $MnO > 0.5$ мас. %, что характерно для высокоалмазоносных пород [Соболев и др., 2013а].

В пределах уч. Булкур в тяжелой фракции в пироп-альмандиновых гранатах выявлены включения редкого оксида Ti и Zr (Ti_2ZrO_6) — шриланкита, ранее обнаруженного в аналогичной ассоциации в концентратах кимберлитов трубок Юбилейная и Малокуонапская [Биллер и др., 2018]. Это позволяет рассматривать его в группе индикаторных минералов кимберлитов и, учитывая наличие клинопироксена в ассоциации, относить к группе минералов, представляющих фрагменты эклогитоподобных пород нижней части земной коры [Бобриевич, Соболев, 1957].

Неравномерное содержание индикаторных минералов в разных пробах и широкие вариации состава гранатов могут быть обусловлены множественным характером коренных источников алмазов. Необходимо продолжение систематического опробования алмазоносных пород ангардамтасского комплекса с особым вниманием к оценке состава гранатов вероятного эклогитового парагенезиса с повышенным содержанием TiO_2 , MnO , CaO и Na_2O , а также поискам перовскита и рутила, содержащего Nb [Taylor, 2008] и(или) Cr [Malkovets et al., 2016], которые наряду с цирконами представляют интерес для определения изотопного U-Pb возраста возможных коренных источников алмазов — кимберлитов.

Предполагается, что формирование россыпей с едиными типоморфными особенностями алмазов на большой территории северо-востока Сибирской платформы обусловлено тем, что выброс алмазоносных туфов из кратеров охватывал значительные площади в позднеладинское и раннекарнийское время, которые затем перерабатывались и перемещались в рэтскую и плинсбахскую трансгрессии [Граханов и др., 2010а, 2013]. Фактически максимальное развитие раннеюрской трансгрессии охватывает область распространения экзотических алмазов на северо-востоке платформы. Цирконы среднепозднетриасового тектономагматического этапа уверенно прослеживаются в более молодых мезозойских и кайнозойских промышленных россыпях Анабарского района [Дэвис и др., 1980; Граханов, Смелов, 2011; Граханов и др., 2015б], где отсутствуют среднепозднепалеозойские спектры цирконов, которые характерны для коренных месторождений алмазов центральной части Якутии.

При сохранении текущего объема коренной и россыпной алмазодобычи в РФ ближайшее десятилетие может оказаться последним, после чего наступит резкий спад в добыче алмазов [Голубев и др., 2020], а новых значимых открытий нет. Следует учесть, что от момента выявления месторождений до их вовлечения в промышленное освоение проходит 8—10 лет. Учитывая данный факт, необходимо осваивать новые районы, где есть перспективы обнаружения коренных и россыпных месторождений алмазов. В этом плане дальнейшие исследования по определению типа и состава алмазоносного вулканизма арктической зоны Сибири позволят разработать поисковые критерии открытия вулканических аппаратов, с которыми могут быть связаны крупные месторождения.

Авторы благодарны В.В. Селивановой, впервые обосновавшей первичность ореола МИК в основании карнийского яруса; А.В. Гавришу, О.Б. Олейникову, В.И. Павлову, А.П. Смелову, С.И. Этигасову, А.В. Черемкину, А.В. Ядренкину за совместную результативную работу в поле; А.А. Багаевой, Н.П. Виноградовой, К.Н. Егорову, О.В. Королевой, Л.И. Лукьяновой, А.Е. Молоткову, М.В. Наумову, А.Д. Павлушину, А.П. Смелову, Е.С. Соболеву, Т.Г. Шумиловой, А.В. Ядренкину за активное участие в этих исследованиях, научные консультации, помощь в петрографических и палеонтологических работах.

Работа частично выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ (№ 19-17-00128).

ЛИТЕРАТУРА

Агашев А.М., Похиленко Н.П., Толстов А.В., Поляничко В.В., Мальковец В.Г., Соболев Н.В. Новые данные о возрасте кимберлитов Якутской алмазоносной провинции // ДАН, 2004, т. 399, № 1, с. 95—99.

Антипин И.И. Совершенствование методических приемов обнаружения и локализации ореолов индикаторных минералов при поисках погребенных кимберлитовых тел: Автореф. дис.... к. г.-м. н. Мирный, 1998, 20 с.

Афанасьев В.П., Егоров А.Ю., Сибирцев Ю.М. О кимберлитовых минералах из древних прибрежно-морских коллекторов // Изв. вузов, Геология и разведка, 1986, № 2, с. 48—55.

