

Распространение и особенности минералов-индикаторов кимберлитов из аптского промежуточного коллектора Воронежской антеклизы

©2022 А. В. Черешинский✉

*Воронежский государственный университет,
Университетская пл. 1, 394018, Воронеж, Российская федерация*

Аннотация

Введение: В пределах Воронежской антеклизы (ВА) в разновозрастных терригенных отложениях выявлены многочисленные зерна минералов-индикаторов кимберлитов (МИК). Имеющиеся находки МИК распространены крайне неравномерно, как по площади, так и по разрезу. Отложения аптского возраста на территории ВА являются наиболее перспективными для изучения, так как содержат рекордное количество МИК.

Методика: В 2012–2018 гг. при проведении работ по геологическому доизучению масштаба 1:200 000 были изучены 32 шлиховые пробы, отобранные из аптских отложений. Типоморфные особенности индикаторных минералов исследованы под бинокляром. Химический состав МИК определялся на электронном микроскопе Jeol 6380 LV с энергодисперсионной системой количественного анализа Inca-250 (ВГУ). Фациальная карта аптского времени составлена на основе фактического материала, собранного автором при проведении работ по геологическому доизучению территории ВА, также использованы данные предшественников.

Результаты и их обсуждение: В образованиях аптского яруса из МИК преобладают хромшпинелиды, их количество в местонахождениях Тульское, Дубовец, Кошкино и Лебяжье достигает нескольких тысяч знаков на пробу. Для изученных зерен характерны широкие вариации химического состава при значительном количестве высокохромистых разностей. На генетических диаграммах Н. В. Соболева и Ч. Фипке для хромшпинелидов характерен кимберлитовый тренд, при этом часть точек составов попадает в область алмазной ассоциации. В местонахождении Лебяжье около 32% проанализированных зерен на диаграмме Н. В. Соболева соответствуют хромшпинелидам из включений в алмазах, такое соотношение характерно для высокоалмазоносных кимберлитовых тел. В разрезах присутствуют зерна хромшпинелидов «мантийного» типа, представленные комбинационными кристаллами и октаэдрами с вицинальными гранями.

Заключение: В результате проведенных исследований изучены образования аптского яруса Воронежской антеклизы. Из отложений криушанской и волчинской свит (континентальные аллювиальные пески), а также мелководно-морских образований зушской толщи выделены минералы-индикаторы кимберлитов – хромшпинелиды и мелкие алмазы. Выявленные МИК указывают на присутствие в пределах Воронежской антеклизы алмазоносных тел, которые располагались юго-восточнее местонахождений, содержащих индикаторные минералы.

Ключевые слова: Воронежская антеклиза, аптский ярус, мелкие алмазы, хромшпинелиды, пикроильмениты.



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

✉ Черешинский Алексей Васильевич, e-mail: vsu31022@mail.ru

Для цитирования: Черешинский А.В. Распространение и особенности минералов-индикаторов кимберлитов из аптского промежуточного коллектора Воронежской антеклизы // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. 2022. №1. С. 34–46. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology.2022.1/9098>

Введение

При поиске и прогнозировании месторождений алмазов важную роль играет изучение разновозрастных терригенных образований, с использованием шлихо-минералогического метода [1–3]. Исследование морфологических особенностей зерен МИК, а также их химического состава позволяет определить дальность переноса и характер первичного коренного источника минералов. Изучение характера распределения индикаторных минералов по площади и разрезу позволяет установить направление сноса минералов, определить местоположение коренных источников и дать прогноз перспектив алмазоносности исследуемой площади.

К настоящему времени в пределах Воронежской антеклизы выявлено значительное количество разрезов, содержащих индикаторные минералы. Из разновозрастных терригенных образований выделены мелкие алмазы, пиропы, хромшпинелиды и пикроильмениты. Содержание МИК в имеющихся местонахождениях, как правило, низкое. В отдельных разрезах количество индикаторных минералов достигает сотен, в единичных случаях нескольких тысяч знаков на пробу [4–6].

Наиболее древними отложениями, содержащими МИК, являются песчаные породы девонского и каменноугольного возраста. Из отложений среднего девона выделены единичные зерна хромшпинелидов, которые по своему химическому составу являются низкохромистыми. На юго-востоке ВА в отложениях ястребовского возраста (D_3js) имеются находки пикроильменитов и хромшпинелидов [7, 8]. По своему химическому составу они соответствуют зернам из вулканогенно-осадочных пород ястребовской свиты. В петинских терригенных образованиях (D_3pt) выявлены единичные зерна пикроильменита и хромшпинелида [6].

На юго-востоке ВА наибольшее количество МИК характерно для мамонской толщи верхнего девона (D_3mm). Из данных образований выделены пикроильмениты, их количество в пробах достигает нескольких тысяч знаков. По химическому составу часть зерен характеризуются повышенным содержанием MgO (до 11%) и Cr_2O_3 (до 1.6%) и соответствуют пикроильменитам из кимберлитов [9].

В каменноугольных отложениях хромшпинелиды выделены из визейского яруса нижнего карбона (C_1v , Курская область), их количество достигает 106 знаков на пробу весом 8 кг. На генетической диаграмме Н. В. Соболева [10] две точки составов попадают в поле хромшпинелидов алмазной ассоциации [11].

Из песчаных образований мезозоя отобрано больше всего проб [12]. Данный факт можно объяснить

доступностью пород этого возраста и наличием в них интервалов благоприятных для концентрации МИК. Самыми продуктивными из отложений мезозоя являются породы аптского и альбского ярусов, из них выделены мелкие алмазы, хромшпинелиды, пиропы и пикроильмениты. Для более молодых мезозойских образований (бат, келловей, готерив, баррем) характерно низкое содержание МИК.

В отложениях палеогеновой системы, на юго-востоке ВА, встречены пиропы (до 79 зерен), хромшпинелиды (до 10 знаков), единичные зерна пикроильменита и мелких алмазов. Для неогенового коллектора характерны пиропы и хромшпинелиды, тяготеющие к северо-востоку изучаемой территории. Количество пиропов не превышает 3 знаков на пробу, хромшпинелидов до 43 зерен. Четвертичные отложения содержат комплекс МИК, однако использование образований этого возраста затрудняется, так как они сформировались при большом участии дальнепринесенного моренного материала.

Таким образом, из всех разновозрастных терригенных отложений на территории ВА наиболее перспективными являются аптские, так как это первый промежуточный коллектор, содержащий в большом количестве МИК.

Фактический материал и методы исследований

В 2012–2018 гг. при проведении работ по геологическому доизучению масштаба 1:200 000 были изучены 32 шлиховые пробы, отобранные из аптских отложений. Промывка проб проводилась на лотке сибирского типа. Полученный шлик был разделен в тяжелой жидкости (бромформе) с плотностью 2.9 г/см^3 на легкую и тяжелую фракции. При проведении минералогического анализа тяжелая фракция делилась на магнитную, электромагнитную и немагнитную составляющие. Типоморфные особенности индикаторных минералов были изучены под бинокляром. Химический состав МИК был изучен на электронном микроскопе Jeol 6380 LV с энергодисперсионной системой количественного анализа Inca-250 (ВГУ).

Фациальная карта аптского времени составлена на основе фактического материала, собранного автором при проведении работ по геологическому доизучению территории ВА, а также используя данные предшественников. При составлении карты на нее наносились точки выбранных разрезов и мощности отложений, проводилось построение карты изопахит, выделялись фациальные зоны.

Результаты исследований и их обсуждение

Образования аптского яруса в пределах Воронежской антеклизы имеют очень широкое распространение (рис. 1). На юге ВА в аптское время существовали континентальные условия, разрез представлен переслаиванием песков и глин, которые формировались в русловых, пойменных и озерно-болотных фациях – криушанская (K_1kr), девицкая (K_1dv) и волчинская свиты (K_1vc).