Афанасьев В.П., Николенко Е.И., Тычков Н.С., Титов А.Т., Толстов А.В., Корнилова В.П., Соболев Н.В. Механический износ индикаторных минералов кимберлитов: экспериментальные исследования // Геология геофизика, 2008, т. 49 (2), с. 120—127.

Афанасьев В.П., Агашев А.М., Орихаша Ю., Похиленко Н.П., Соболев Н.В. Палеозойский U/Pb возраст включения рутила в алмазе V—VII разновидности из россыпей северо-востока Сибирской платформы // ДАН, 2009, т. 428, № 2, с. 1—5.

Беззубцев В.В., Залялеев Р.М., Сакович А.Б. Геологическая карта Горного Таймыра. М-б 1:500 000. Объяснительная записка. Красноярск, Изд-во ПГО «Красноярскгеология» 1986, 177 с.

Березнер О.С., Егоров А.Ю., Черенков В.Г. Генезис алмазов из триасовых коллекторов в низовьях р. Лена // Руды и металлы, 2016, № 4, с. 80—93.

Биллер А.Я., Логвинова А.М., Бабушкина С.А., Олейников О.Б., Соболев Н.В. Включения шрилангита в гранатах из кимберлитовых тел и алмазоносных вулканогенно-осадочных пород Якутской кимберлитовой провинции // ДАН, 2018, т. 478, № 2, с. 179—183.

Бобриевич А.П., Соболев В.С. Эклогитизация пироксеновых кристаллических сланцев архейского комплекса // Зап. ВМО, 1957, ч. 86, № 1, с. 3—17.

Брахфогель Ф.Ф. Геологические аспекты кимберлитового магматизма северо-востока Сибирской платформы. Якутск, Изд-во ЯФ СО АН СССР, 1984, 128 с.

Васильев Ю.Р., Гора М.П. Геология меймечитов севера Сибирской платформы и некоторые проблемы их генезиса // ДАН, 2012, т. 445, № 3, с. 299—302.

Васильев Ю.Р., Гора М.П. Меймечит-пикритовые ассоциации Сибири, Приморья и Камчатки (сравнительный анализ, вопросы петрогенезиса) // Геология и геофизика, 2014, т. 55 (8), с. 1211—1225.

Верниковский В.А., Пинс В.Л., Верниковская А.Е., Романов А.П., Джи Д.Дж., Травин А.В. Раннетриасовые А-граниты Таймыра — результат Северо-Азиатского суперплюма // ДАН, 2001, т. 380, № 1, с. 87—93.

Гогина Н.И. Находка алмаза в низовьях р. Лены // Докл. АН СССР, 1979, т. 239, № 5, с. 1168—1169.

Голубев Ю.К., Гаранин К.В., Кошкарев Д.А., Голубева Ю.Ю., Шахурдина Н.К. Состояние и перспективы развития минерально-сырьевой базы алмазов России // Минеральные ресурсы России. Геологоразведка и сырьевая база, 2020, № 6, с. 3—11.

Государственная геологическая карта Российской Федерации. М-б 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Таймыро-Североземельская. Лист S-49 — Хатангский залив. Объяснительная записка / Ред. В.Ф. Проскурнин. СПб, Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2013, 275 с.+12 вкл.

Государственная геологическая карта Российской Федерации. М-б 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Лаптево-Сибироморская. Лист S-51, 52 — дельта р. Лена. Объяснительная записка / Под ред. В.Ф. Проскурнина, С.И. Шкарубо. СПб, Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2014, 274 с.+9 вкл.

Граханов С.А., Коптиль В.И. Триасовые палеороссыпи алмазов северо-востока Сибирской платформы // Геология и геофизика, 2003, т. 44 (11), с. 1191—1201.

Граханов С.А., Митюхин С.И. Гранулометрический состав алмазов в россыпях как поисковый признак коренных источников // Изв. вузов, Геология и разведка, 2003, № 1, с. 48—51.

Граханов С.А., Ядренкин А.В. Прогноз алмазоносности триасовых отложений Таймыра // ДАН, 2007, т. 416, № 5, с. 653—656.

Граханов С.А., Смелов А.П. Возраст прогнозируемых коренных источников алмазов на севере Якутии // Отечественная геология, 2011, № 5, с. 56—64.

Граханов С.А., Шаталов В.И., Штыров В.А., Кычкин В.Р., Сулейманов А.М. Россыпи алмазов России. Новосибирск, Академ. изд-во «Гео», 2007, 420 с.

Граханов С.А., Зарукин А.О., Богуш И.Н., Ядренкин А.В. Открытие верхнетриасовых россыпей алмазов в акватории Оленекского залива моря Лаптевых // Отечественная геология, 2009, № 1, с. 53—61.

Граханов С.А., Маланин Ю.А., Павлов В.И., Афанасьев В.П., Похиленко Н.П., Герасимчук А.В., Липашова А.Н. Рэтские россыпи алмазов Сибири // Геология и геофизика, 2010а, т. 51 (1), с. 160—170.

Граханов С.А., Смелов А.П., Егоров К.Н., Голубев Ю.К. Осадочно-вулканогенная природа основания карнийского яруса — источника алмазов северо-востока Сибирской платформы // Отечественная геология, 2010б, № 5, с. 3—12.

- Граханов С.А., Смелов А.П., Помазанский Б.С., Егоров К.Н.** Алмазоносные юрские отложения северо-востока Сибирской платформы // Отечественная геология, 2013, № 5, с. 73—80.
- Граханов С.А., Молотков А.Е., Олейников О.Б., Павлушин А.Д.** Типоморфизм и изотопия алмазов триасовых туффигов Булкурской антиклинали // Отечественная геология, 2015а, № 5, с. 16—22.
- Граханов С.А., Зинчук Н.Н., Соболев Н.В.** Возраст прогнозируемых коренных источников алмазов на северо-востоке Сибирской платформы // ДАН, 2015б, т. 465, № 6, с. 715—719.
- Гулин С. А.** О формировании щелочных и карбонатных метасоматитов Центрального Таймыра // Карбонатиты и щелочные породы севера Сибири. Л., НИИГА, 1970, с. 170—184.
- Дагис А.С., Казаков А.М.** Стратиграфия, литология и цикличность триасовых отложений севера Средней Сибири. Новосибирск, Наука, 1984, 176 с.
- Дэвис Г.Л., Соболев Н.В., Харьков А.Д.** Новые данные о возрасте кимберлитов Якутии, полученные уран-свинцовым методом по цирконам // Докл. АН СССР, 1980, т. 254, № 1, с. 175—179.
- Егоров А.Ю., Иваненко Г.В., Баранов Ю.М., Константинов А.Г.** Ладинский ярус Лено-Оленекского района // Бореальный триас. М., Наука, 1987, с. 26—31. (Тр. ИГиГ СО АН СССР, вып. 689).
- Ефимова Э.С., Соболев Н.В.** Распространенность кристаллических включений в алмазах Якутии // Докл. АН СССР, 1977, т. 237, № 6, с. 1475—1478.
- Зайцев А.И., Смелов А.П.** Изотопная геохронология пород кимберлитовой формации Якутской провинции. Якутск, ООО РИЦ «Офсет», 2010, 108 с.
- Зедгенизов Д.А., Ефимова Э.С., Логвинова А.М., Шацкий В.С., Соболев Н.В.** Включения ферропериклаза в микроалмазе из кимберлитовой трубки Удачная, Якутия // ДАН, 2001, т. 337, № 3, с. 381—384.
- Зедгенизов Д.А., Рагозин А.Л., Шацкий В.С., Араухо Д., Гриффин В.Л.** Карбонатные и силикатные среды кристаллизации волокнистых алмазов из россыпей северо-востока Сибирской платформы // Геология и геофизика, 2011, т. 52 (11), с. 1649—1664.