3 – высокой, 4 – слабой и средней, с преобладанием слабой, 5 – слабой и средней, с преобладанием средней, 6 – средней и высокой, с преобладанием средней; прибрежно-морские фациальные обстановки с активностью гидродинамического режима: 7 – слабой, 8 – средней, 9 – высокой, 10 – слабой и средней, с преобладанием слабой, 11 – средней и высокой, с преобладанием средней; 12 – переходные фациальные обстановки, лагунные и лиманские, относительно глубоководные, опресненные; континентальные фациальные обстановки: 13 – озерно-болотные, 14 – аллювиальные нерасчлененные, 15 – аллювиальные русловые, 16 – аллювиальные пойменные и старичные, 17 – глины, 18 – глины песчаные, 19 – переслаивание глин и алевритов, 20 – алевриты, 21 – песчаники тонко-, мелко-, среднезернистые, 22 – пески разноезернистые, 23 – пески мелко-, среднезернистые, 24 – пески глинистые, 25 – железнение, 26 – примесь глауконитового материала, 27 – слоистость, 28 – растительные остатки, 29 – границы фациальных зон, 30 – граница распространения отложений, 31 – изопачиты, 32 – места находок МИК.

[Fig. 1. Facies map of the Aptian age. Shallow-marine facies environments with a hydrodynamic activity: (1) – weak, (2) – medium, (3) – high, (4) – weak and medium, largely weak, (5) – weak and medium, largely medium, (6) – medium and high, largely medium; coastal-marine facies environments with a hydrodynamic activity: (7) – weak, (8) – medium, (9) – high, (10) – weak and medium, largely weak, (11) – medium and high, largely medium; (12) – transitional facies environments, lagoon and estuary, relatively deep-water, desalinated; continental facies environments: (13) – lacustrine-marshy, (14) – alluvial undifferentiated, (15) – alluvial channel, (16) – alluvial flood plain and old river bed, (17) – clay, (18) – sandy clay, (19) – interbedding of clay and siltstones, (20) – siltstones, (21) – very fine-, fine-, and medium-grained sandstones, (22) – mixed-grained sand, (23) – fine- and medium-grained sand, (24) – clayey sand, (25) – ferruginisation, (26) – glauconitic impurities, (27) – mica, (28) – plant fragments, (29) – boundaries of facies zones, (30) – boundaries of sediment distribution, (31) – isopachytes, (32) – sites of KIM findings.]

Криушанская свита распространена наиболее широко, залегает в основании аптской пачки, представляет собой русловой аллювий. В ее строении преобладают разноезернистые пески с тонкими прослоями глин. Девицкая свита представлена озерно-болотными и пойменными, преимущественно глинистыми фациями. Волчинская свита представлена мелко-тонкозернистыми песками и песчаниками.

На северном склоне ВА в аптское время существовали прибрежно- и мелководно-морские условия, происходило накопление преимущественно мелкозернистых песков с линзами и прослоями глин – зушская толща (K₁zš). Пески слабослюдистые, в различной степени глинистые, содержат незначительную примесь зерен глауконита.

Всего на ВА имеется несколько десятков разрезов аптских образований, содержащих МИК. Из индикаторных минералов выделены мелкие алмазы и хромшпинелиды, в виде единичных зерен отмечаются пиропы и пикроильмениты.

Мелкие алмазы выделены в 5 разрезах. Наибольшее их количество получено из 2 разрезов – Волчинская россыпь и Андреевка. Из первого выделено 320 знаков, из второго – 42. В местонахождениях Кудияровка и Захаровка найдено по одному мелкому алмазу, в разрезе Лев Толстой таких зерен 7. При этом, в данных местонахождениях, как правило, из индикаторных минералов присутствуют только мелкие алмазы.

Волчинская россыпь (т.н. 1) изучалась на предмет алмазоносности в 60–70-е годы и в начале XXI века. В результате первого опробования получено 241 зерно, второго – 79. Алмазы характеризуются небольшим размером, в основном сосредоточены в гранулометрическом классе 0.1–0.4 мм. Морфологический облик кристаллов в данных пробах довольно существенно отличается. Для первой характерны кубы (72%), также присутствуют октаэдры, комбинационные кристаллы и зерна без видимых кристаллографических очертаний. Для второй более характерны октаэдрические кристаллы, в меньшей степени кубы, кроме того отмечается наличие комбинационных форм и уплощенных зерен (рис. 2).

В разрезе Андреевка алмазы имеют более мелкие размеры (0.05–0.25 мм), цвет кристаллов от серого с зеленоватым оттенком до серовато-зеленого. По морфологическому облику кристаллы довольно сходны с Волчинской россыпью, преобладают октаэдрические формы и кубы, отличительной особенностью является наличие поликристаллических сростков.

В местонахождениях Кудияровка (т.н. 2) и Лев Толстой (т.н. 7) кроме мелких алмазов выделены хромшпинелиды размером 0.2–0.4 мм. Их количество в пробах невелико (4–14 знаков), представлены октаэдрами, кроме того отмечаются обломки кристаллов.

Для разрезов, которые располагаются северо-западнее описанных местонахождений (7012 и 7014), характерны пиропы в количестве 1 и 3 знака. Цвет зерен фиолетовый и фиолетово-розовый, преобладающая размерность 0.2–0.5 мм. На генетической диаграмме Н. В. Соболева [13] точки составов попадают в основном в область лерцолитового парагенезиса [4, 6].

Западнее рассмотренных местонахождений (на границе Курской и Орловской областей) изучено 18 разрезов, в 11 из них обнаружены МИК. Пробы были отобраны из песчаных образований зушской толщи. Пиропы обнаружены в двух пробах в количестве 1–3 зерен, по своему химическому составу они попадают в область лерцолитового парагенезиса. Хромшпинелиды выделены из 11 разрезов, их содержание составляет от 1 до 11 зерен. Они характеризуются умеренным содержанием Cr₂O₃, которое не превышает 49.5%.

Максимальные содержания МИК выявлены при изучении аптских разрезов на юге Липецкой и северо-западе Воронежской областей. При проведении работ по геологическому доизучению листа N-37-XXXIII (Елец) с помощью шлихоминералогического метода было исследовано 14 разрезов, отобрано 16 проб, из них 8 проб из зушской толщи, по 4 из криушанской и волчинской свит.

Вес шлиховых проб составил от 92.1 до 1440.8 г, тяжелой фракции от 1.79 до 71.03 г, материал сконцентрирован в классе крупности 0.1–0.25 мм. Среди минералов тяжелой фракции преобладает ильменит, циркон, ставролит, рутил и дистен. Менее распространены такие минералы как турмалин, гранат, силлиманит и лейкоксен. В виде единичных знаков встречаются шпинель, флогопит, хромшпинелиды и пикроильменит.

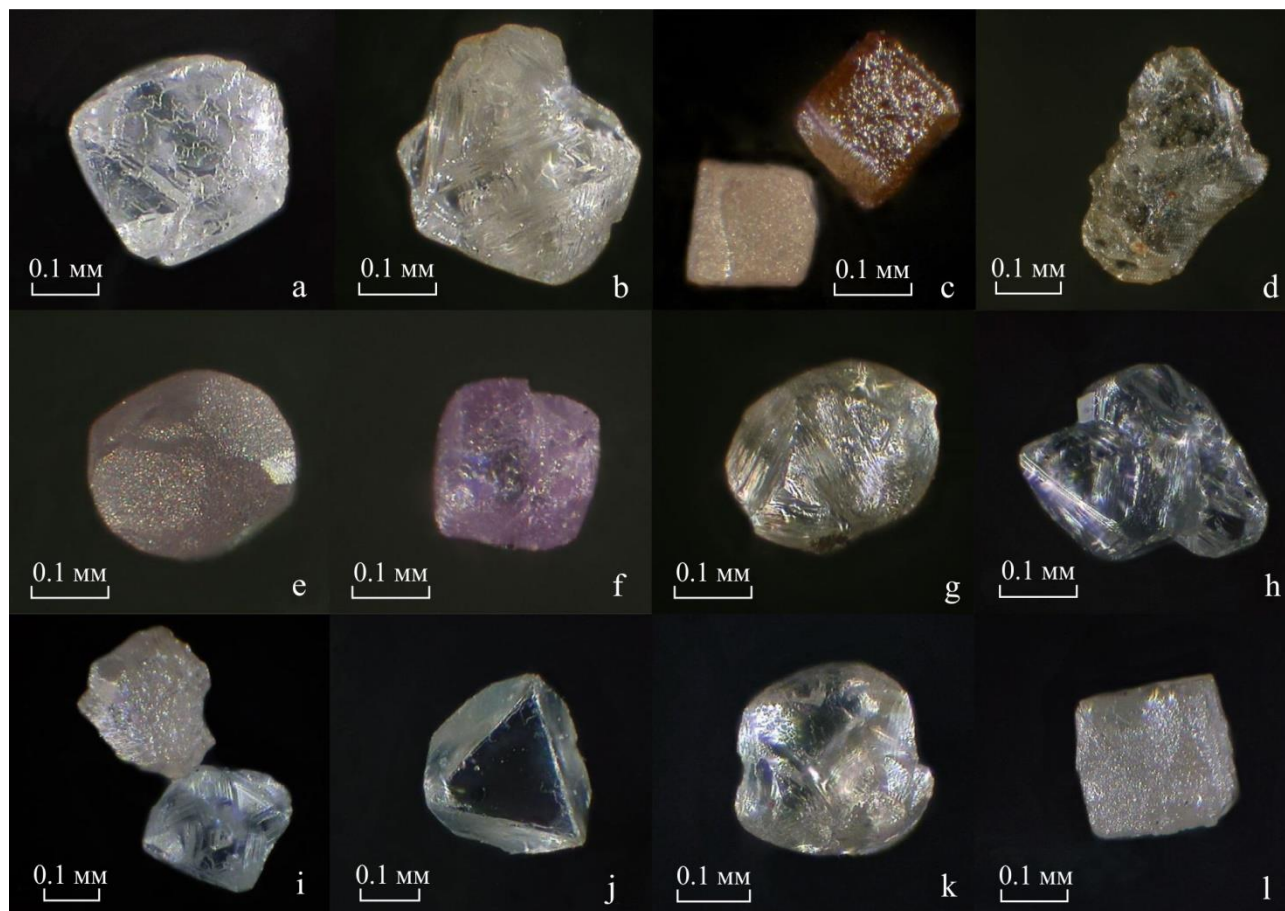


Рис. 2. Мелкие алмазы из Волчинской россыпи (т.н. 1).
[Fig. 2. Small diamonds from the Volchinsk placer (site 1).]

Минералы-индикаторы кимберлитов обнаружены в 6 местонахождениях, в 3 из них (т.н. 29, 140, 168) выделены редкие зерна хромшпинелидов. Наибольшее количество индикаторных минералов характерно для разрезов – Тульское (т.н. 62), Дубовец (т.н. 65) и Кошкино (т.н. 77).

В разрезе Тульское в кустарном карьере, расположенном в центральной части села, вскрыты пески волчинской свиты. Они светло-серые, иногда со слабым желтоватым оттенком, мелкозернистые, хорошо сортированные. В песках отмечаются прослои (0.1–0.2 м) разнозернистого, преимущественно средне-крупнозернистого песка, с косою разнонаправленной слоистостью. Опробование проведено из нижнего грубозернистого прослоя. В шлиховой пробе из фракции 0.1–0.25 мм выделено 1538 зерен хромшпинелидов.

В местонахождении Дубовец вскрыты пески криушанской свиты, перекрытые песчаниками волчинской свиты. Пески неравномерно окрашенные, от серых до кирпично-красных, они разнозернистые, преимущественно средне-крупнозернистые, с сложной косою разнонаправленной слоистостью. В песке наблюдаются прослои мощностью 0.2–0.4 м более грубозернистого песка. Он разнозернистый, преимущественно крупнозернистый до гравелитистого, обогащенный галькой и гравием кварца. Из данного ме-

стонахождения отобрано два образца, один из нижней (65/301), второй из верхней части разреза (65/302). В пробе 65/301 из фракции 0.1–0.25 мм выделены 2901 зерно хромшпинелида. В образце 65/302 – 33 хромшпинелида из размерности 0.25–1 мм и 4146 из granulometric class 0.1–0.25 mm.

В разрезе Кошкино в небольшом заброшенном карьере вскрыты пески зушской толщи. В основании разреза они желтовато-серые и рыжевато-бурые, разнозернистые, с плохо выраженной субгоризонтальной слоистостью. В верхней части разреза пески мелкозернистые, хорошо сортированные, с тонкой субгоризонтальной слоистостью. Шлиховая проба была отобрана из нижней части разреза, из фракции 0.1–0.25 мм выделено 1835 знаков хромшпинелидов.

Хромшпинелиды в данных местонахождениях преимущественно представлены плоскогранными октаэдрами (рис. 3). Кристаллы из местонахождений Дубовец и Тульское характеризуются низкой степенью окатанности (1–2 класс по шкале сохранности). Поверхность зерен матированная или шероховатая, в единичных случаях гладкая, блестящая.

В выделенных зернах наблюдается гипергенно-механогенная, в меньшей степени механогенная поверхность. Гипергенная поверхность представлена небольшими каналами травления, микротрещинами и

углублениями, имеющими V-образную форму, механогенная – выбоинами и сколами. В пробе из т.н. 65 встречены сростки кристаллов. В разрезе Кошкино хромшпинелиды более окатанные (2–3 класс), отдельные зерна хорошо окатаны (4 класс). Поверхность зерен, в основном, шероховатая, в меньшей степени матированная, для них характерна как гипергенная, так и механогенная поверхности.

Также присутствуют деформированные кристаллы, среди которых преобладают уплощенные зерна. Отмечаются октаэдры, на ребрах которых развиты дополнительные грани – вицинали. Реже в разрезах встречаются обломки кристаллов и зерна неправильной формы без кристаллографических очертаний.

Химические особенности хромшпинелидов были исследованы на электронном микроскопе, всего про-

ведено 160 анализов. Проанализированные зерна отмечаются широкой вариацией составов (в мас. %): TiO_2 от 0 до 8.1, Al_2O_3 – 2.4–40.1, MgO – от 0 до 17.7, Cr_2O_3 – 28.1–69.8. Зерна с максимальным содержанием MgO приурочены к пробе 62/301, Cr_2O_3 – 77/301.

Хромшпинелиды алмазной ассоциации (по Н. В. Соболеву) характеризуются высоким значением Cr_2O_3 – более 62 мас. %, низкими содержаниями Al_2O_3 (менее 8.5 мас. %) и TiO_2 (менее 0.5 мас. %). Количество подобных хромшпинелидов в высокоалмазных кимберлитовых трубках, в среднем колеблется от 16 до 28% [14, 15]. Для зерен из алмазных кимберлитов характерно наличие двух трендов: перидотитового (в виде полосы вдоль линии постоянного содержания железа) и пикритового (в виде полосы или облака вдоль оси Cr_2O_3) [16].