- Зинчук Н.Н., Коптиль В.И.** Типоморфизм алмазов Сибирской платформы. М., Недра-Бизнес-центр, 2003, 603 с.
- Золотухин В.В.** Особенности дифференцированного интрузива Тулай-Киряка на Таймыре. Новосибирск, Наука, 1990, 110 с.
- Казаков А.М., Константинов А.Г., Курушин Н.И., Могучева Н.К., Соболев Е.С., Фрадкина А.Ф., Ядренкин А.В., Девятов В.П., Смирнов Л.В.** Стратиграфия нефтегазоносных бассейнов Сибири. Триасовая система. Новосибирск, Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2002, 322 с.
- Константинов А.Г., Соболев Е.С., Ядренкин А.В.** Детальная биостратиграфия триасовых отложений нижнего течения реки Лена (север Якутии) // Геология и геофизика, 2007, т. 48 (9), с. 934—949.
- Летникова Е.Ф., Лобанов С.С., Похиленко Н.П., Изох А.Э., Николенко Е.И.** Источники поступления обломочного материала в карнийский алмазоносный горизонт северо-востока Сибирской платформы // ДАН, 2013, т. 451 (2), с. 193—196.
- Логвинова А.М., Серебрянников А.О., Соболев Н.В.** Вариации химического состава и редкие парагенезисы множественных включений магнезиохромита в алмазах Якутии // ДАН, 2021, т. 501, № 1, с. 26—32.
- Мальковец В.Г., Шацкий В.С., Дак А.И., Гибшер А.А., Яковлев И.В., Белоусова Е.А., Тсуджимори Т., Соболев Н.В.** Свидетельства многоэтапности и полихронности щелочно-ультраосновного мезозойского магматизма в районе алмазоносных россыпей бассейна реки Эбелях (восточный склон Анабарского щита) // ДАН, 2021, т. 496, № 1, с. 49—54.
- Моор Г.Г.** О слюдяных кимберлитах на севере Центральной Сибири // Докл. АН СССР, 1941, т. XXXI, № 4, с. 361—363.
- Натапов Л.М., Гогина Н.И., Сибирцев Ю.М., Огородников В.Д., Уфлянд А.К.** Новый промежуточный коллектор минералов-спутников алмаза на Сибирской платформе // Кимберлитовый и базитовый магматизм района Оленекского поднятия. Якутск, Изд-во ЯФ СО АН СССР, 1980, с. 67—73.
- Николенко Е.И., Логвинова А.М., Изох А.Э., Афанасьев В.П., Олейников О.Б., Биллер А.Я.** Ассоциация хромшпинелидов из верхнетриасовых гравелитов северо-востока Сибирской платформы // Геология и геофизика, 2018, т. 59 (10), с. 1680—1701.
- Орлов Ю.Л.** Минералогия алмаза. 2-е изд. М., Наука, 1984, 264 с.
- Павлушин А.Д., Граханов С.А., Смелов А.П.** Парагенетические ассоциации минералов на поверхности кристаллов алмаза из отложений карнийского яруса северо-востока Сибирской платформы // Отечественная геология, 2010, № 5, с. 45—51.
- Павлушин А.Д., Граханов С.А., Олейников О.Б., Новгородов А.Н.** Находки алмазов III разновидности в карнийских туфах Булкурской антиклинали (материалы Всероссийской научно-практической конференции). Якутск, Издательский дом СВФУ, 2016, с. 255—258.