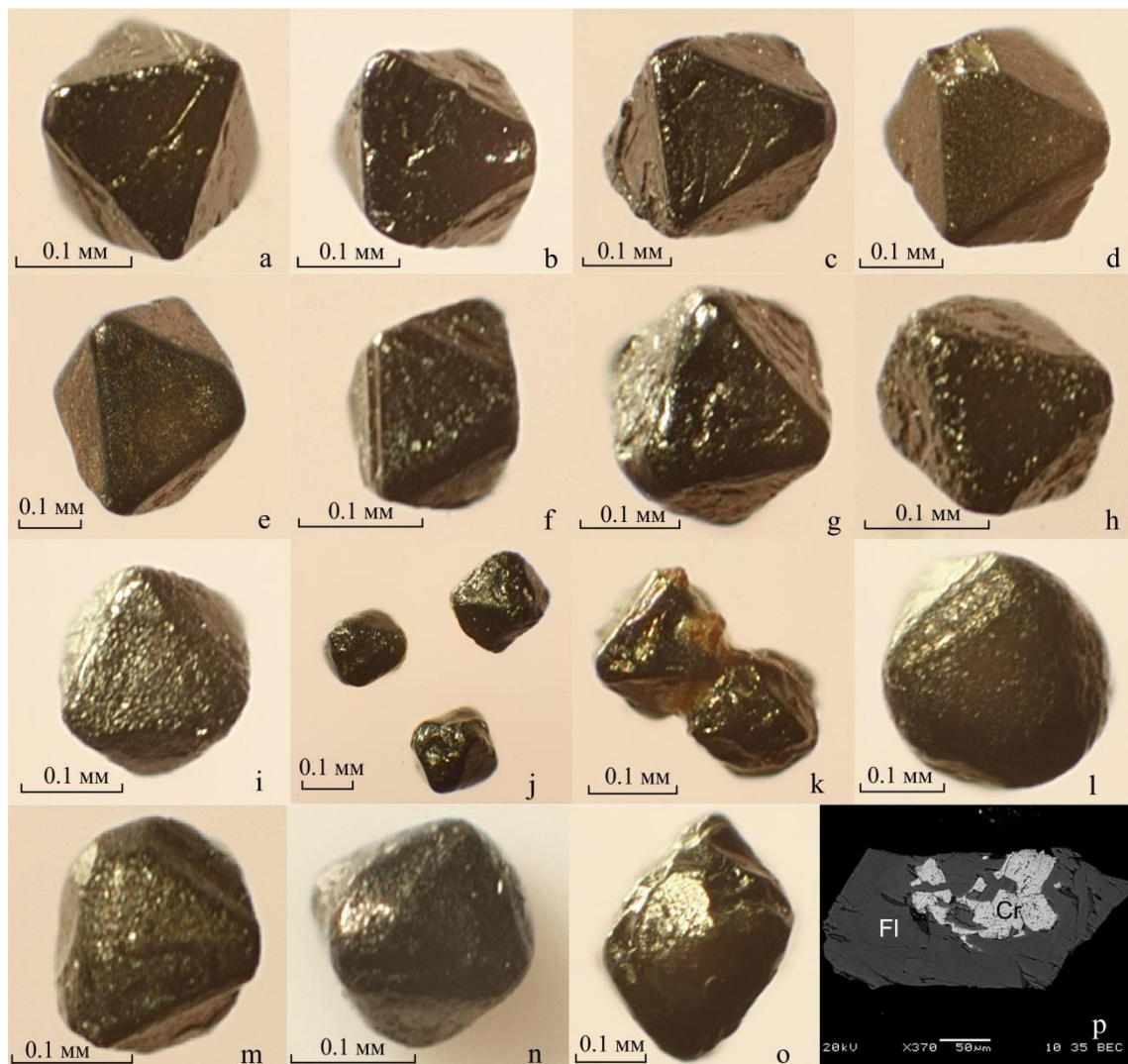


Рис. 3. Морфологические особенности хромшпинелидов из разрезов Тульское (т.н. 62), Дубовец (т.н. 65), Кошкино (т.н. 77): *a–d* – октаэдры с хорошо выраженными гранями и острыми или слегка сглаженными ребрами и вершинами; *e–j* – кристаллы октаэдрического облика со сглаженными ребрами и вершинами; *k* – сростки хромшпинелидов; *l–n* – октаэдрические кристаллы с вициналами; *o* – зерно мироздрического облика; *p* – флогопит с включениями хромшпинелидов.

[Fig. 3. Morphological features of chromspinelides from the Tulscoe (site 62), Dubovets (site 65), and Koshkino (site 77) sections: (a–d) – octahedrons with well-defined faces and sharp or slightly flattened edges and vertices; (e–j) – octahedral crystals with flattened edges and vertices; (k) – intergrowths of chromspinelides; (l–n) – octahedral crystals with vicinals; (o) – merohedric grain; (p) – phlogopite with chromspinelide inclusions.]

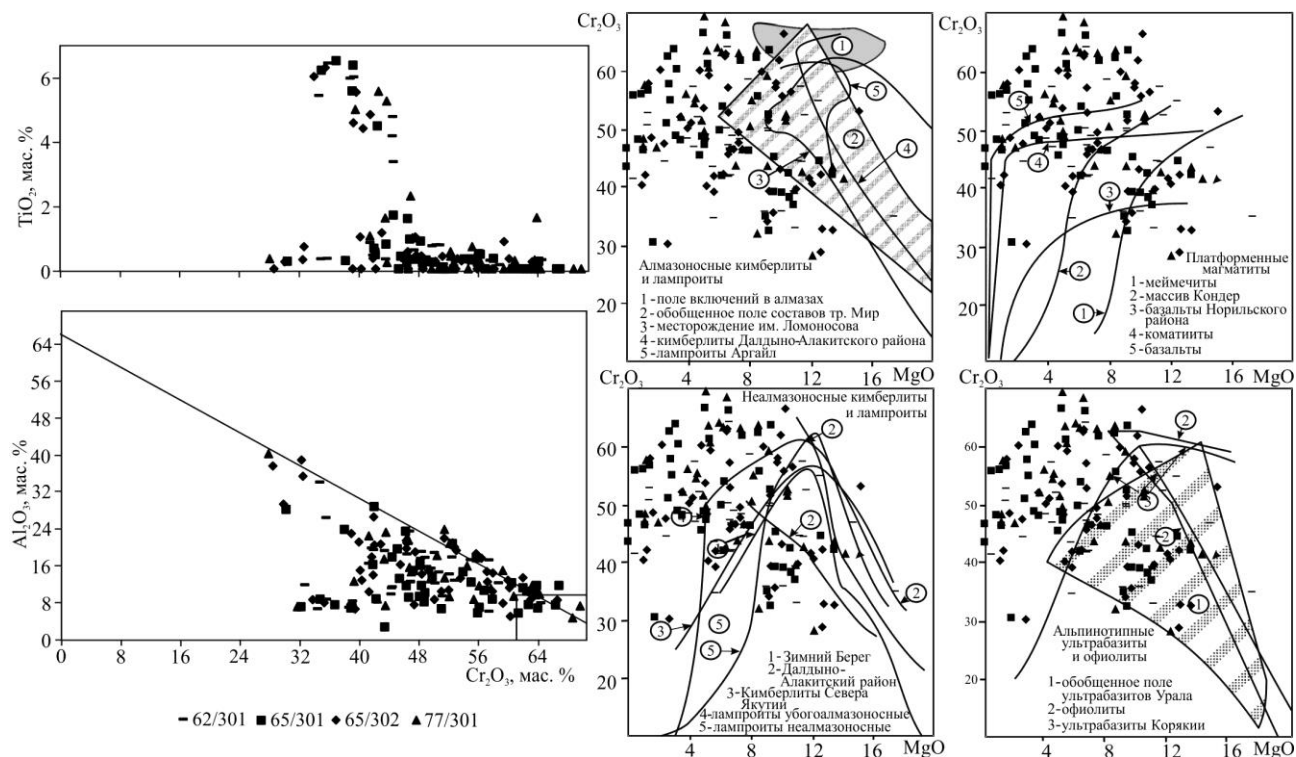


Рис. 4. Особенности химического состава хромшпинелидов из разрезов Тульское (т.н. 62), Дубовец (т.н. 65), Кошкино (т.н. 77) на генетических диаграммах Н. В. Соболева [10] и Ч. Фипке [17].

[Fig. 4. Peculiarities of chemical compositions of chromspinelides from the Tulscoe (site 62), Dubovets (site 65), and Koshkino (site 77) sections in genetic diagrams by N. V. Sobolev [10] and C. Fipke [17]. Inscriptions in the picture: Алмазные кимберлиты и лампроиты Diamond-bearing kimberlites and lamproites; 1 – поле включений в алмазах (1) – area of inclusions in diamonds; 2 – обобщенное поле составов тр.Мир (2) – generalised area of compositions in the Mir mine; 3 – месторождение им. Ломоносова (3) Lomonosov field; 4 – кимберлиты Далдыно-Алакитского района (4) kimberlites in the Daldyno-Alakitsky region; 5 – лампроиты Аргайл (5) lamproites in Argyle; Платформенные магматиты Platform magmatites; 1 – меймечиты (1) meimechites; 2 – массив Кондер (2) Kondyor Massif; 3 – базальты Норильского района (3) basalts of the Norilsk region; 4 – коматииты (4) komatiites; 5 – базальты (5) basalts; Неалмазные кимберлиты и лампроиты Diamond-free kimberlites and lamproites; 1 – Зимний берег (1) Winter Coast; 2 – Далдыно-Алакитский район (2) Daldyno-Alakitsky region; 3 – Кимберлиты Севера Якутии (3) kimberlites in the north of Yakutia; 4 – лампроиты убогоалмазные (4) diamond-poor lamproites; 5 – лампроиты неалмазные (5) diamond-free lamproites; Альпийские ультрабазиты и офиолиты Alpine-type ultrabasites and ophiolites; 1 – обобщенное поле ультрабазитов Урала (1) generalised area of ultrabasites in the Urals; 2 – офиолиты (2) ophiolites; 3 – ультрабазиты Корякии (3) ultrabasites in Koryakia.]