- Погребницкий Ю. Е.** Палеотектонический анализ Таймырской складчатой системы. Л., Недра, 1971, 248 с. (Тр. НИИГА, т. 166).
- Подчасов В.М., Евсеев М.Н., Богатых И.Я., Минорин В.Е., Черенков В.Г.** Россыпи алмазов в мире. М., ООО «Геоинформмарк», 2005, 747 с.
- Проскурнин В.Ф., Петров О.В., Багдасаров Э.А., Розинов М.И., Толмачева Е.В., Ларионов А.Н., Бильская И.В., Гавриш А.В., Мозолева И.Н., Петрушков Б.С.** О происхождении карбонатов Восточного Таймыра на основе изотопно-геохимического изучения цирконов // Зап. ВМО, 2010, ч. 139, вып. 1, с. 19—36.
- Проскурнин В.Ф., Виноградова Н.П., Гавриш А.В., Наумов М.В.** Признаки эксплозивно-обломочного генезиса алмазоносного карнийского горизонта Усть-Оленекского района (петрографо-геохимические данные) // Геология и геофизика, 2012, т. 53 (6), с. 698—711.
- Проскурнин В.Ф., Гавриш А.В., Петров О.В., Галкин А.С., Виноградова Н.П., Наумов М.В., Силаев В.И., Лукьянова Л.И., Ронина Е.Е., Салтанов В.А.** Потенциально алмазоносные раннемезозойские инъекционные брекчии Восточного Таймыра // Региональная геология и металлогения, 2017, № 72, с. 78—90.
- Проскурнин В.Ф., Граханов С.А., Петров О.В., Васильев Е.А., Берзон Е.И., Антонов А.В., Соболев Н.В.** Прогноз алмазоносности Таймыра // ДАН, 2021, т. 499, № 2, с. 11—16.
- Проскурнина М.А., Проскурнин В.Ф., Ремизов Д.Н., Ларионов А.Н.** Кольцевые интрузии Беспамятинского ареала: проявления шононит-латитового магматизма на Северном Таймыре // Региональная геология и металлогения, 2019, № 79, с. 5—22.
- Равич М.Г., Чайка Л.Г.** Малые интрузии хребта Бырранга. Л., Недра, 1959, 148 с. (Тр. НИИГА, т. 88).
- Рагозин А.Л., Шацкий В.С., Рылов Г.М., Горйинов С.В.** Включения коэсита в округлых алмазах из россыпей северо-востока Сибирской платформы // ДАН, 2002, т. 384, № 4, с. 509—513.
- Рагозин А.Л., Шацкий В.С., Зедгенизов Д.А.** Новые данные о составе среды кристаллизации алмазов V разновидности из россыпей северо-востока Сибирской платформы // ДАН, 2009, т. 425, № 4, с. 527—531.
- Романов А.П.** Лампроиты и кимберлиты Горного Таймыра // Российская Арктика: геологическая история, минералогия, геоэкология. СПб, ВНИИОкеанология, 2002, с. 291—299.
- Селиванова В.В.** Типоморфизм алмаза и его минералов-спутников из прибрежно-морских триасовых россыпей Северного Верхоянья. Автореф.... к. г.-м. н. М., 1991, 20 с.
- Симонов В.А., Васильев Ю.Р., Ступаков С.И., Котляров А.В., Карманов Н.С.** Петрогенезис дунитов Гулинского ультраосновного массива (север Сибирской платформы) // Геология и геофизика, 2016, т. 57 (12), с. 2153—2177.
- Соболев А.В., Соболев С.В., Кузьмин Д.В., Малич К.Н., Петрунин А.Г.** Механизм образования сибирских меймечитов и природа их связи с траппами и кимберлитами // Геология и геофизика, 2009, т. 50 (12), с. 1293—1334.
- Соболев В.С.** Особенности магматических проявлений и металлогении платформ на примере формации сибирских траппов // Тр. XVII сессии Международного геологического конгресса. М., 1937, т. 5, с. 265—271.
- Соболев В.С.** Геология месторождений Африки, Австралии, острова Борнео и Северной Америки. М., Госгеоллиздат, 1951, 126 с.
- Соболев В.С.** Ключ к «окну» в земную мантию // Были и будни алмазного края. Якутск, Якут. кн. изд-во, 1979, с. 7—17.
- Соболев В.С., Соболев Н.В.** Ксенолиты в кимберлитах Северной Якутии и вопросы строения мантии Земли // Докл. АН СССР, 1964, т. 158, № 1, с. 108—111.
- Соболев В.С., Соболев Н.В.** Проблема двухэтапного образования земной коры // Докл. АН СССР, 1975, т. 221, № 2, с. 435—438.
- Соболев В.С., Соболев Н.В.** Новые доказательства погружения на большие глубины эцлогитизированных пород земной коры // Докл. АН СССР, 1980, т. 250, № 3, с. 683—685.
- Соболев Е.В., Лисойван В.И., Ленская С.В., Соболев В.С.** Некоторые физические свойства алмазов из якутского эцлогита // Докл. АН СССР, 1966, т. 168, № 5, с. 1151—1153.
- Соболев Н.В.** Парагенетические типы гранатов. М., Наука, 1964, 218 с.
- Соболев Н.В.** О минералогических критериях алмазоносности кимберлитов // Геология и геофизика, 1971 (3), с. 70—80.
- Соболев Н.В.** Коэсит как индикатор сверхвысоких давлений в континентальной литосфере // Геология и геофизика, 2006, т. 47 (1), с. 95—104.