На диаграмме Н. В. Соболева в координатах $Cr_2O_3-Al_2O_3$ и $Cr_2O_3-TiO_2$ для изученных зерен наблюдается двойной – перidotитовый и пикритовый тренд (кимберлитовый). В область алмазной ассоциации попадают 11 знаков, 1 из пробы 62/301, 4 из 65/301, 2 из 65/302 и 4 из образца 77/301 (рис. 4).

На генетической диаграмме Ч. Фипке [17] для точек составов из всех трех местонахождений характерен перidotитовый тренд (отрицательная корреляция Cr и Mg). По сравнению с хромшпинелидами из алмазных тел (кимберлитов и лампроитов) для изученных зерен характерны меньшие содержания MgO. Три точки составов попадают в поле включений в алмазах (рис. 4).

Пикроильмениты обнаружены в разрезах Дубовец и Кошкино, их количество в пробах составляет от 7 до 16 знаков. Зерна представлены окатанными, реже угловато-окатанными обломками. Пикроильмениты по своему химическому составу являются низкомагнезиальными – не более 7.15 мас. % MgO, низкохроми-

стыми – не более 0.52 мас. % Cr_2O_3 и скорее всего не связаны с кимберлитами.

Флогопит обнаружен во всех трех местонахождениях, в количестве от 1 до 4 знаков на пробу. Для него характерны таблитчатые, реже призматические кристаллы, реже встречаются хорошо окатанные округлые зерна, цвет зерен от желтовато-бурого до зеленовато-желтого. По своему химическому составу флогопит характеризуется высоким содержанием Al_2O_3 (преобладает истонитовый минал), количество MgO низкое – до 9.02 мас. %, TiO_2 – 0.3–0.61 мас. %, в отдельных зернах отмечается повышенное содержание Cr_2O_3 до 7.05 мас. %. В одном зерне флогопита встречены многочисленные включения зерен хромшпинелида (рис. 3). Для изучения их химического состава было проведено 10 микрозондовых анализов. Состав данных зерен достаточно однообразен (в мас. %): TiO_2 от 0 до 0.3, Al_2O_3 – 5.7–16.4, Cr_2O_3 57.7–64.3, характерно аномально высокое содержание ZnO от 4.6 до 9.99 мас. %.

В пределах северо-западной части Воронежской области из песчаных образований аптского яруса было отобрано 16 проб. МИК выделены только из 4 разрезов, представленных криушанской свитой. В двух местонахождениях (т.н. 42 и 88) отмечаются единичные зерна хромшпинелида. Высокие содержания МИК характерны для двух разрезов – Лебяжье (т.н. 80) и Гремячий Колодезь (т.н. 191).

В разрезе Лебяжье в небольшом карьере местного значения вскрыты мелкозернистые пески (K_1kr) преимущественно светло-серой окраски. Для песков характерна хорошо выраженная горизонтальная, полого-волнистая и косая наклонная слоистость. Отмечаются многочисленные прослои разнозернистого песка, преимущественно средне-крупнозернистого. Из прослоев, обогащенных грубозернистыми разностями, было отобрано 3 шлиховые пробы. В шлиховой пробе из верхней части разреза выделено 1784 зерен хромшпинелидов. В минеральном составе проб преобладает (в %): ильменит – от 50.3 до 76.5, лейкоксен – от 2.9 до 16.3 и ставролит – от 6.9 до 10.5, в меньшем количестве отмечаются циркон, дистен и рутил. Такие минералы как гранат, силлиманит, эпидот, пирит, хромшпинелиды, пикроильменит редки, их количество составляет от десятых долей процента до редких знаков.

В разрезе Гремячий Колодезь в крупном песчаном карьере вскрыты песчаные образования криушанской

и девицкой свит, выше они перекрываются зеленовато-серыми песками альбского яруса. Из данного местонахождения отобрано 3 шлиховые пробы, приуроченные к нижней части разреза. В месте отбора криушанская свита представлена разнозернистыми песками, при преобладании средне-мелкозернистых. Цвет породы существенно меняется от светло-серого до ржаво-желтого и обусловлен неравномерным ожелезнением. Отмечаются прослои более грубозернистого песка. Преобладает косая разнонаправленная слоистость, объединенная в горизонтальные серии. В пробе, отобранной из основания разреза, выделены хромшпинелиды (763 знака).

Среди минералов тяжелой фракции резко преобладает ильменит (48.8–55.4%) и циркон (31.6–35.6%), менее распространены лейкоксен, рутил, ставролит, гранат и дистен (не более 6.8%). К редким минералам относятся турмалин, эпидот, шпинель, хромшпинелиды, пикроильменит.

Выделенные из разрезов Лебяжье и Гремячий Колодезь хромшпинелиды в основном характеризуются низкой окатанностью (2 класс по шкале сохранности). Отдельные зерна окатаны до 3 класса, также отмечаются неокатанные кристаллы. Все изученные хромшпинелиды были разделены на несколько типов, в зависимости от морфологических особенностей кристаллов и характеристики поверхности зерен (рис. 5).



Рис. 5. Хромшпинелиды из местонаждений Лебяжье (т.н. 80) и Гремячий Колодезь (т.н. 191): *a-c* – октаэдрического габитуса с острыми гранями и вершинами; *d-f* – октаэдры со сглаженными ребрами и вершинами; *g-j* – искаженные кристаллы; *k* – октаэдр с гранями ромбододекаэдра; *l* – сростки кристаллов; *m-o* – кристаллы с вициналями; *p* – комбинационный кристалл.

[Fig. 5. Chromspinelides from the Lebyazhie (site 80) and Gremyachy Kolodez (site 191) localities: (a-c) – of octahedral habitus with sharp edges and vertices; (d-f) – octahedrons with flattened edges and vertices; (g-j) – distorted crystals; (k) – octahedron with edges of a rhombic dodecahedron; (l) – cluster crystals; (m-o) – crystals with vicinals; (p) – a combinatorial crystal.]

К первому типу отнесены октаэдрические кристаллы, ребра и вершины которых сглажены. Для зерен характерна гипергенно-механогенная, в меньшей степени механогенная поверхность, зерна шероховатые или матированные, на гранях отмечаются каналы травления. На отдельных зернах наблюдаются углубления, преимущественно треугольной формы. Данный тип является самым распространенным.

Кристаллы октаэдрического габитуса с острыми гранями и вершинами отнесены ко второму типу. Поверхность граней данных кристаллов, как правило, слабо матирована, реже отмечаются октаэдры с гладкими, блестящими гранями. Иногда на поверхности зерен наблюдаются углубления правильной геометрической формы, в основном в виде треугольников и прямоугольников.

Искаженные кристаллы отнесены к третьему типу, для них характерны деформированные зерна. Наблюдаются уплощенные и удлиненные кристаллы, сростки октаэдров. Встречено одно зерно, на котором проявлены грани ромбододекаэдра в виде полосок на ребрах октаэдра. Поверхность граней сходна с хромшпинелидами первого типа.

К четвертому типу относятся хромшпинелиды октаэдрического габитуса, на вершинах и ребрах которых развиты мелкие плоские грани – вицинали. Отдельные зерна за счет многочисленных вициналей приобретает округлую форму. На других кристаллах вицинали только немного сглаживают ребра и вершина.

Комбинационные кристаллы отнесены к пятому типу. На их поверхности отмечаются множественные вицинальные грани, за счет которых исчезают грани октаэдра. Данные хромшпинелиды встречаются в виде отдельных знаков. К последнему типу отнесены зерна неправильной формы, не имеющие определенных элементов огранки.

Четвертый и пятый типы хромшпинелидов принадлежат к мантийным и характерны для кимберлитов [18, 19].

Для изучения особенностей химического состава хромшпинелидов исследовано 115 зерен. Для разреза Лебяжье содержание основных оксидов составляет (в мас. %): TiO_2 от 0 до 5.1, Al_2O_3 от 3.9 до 39.9, MgO от 0 до 17.5, Cr_2O_3 от 25.6–70.4, FeO от 11.2–47.1. В местонахождении Гремячий Колодезь наблюдается сходная картина химического состава зерен (в мас. %): TiO_2 от 0 до 7.4, Al_2O_3 от 4.2–33.4, MgO от 4.9 до 17.0, Cr_2O_3 от 32.8 до 68.2, FeO от 13.9 до 38.0.

Области составов хромшпинелидов отражены на диаграмме Н. В. Соболева в координатах $Cr_2O_3-Al_2O_3$ и $Cr_2O_3-TiO_2$ (рис. 6). Для хромшпинелидов из местонахождения Гремячий Колодезь характерен нечетко выраженный двойной – перидотитовый и пикритовый

тренд, в область алмазной ассоциации попадают 5 знаков. Для разреза Лебяжье отмечается перидотитовый тренд, при этом пикритовый тренд не характерен. Точки составов хромшпинелидов вытянуты вдоль оси хромит-алюмохромит-хромпикотит. Для части зерен характерно повышенное содержание TiO_2 . Около 32% исследованных хромшпинелидов относятся к высокохромистым (более 62 мас. %) и соответствуют зернам из включений в алмазах.

На диаграмме Ч. Фипке для изученных хромшпинелидов характерен перидотитовый тренд, в меньшей степени выражен параболический тренд (сочетание перидотитового и пикритового). Первый из них характерен для промышленно значимых месторождений кимберлитов и лампроитов, второй для слабоалмазных пород. В поле включений в алмазах попадает 13 точек составов, 2 из них из местонахождения Гремячий Колодезь, 11 из разреза Лебяжье (рис. 6).

Хромшпинелиды, выделенные из разреза Лебяжье, по особенностям своего химического состава во многом аналогичны зернам «курунгского» типа. Данный тип был выделен в Якутии [20], он характеризуется повышенным содержанием Cr_2O_3 и перидотитовым трендом на генетической диаграмме Н. В. Соболева. По современным представлениям данные хромшпинелиды не являются минералами-индикаторами кимберлитов, а поступали в разрез из ультраосновных массивов [18, 20].

При сравнении морфологических особенностей зерен «курунгского» типа и выявленных в разрезе Лебяжье видно, что они существенно отличаются друг от друга. Среди хромшпинелидов «курунгского» типа преобладают остросреберные и островершинные кристаллы, на гранях которых развита продольная штриховка. Кристаллы, форма которых отклоняется от октаэдрической, отсутствуют.

Содержание пикроильменита в изученных разрезах не превышает нескольких десятков знаков на пробу. Внешняя форма зерен преимущественно овальная и лепешковидная, с гипергенно-механогенным типом поверхности. Пикроильменит преимущественно низкомагнезиальный (MgO не более 5.13 мас. %) и скорее всего не связан с кимберлитами и лампроитами.

Заключение

В результате проведенных исследований изучены образования аптского яруса Воронежской антеклизы. Из отложений криушанской и волчинской свит (континентальные аллювиальные пески), а также мелководно-морских образований зушской толщи выделены минералы-индикаторы кимберлитов – хромшпинелиды и мелкие алмазы.

Аптский промежуточный коллектор характеризуется высокими содержаниями МИК. В разрезах преобладают хромшпинелиды, их количество в местонахождениях Тульское (т.н. 62), Дубовец (т.н. 65), Кошкино (т.н. 77) и Лебяжье (т.н. 80) достигает нескольких тысяч знаков на пробу. Для изученных зерен характерны широкие вариации химического состава,

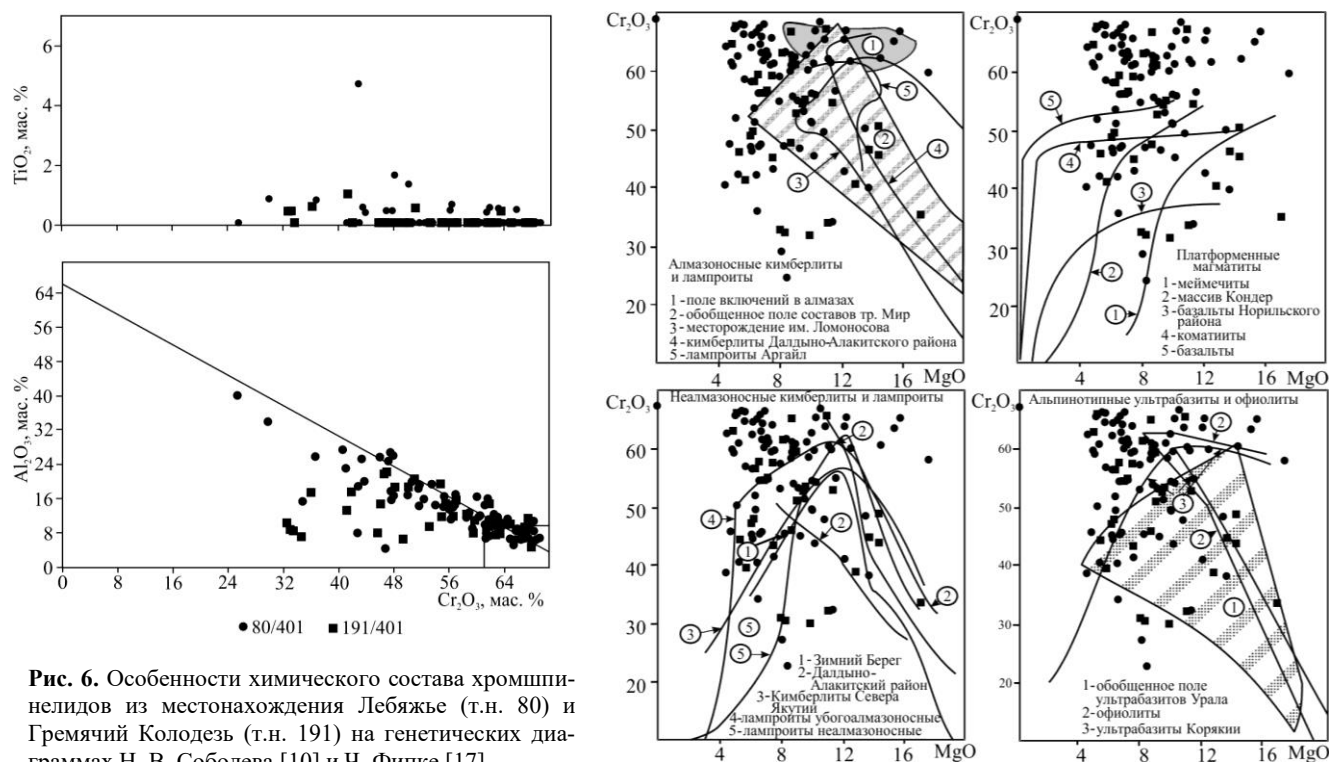


Рис. 6. Особенности химического состава хромшпинелидов из местонахождения Лебяжье (т.н. 80) и Гремячий Колодезь (т.н. 191) на генетических диаграммах Н. В. Соболева [10] и Ч. Фипке [17].