Соболев Н.В., Логвинова А.М. Включения пиропы в хромшпинелидах из кимберлитов и лампроитов и их значение для оценки парагенезиса и глубинности формирования // ДАН, 2004, т. 398, № 6, с. 786—791.

Соболев Н.В., Лаврентьев Ю.Г., Поспелова Л.Н., Соболев Е.В. Хромовые пиропы из алмазов Якутии // Докл. АН СССР, 1969, т. 189, № 1, с. 162—165.

Соболев Н.В., Похиленко Н.П., Лаврентьев Ю.Г., Усова Л.В. Особенности состава хромшпинелидов из алмазов и кимберлитов Якутии // Геология и геофизика, 1975 (11), с. 7—24.

Соболев Н.В., Ефимова Э.С., Коптиль В.И., Лаврентьев Ю.Г., Соболев В.С. Включения коэсита, граната и омфацита в якутских алмазах — первая находка парагенезиса коэсита // Докл. АН СССР, 1976, т. 230, № 6, с. 142—144.

Соболев Н.В., Галимов Э.М., Ивановская И.Н., Ефимова Э.С. Изотопный состав углерода алмазов, содержащих кристаллические включения // Докл. АН СССР, 1979, т. 246, № 5, с. 1217—1220.

Соболев Н.В., Белик Ю.П., Похиленко Н.П., Лаврентьев Ю.Г., Кривонос В.Ф., Поляков В.Н., Соболев В.С. Хромсодержащие пиропы в нижнекаменноугольных отложениях Кютюндинского прогиба // Геология и геофизика, 1981 (2), с. 153—157.

Соболев Н.В., Ефимова Э.С., Реймерс Л.Ф., Захарченко О.Д., Махин А.И., Усова Л.В. Минеральные включения в алмазах Архангельской кимберлитовой провинции // Геология и геофизика, 1997, т. 38 (2), с. 358—370.

Соболев Н.В., Логвинова А.М., Ефимова Э.С. Включения эклогитовых гранатов, обогащенных марганцем, в алмазах: свидетельство рециклирования земной коры // ДАН, 2013а, т. 453, № 3, с. 326—328.

Соболев Н.В., Логвинова А.М., Николенко Е.И., Лобанов С.С. Минералогические критерии алмазности верхнетриасовых россыпей северо-восточной окраины сибирской платформы // Геология и геофизика, 2013б, т. 54 (8), с. 1162—1178.

Соболев Н.В., Соболев А.В., Томиленко А.А., Кузьмин Д.В., Граханов С.А., Батанова В.Г., Логвинова А.М., Бульбак Т.А., Костровицкий С.И., Яковлев Д.А., Федорова Е.Н., Анастасенко Г.Ф., Николенко 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.

Туркин А.И., Соболев Н.В. Пироп-кноррингитовые гранаты: обзор экспериментальных данных и природных парагенезисов // Геология и геофизика, 2009, т. 50 (12), с. 1506—1523.

Тычков Н.С., Юдин Д.С., Николенко Е.И., Малыгина Е.В., Соболев Н.В. Мезозойская литосферная мантия северо-восточной части Сибирской платформы по данным включений из кимберлитов // Геология и геофизика, 2018, т. 59 (10), с. 1564—1585.

Харькин А.Д., Зинчук Н.Н., Крючков А.И. Коренные месторождения алмазов мира. М., Недра, 1998, 555 с.

Шамшина Э.А. Минералы кимберлитовых пород в разновозрастных отложениях севера Сибирской платформы. Якутск, ЯФ СО АН СССР, 1986, 112 с.

Шацкий В.С., Зедгенизов Д.А., Рагозин А.Л. Мэйджоритовые гранаты в алмазах из россыпей северо-востока Сибирской платформы // ДАН, 2010, т. 432, № 6, с. 811—814.

Шацкий В.С., Зедгенизов Д.А., Рагозин А.Л. Свидетельства присутствия субдукционного компонента в алмазоносной мантии Сибирского кратона // Геология и геофизика, 2016, т. 57 (1), с. 143—162.

Шпунт Б.Р., Шамшина Э.А. Поздневендские калиевые щелочные вулканы Оленекского поднятия (северо-восток Сибирской платформы) // Докл. АН СССР, 1989, т. 307, № 2, с. 678—682.

Agashev A.M., Pokhilenko N.P., Takazama E., McDonald J.A., Vavilov M.A., Watanabe T., Sobolev N.V. Primary melting sequence of a deep (> 250 km) lithospheric mantle as recorded in the geochemistry of kimberlite-carbonatite assemblages, Snap Lake dyke system, Canada // Chem. Geol., 2008, v. 255 (3—4), p. 317—328.

Belousova E.A., Griffin W., O'Reilly S.Y., Fisher N. Igneous zircon: trace element compositions as indicators of source rock type II // Contrib. Mineral. Petrol., 2002, v. 143, p. 602—622.

Bochneva A., Lalomov A., LeBarge W. Placer mineral deposits of Russian Arctic zone: Genetic prerequisites of formation and prospect of development of mineral resources // Ore Geol. Rev., 2021, v. 138, 104349.

Cartigny P., Harris J.W., Javoy M. Diamond genesis, mantle fractionations and mantle nitrogen content: a study of delta concentrations in diamonds // Earth Planet. Sci. Lett., 2001, v. 185, p. 85—98.