[Fig. 6. Peculiarities of chemical compositions of chromspinelides from the Lebyazhie (site 80) and Gremyachy Kolodez (site 191) localities in the genetic diagrams by N. V. Sobolev [10] and C. Fipke [17]. *The inscriptions in the picture are shown in fig.4*

при значительном количестве высокохромистых разновидностей. На генетических диаграммах Н. В. Соболева и Ч. Фипке для хромшпинелидов характерен кимберлитовый тренд, при этом часть точек составов попадает в область алмазной ассоциации. В местонахождении Лебяжье около 32% проанализированных зерен на диаграмме Н. В. Соболева соответствует хромшпинелидам из включений в алмазах, такое соотношение характерно для высокоалмазных кимберлитовых тел. В разрезе присутствуют зерна хромшпинелидов «мантийного» типа, представленные комбинационными кристаллами и октаэдрами с вицинальными гранями.

Наличие в разрезе континентальных отложений (криушанская, девицкая и волчинская свиты) позволяет достаточно достоверно установить направление сноса, который в аптское время происходило с юго-востока на северо-запад. Коренной источник сноса располагался юго-восточнее имеющихся местонахождений.

Степень износа МИК в континентальных аллювиальных отложениях близка и в целом соответствует 1–2 классу по шкале окатанности. Хромшпинелиды, выявленные из песков, которые накапливались в прибрежно-морских условиях, более окатаны (2–3 класс). Севернее разрезом, содержащих хромшпинелиды, выявлены мелкие алмазы. Распределение полученных находок МИК по площади в целом соответствует гидравлической крупности минералов.

Выявленные в аптских образованиях многочисленные хромшпинелиды, в том числе принадлежащие

алмазной ассоциации и мелкие кристаллы алмазов указывают на присутствие в пределах Воронежской антеклизы алмазоносных тел, которые располагались юго-восточнее местонахождений Тульское, Дубовец, Кошкино и Лебяжье.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Немиров А. А., Скрипин А. И., Сафьянников В. И. Геология промежуточных коллекторов алмазов. Новосибирск: Наука, 1994. 136 с.
2. Савко А. Д., Шевырев Л. Т., Ильяш В. В. Ассоциация минералов-индикаторов алмазности в осадочном чехле Воронежской антеклизы. *Проблемы алмазной геологии и некоторые пути их решения*. Воронеж, 2001. С. 423–433.
3. Харьков А. Д. Картирование алмазоносных территорий по индикаторным минералам кимберлитов (ИМК) и методическое обеспечение шлихо-минералогического метода поисков. *Проблемы алмазной геологии и некоторые пути их решения*. Воронеж, 2001. С. 553–560.
4. Савко А. Д., Зинчук Н. Н., Шевырёв Л. Т., Ильяш В. В., Афанасьев Н. С. Алмазность Воронежской антеклизы. Труды научно-исследовательского института геологии. Воронеж, Изд-во Воронеж. гос. ун-та. Вып. 17, 2003. 120 с.
5. Савко А. Д., Шевырев Л. Т., Ильяш В. В. Алмазы и их спутники из осадочного чехла Воронежской антеклизы. Труды научно-исследовательского института геологии. Воронеж, Изд-во Воронеж. гос. ун-та. Вып. 47, 2007. 122 с.
6. Шевырев Л. Т., Чершинский А. В. Алмазность центральной части Восточно-Европейской платформы (Воронежская антеклиза). Труды научно-исследовательского

- института геологии. Воронеж, Изд-во Воронеж. гос. ун-та. Вып. 90, 2015. 283 с.
7. Канцеров В. А. Ильменитоносные вулканогенно-осадочные породы позднего девона юго-востока Воронежской антеклизы: автореф. дис. канд. геол.-мин. наук: Харьков, 1984. 23 с.
8. Черешинский А. В., Милаш А. В. Типоморфные особенности минералов и вещественный состав титановых руд ястребовских отложений юго-востока Воронежской антеклизы. // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2019. № 1. С. 64–71. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology.2019.1/1712>
9. Михайлов М. В., Беляев Г. А., Кузьмина Т. С., Ладыгина М. Ю., Поляков А. А. Перспективы обнаружения на Русской платформе новых среднепалеозойских месторождений алмазов // *Региональная геология и металлогения*. 2000. № 12. С. 158–177.
10. Соболев Н. В. О минералогических критериях алмазности // *Геология и геофизика*. 1971. № 1. С. 70–80.
11. Черешинский А. В. Минералы-индикаторы кимберлитов палеозойского промежуточного коллектора Воронежской антеклизы // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2016. № 1. С. 76–82.
12. Черешинский А. В. Минералы-индикаторы кимберлитов мезозойского промежуточного коллектора Воронежской антеклизы // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2017. № 2. С. 107–114.
13. Соболев Н. В. Парагенетические типы гранатов. М.: Наука, 1964. 217 с.
14. Харьков А. Д., Зинчук Н. Н., Крючков А. И. Коренные месторождения алмазов мира. М.: Недра, 1998. 555 с.
15. Хмельков А. М. Основные минералы кимберлитов и их эволюция в процессе ореолообразования (на примере Якутской алмазоносной провинции). Новосибирск: АРТА, 2008. 252 с.
16. Харьков А. Д. Картирование алмазоносных территорий по индикаторным минералам кимберлитов (ИМК) и методическое обеспечение шлихо-минералогического метода поисков. *Проблемы алмазной геологии и некоторые пути их решения*. Воронеж, 2001. с. 553–560.
17. Fipke С. Е. Significance of chromite, ilmenite, G5 Mg-almandine garnet, zircon and tourmaline in heavy mineral detection of diamond bearing lamproite // *V International Kimberlite Conference*. Brazil. Spec. Publ. 1A. 1994. P. 366–381.
18. Афанасьев В. П., Похиленко Н. П., Логвинова А. М., Зинчук Н. Н., Ефимова Э. С., Сафьянников В. И., Красавчиков В. О., Подгорных Н. М., Пругов В. П. Особенности морфологии и состава некоторых хромшпинелидов алмазоносных площадей в связи с проблемой «ложных» индикаторов кимберлитов // *Геология и геофизика*. 2000. Т. 41. № 12. С. 1729–1741.
19. Ваганов В. И. Алмазные месторождения России и мира (основы прогнозирования). М.: ЗАО «Геоинформмарк», 2000. 371 с.
20. Афанасьев В. П., Зинчук Н. Н., Похиленко Н. П. Морфология и морфогенез индикаторных минералов кимберлитов. Новосибирск, Издательский дом Манускрипт, 2001. 276 с.

Черешинский Алексей Васильевич – к. г.-м. н., доцент, Воронежский государственный университет, Воронеж, Российская федерация; E-mail: vsu31022@mail.ru; ORCID <https://orcid.org/0000-0003-0697-3551>

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Alexey V. Cheresinskiy – PhD in Geol-Min., Associate Professor, Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation; E-mail: vsu31022@mail.ru; ORCID <https://orcid.org/0000-0003-0697-3551>

The author have read and approved the final manuscript.

Distribution and characteristics of kimberlite indicator minerals from the Aptian intermediate hosts of the Voronezh antecline

©2022 A. V. Cheresinskiy✉

Voronezh State University, 1 Universitetskaya pl., Voronezh 394018, Russian Federation

Abstract

Introduction: Within the Voronezh antecline (VA), numerous grains of kimberlite indicator minerals (KIMs) have been found in terrigenous deposits of different ages. The available KIM findings are distributed extremely unevenly, both in terms of area and the section. The deposits of the Aptian age in the territory of VA are the most promising for the study since they contain a record number of KIMs.

Methodology: In 2012–2018, during further geological studies at a scale of 1:200,000, 32 heavy concentrate samples from the Aptian deposits were collected and examined. The typomorphic features of indicator minerals were studied using a binocular microscope. The chemical compositions of the KIMs were determined using a Jeol 6380 LV electron microscope equipped with an Inca-250 energy-dispersive quantitative analysis system (Voronezh State University). A facies map of the Aptian age was compiled using the data collected by the author during the further geological study of the territory of the VA and the data provided by his predecessors.