Green D.H., Sobolev N.V. Coexisting garnets and ilmenites synthesized at high pressures from pyrolite and olivine basanite and their significance for kimberlitic assemblages // Contrib. Mineral. Petrol., 1975, v. 50 (3), p. 217—229.

- Griffin W.L., Sobolev N.V., Ryan C.G., Pokhilenko N.P., Win T.T., Yefimova E.S.** Trace elements in garnets and chromite: diamond formation in the Siberian lithosphere // *Lithos*, 1993, v. 29 (3—4), p. 235—256.
- Griffin W.L., Ryan C.G., Gurney J.J., Sobolev N.V., Win T.T.** Chromite macrocrysts in kimberlites and lamproites: geochemistry and origin // *Proceedings of the Fifth International Kimberlite Conference, Araxá, Brazil 1991. Rio de Janeiro. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, 1994, v. 1, p. 366—387.*
- Lepekhina E.N., Rotman A.Y., Antonov A.V., Sergeev S.A.** SHRIMP U-Pb zircon ages of Yakutian kimberlite pipes // *9th International Kimberlite Conference, Frankfurt. Extended Abstracts, 2008, Vol. 9.*
- Logvinova A.M., Shatskiy A., Wirth R., Tomilenko A.A., Ugap'eva S.S., Sobolev N.V.** Carbonatite melt in type Ia gem diamond // *Lithos*, 2019a, v. 342—343, p. 463—467.
- Logvinova A., Zedgenizov D., Wirth R.** Specific multiphase assemblages of carbonatitic and Al-rich silicic diamond-forming fluids/melts: TEM observation of microinclusions in cubic diamonds from the placers of northeastern Siberian craton // *Minerals*, 2019b, v. 9, p. 50.
- Malkovets V.G., Rezvukhin D.I., Belousova E.A., Griffin W.L., Sharygin I.S., Tretiakova I.G., Gibsher A.A., O'Reilly S.Y., Kuzmin D.V., Litasov K.D., Logvinova A.M., Pokhilenko N.P., Sobolev N.V.** Cr-rich rutile: A powerful tool for diamond exploration // *Lithos*, 2016, v. 265, p. 304—311.
- Meyer H.O.A.** Inclusions in diamonds // *Mantle xenoliths. Chichester, UK, John Wiley & Sons, 1987, p. 501—522.*
- Mitchell R.H.** Kimberlites, orangeites, lamproites, melilitites and minettes: A petrographic atlas. Thunder Bay, Almaz Press Inc., 1997, 249 p.
- Palache C., Berman H., Frondel C.** Dana's system of mineralogy. New York, John Wiley & Sons, 1962, v. II, p. 834 p.
- Pokhilenko N.P., Sobolev N.V.** Mineralogical mapping of the north-east section of the Yakutian kimberlite province and its main results // *Sixth International Kimberlite Conference, Novosibirsk. Extended Abstracts, 1995, Vol. 6, p. 446—448.*
- Ragozin A., Zedgenizov D.A., Kuper K., Shatskiy V.S.** Radial mosaic internal structure of rounded diamond crystals from alluvial placers of Siberian platform // *Mineral. Petrol.*, 2016, v. 110, p. 861—875.
- Schmitt A.K., Zack T., Kooijman E., Logvinova A.M., Sobolev N.V.** U-Pb ages of rare rutile inclusions in diamond indicate entrapment synchronous with kimberlite formation // *Lithos*, 2019, v. 350—351, Article 10525.
- Shatskiy V.S., Zedgenizov D.A., Ragozin A.L., Kalinina V.V.** Carbon isotopes and nitrogen contents in placer diamonds from the NE Siberian craton: implications for diamond origins // *Eur. J. Mineral.*, 2014, v. 26, p. 41—52.
- Shatskiy V.S., Zedgenizov D.A., Ragozin A.L., Kalinina V.V.** Diamondiferous subcontinental lithospheric mantle of the northeastern Siberian craton: Evidence from mineral inclusions in alluvial diamonds // *Gondwana Res.*, 2015, v. 28, p. 106—120.
- Shatskiy V., Zedgenizov D., Ragozin A., Kalinina V.** Silicate melt inclusions in diamonds of eclogite paragenesis from placers the Northeastern Siberian craton // *Minerals*, 2019, v. 9, p. 412.
- Shatskiy V.S., Ragozin A.L., Logvinova A.M., Wirth R., Kalinina V.V., Sobolev N.V.** Diamond-rich placer deposits from iron-saturated mantle beneath the northeastern margin of the Siberian craton // *Lithos*, 2020, v. 364—365, 105514.
- Shirey S.B., Cartigny P., Frost D.J., Keshaw S., Nestola F., Nimis P., Pearson D.G., Sobolev N.V., Walter M.J.** Diamonds and the geology of mantle carbon // *Rev. Mineral. Geochem.*, 2013, v. 75, p. 355—421.
- Skuzovatov S., Wang K.-L., Smelov A.P.** Tracing the origin of zircon megacrysts in Triassic sediments of northeastern Siberian craton with implications to diamond paucity of craton-edge subcontinental lithospheric mantle // *Lithos*, 2021, v. 400—401, Article 106376.
- Sobolev N.V.** Deep-seated inclusions in kimberlites and the problem of the composition of the upper mantle. Washington, D.C., American Geophysical Union, 1977, 279 p.
- Sobolev N.V., Yefimova E.S.** Composition and petrogenesis of Ti-oxides associated with diamonds // *Int. Geol. Rev.*, 2000, v. 42 (8), p. 758—767.
- Sobolev N.V., Lavrent'ev Y.G., Pokhilenko N.P., Usova L.V.** Chrome-rich garnets from the kimberlites of Yakutia and their parageneses // *Contrib. Mineral. Petrol.*, 1973, v. 40, p. 39—52.
- Sobolev N.V., Yefimova E.S., Koptil V.I.** Mineral inclusions in diamonds in the northeast of the Yakutian diamondiferous province // *Proceedings of the Seventh International Kimberlite Conference. Cape Town, Red Roof Design, 1999, v. 2, p. 816—822.*
- Sobolev N.V., Logvinova A.M., Zedgenizov D.A., Yefimova E.S., Seryotkin Y.V., Floss K., Taylor L.A.** Mineral inclusions in microdiamonds and macrodiamonds from Yakutian kimberlites: a comparative study // *Lithos*, 2004, v. 77, p. 225—242.

Sobolev N.V., Logvinova A.M., Zedgenizov D.A., Pokhilenko N.P., Malygina E.V., Kuzmin D.V., Sobolev A.V. Petrogenetic significance of minor elements in olivines from diamonds and peridotite xenoliths from kimberlites of Yakutia // *Lithos*, 2009, v. 112S (2), p. 701—713.

Stachel T., Harris J.W., Muehlenbachs K. Sources of carbon in inclusion bearing diamonds // *Lithos*, 2009, v. 112S, p. 625—637.

Sun J., Liu C.-Z., Tappe S., Kostrovitsky S., Liu C.-Z., Skuzovatov S.Y., Wu F.-Y. Mantle sources of kimberlites through time: A U-Pb and Lu-Hf isotope study of zircon megacrysts from the Siberian diamond fields // *Chem. Geol.*, 2018, v. 479, p. 228—240.

Taylor W.R. Rutile U-Pb dating in diamond exploration-application to detrital heavy mineral provenance studies and kimberlite age dating // 9th International Kimberlite Conference, Frankfurt. Extended Abstracts, 2008, Vol. 9.

Wagner P.A. The diamond fields of Southern Africa. Johannesburg, Transvaal Leader, 1914, 347 p.

Williams A.F. The genesis of the diamond. London, Ernest Benn, 1932, v. 2, 636 p.

Zedgenizov D.A., Kalinina V.V., Reutsky V.N., Yuryeva O.P., Rakhmanova M.I. Regular cuboid diamonds from placers of the northeastern Siberian platform // *Lithos*, 2016a, v. 265, p. 125—137.

Zedgenizov D., Rubatto D., Shatsky V., Ragozin A., Kalinina V. Eclogitic diamonds from variable crustal protoliths in the northeastern Siberian craton: trace elements and coupled $\delta^{13}\text{C}$ – $\delta^{18}\text{O}$ signatures in diamonds and garnet inclusions // *Chem. Geol.*, 2016b, v. 422, p. 46—59.

Zemnukhov A.L., Reutsky V.N., Zedgenizov D.A., Ragozin A.L., Zhelonkin R.Y., Kalinina V.V. Subduction related population of diamonds in Yakutian placers, northeastern Siberian platform // *Contrib. Mineral. Petrol.*, 2020, v. 175, p. 98.

*Поступила в редакцию 4 октября 2021 г.
принята в печать 10 января 2022 г.*