Results and discussion: KIMs in the formations of the Aptian stage are dominated by chromspinelides. Their number in the Tuskoe, Dubovets, Koshkino, and Lebyazhie localities reaches several thousand signs per sample. The studied grains are characterised by wide variations in their chemical compositions and a significant number of high-chromium varieties. In the genetic diagrams by N. V. Sobolev and C. Fipke, chromspinelides are characterised by a kimberlite trend, while some of the composition points fall into the area of the diamond association. In the Lebyazhie locality, about 32% of the analysed grains in the diagram by N. V. Sobolev correspond to chromspinelides from inclusions in diamonds. Such a ratio is typical for highly kimberlite bodies with a high diamond yield. The sections contain grains of mantle chromspinelides represented by combinatorial crystals and octahedrons with vicinal faces.

Conclusion: As a result, the formations of the Aptian stage of the Voronezh antecline were studied. Kimberlite indicator minerals, chromspinelides, and small diamonds were isolated from the deposits of the Kriusha and Volchinsk formations (continental alluvial sands) and the shallow-marine formations of the Zusha stratum. The revealed KIMs indicate the presence of diamond-bearing bodies within the Voronezh antecline which were located to the south-east of the localities containing indicator minerals.

Key words: Voronezh antecline, Aptian, small diamonds, chromspinelides, picroilmenites.

For citation: Cheresinskiy A. V. Distribution and characteristics of kimberlite indicator minerals from the Aptian intermediate hosts of the Voronezh antecline. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2022, no. 1, pp. 34–46. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology.2022.1/9098>

Conflict of interests: The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.



The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

✉ Alexey V. Cheresinskiy, e-mail: vsu31022@mail.ru

REFERENCES

- Nemirov A. A., Skripin A. I., Saf'yaninikov V. I. *Geologiya promezhutochnykh kollektorov almazov* [Geology of intermediate diamond reservoirs]. Novosibirsk, Nauka publ., 1994. 136 p. (in Russ.).
- Savko A. D., Shevyrev L. T., Il'yash V. V. Assotsiatsiya mineralov-indikatorov almazonosnosti v osadochnom chekhle Voronezhskoy anteklizy. [Association of the minerals-indicators in the sedimentary cover of the Voronezh antecline]. *Problemy almaznoy geologii i nekotorye puti ikh resheniya* [Problems of diamond geology and some ways to solve them]. Voronezh, 2001, pp. 423–433. (in Russ.).
- Khar'kiv A. D. Kartirovanie almazonosnykh territoriy po indikatornym mineralam kimberlitov (IMK) i metodicheskoe obespechenie shlikho-mineralogicheskogo metoda poiskov. [Mapping of diamond-bearing territories by kimberlite indicator minerals (IMC) and methodological support of the concentrate-mineralogical method of prospecting]. *Problemy almaznoy geologii i nekotorye puti ikh resheniya*. [Problems of diamond geology and some ways to solve them]. Voronezh, 2001. pp. 553–560. (in Russ.).
- Savko A. D., Zinchuk N. N., Shevyrev L. T., Il'yash V. V., Afanas'ev N. S. Almazonosnost' Voronezhskoy anteklizy. [Diamondiferousness of the Voronezh antecline]. *Trudy Nauchno-issledovatel'skogo Instituta Geologii* [The work of the Research Institute of Geology], Voronezh, VSU Publ., vol. 17, 2003. 120 p. (in Russ.).
- Savko A. D., Shevyrev L. T., Il'yash V. V. Almazy i ikh sputniki iz osadochnogo chekhla Voronezhskoy anteklizy. [Diamonds and their minerals-satellites from the sedimentary mantle of the Voronezh antecline]. *Trudy Nauchno-issledovatel'skogo Instituta Geologii* [The work of the Research Institute of Geology], Voronezh, VSU Publ., vol. 47, 2007. 122 p. (in Russ.).
- Shevyrev L. T., Cheresinskiy A. V. Almazonosnost' tsentral'noy chasti Vostochno-Evropeyskoy platformy (Voronezhskaya antekliza). [Diamondiferousness of the Central part of the East European platform (Voronezh antecline)]. *Trudy Nauchno-issledovatel'skogo Instituta Geologii* [The work of the Research Institute of Geology], Voronezh, VSU Publ., vol. 90, 2015. 283 p. (in Russ.).
- Kanzerov V. A. Ilmentionosnii vulkanogenno-osadochnie porodi pozdnego devona ugo-vostoka Voronezhskoi anteklizi: Dis. kand. geol.-min. nauk [Ilmenitinous volcanic-sedimentary rocks of the late Devonian of the southeast of the Voronezh antecline. Extended Abstract of Ph.D. Thesis]. Kharkiv, 1986. 23 p. (in Russ.).
- Cheresinskiy A. V., Milash A. V. Typomorphic features of minerals and the material composition of the titanium ores of the yastrebow deposits of the southeast of voronezh antecline. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2019, no. 1, pp. 64–71. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology.2019.1/1712> (in Russ.).
- Mikhaylov M. V., Belyaev G. A., Kuz'mina T. S., Ladygina M. Yu., Polyakov A. A. Perspektivy obnaruzheniya na Russkoy platforme novykh srednepaleozoyskikh mestorozhdeniy almazov. [Prospects for the discovery of new Middle Paleozoic diamond deposits on the Russian platform]. *Regional'naya geologiya i metallogeniya – Regional geology and metallogeny*, 2000, no. 12, pp. 158–177. (in Russ.).
- Sobolev N. V. O mineralogicheskikh kriteriyakh almazonosnosti [About mineralogical criteria of diamond content]. *Geologiya i geofizika – Russian Geology and Geophysics*, 1971, no. 1, pp. 70–80. (in Russ.).
- Cheresinskiy A. V. Mineraly-indikatory kimberlitov paleozoyskogo promezhutochnogo kollektora Voronezhskoy anteklizy. [The indicator minerals of kimberlites of Paleozoic intermediate placer trap of the Voronezh antecline]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2016, no. 1, pp. 76–82. (in Russ.).
- Cheresinskiy A. V. Mineraly-indikatory kimberlitov mezozoyskogo promezhutochnogo kollektora Voronezhskoy anteklizy. [The indicator minerals of kimberlites of the Mesozoic intermediate placer trap of the Voronezh antecline]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2017, no. 2, pp. 107–114. (in Russ.).
- Sobolev N. V. *Parageneticheskie tipy granatov* [Paragenetic types of garnets]. Moscow, Nauka publ., 1964. 217 p. (in Russ.).
- Har'kiv A. D., Zinchuk N. N., Krjuchkov A. I. *Korennye mestorozhdeniya almazov mira* [World's primary diamond deposits]. Moscow, Nedra publ., 1998. 555 p. (in Russ.).
- Khmel'kov A. M. *Osnovnye mineraly kimberlitov i ikh evolyutsiya v protsesse oreolobrazovaniya (na primere Yakutskoy almazonosnoy provintsii)* [The main minerals of kimberlites and their evolution in the process of halo formation (on the example of the Yakutsk diamondiferous province)]. Novosibirsk, ARTA publ., 2008. 252 p. (in Russ.).
- Khar'kiv A. D. Kartirovanie almazonosnykh territoriy po indikatornym mineralam kimberlitov (IMK) i metodicheskoe obespechenie shlikho-mineralogicheskogo metoda poiskov. [Mapping of diamond-bearing territories by kimberlite indicator minerals (IMC) and methodological support of the concentrate-mineralogical method of prospecting]. *Problemy almaznoy geologii i nekotorye puti ikh resheniya*. [Problems of diamond geology and some ways to solve them]. Voronezh, 2001, pp. 553–560. (in Russ.).
- Fipke C. E. Significance of chromite, ilmenite, G5 Mg-almandine garnet, zircon and tourmaline in heavy mineral detection of diamond bearing lamproite. *V International Kimberlite Conference*. Brazil. Spec. Publ. 1A. 1994, pp. 366–381.
- Afanas'ev V. P., Pokhilenko N. P., Logvinova A. M., Zinchuk N. N., Efimova E. S., Saf'yannikov V. I., Krasavchikov V. O., Podgornykh N. M., Prugov V. P. Osobennosti morfologii i sostava nekotorykh khromshpindelidov almazonosnykh ploshchadey v svyazi s problemoy «lozhnykh» indikatorov kimberlitov. [Features of the morphology and composition of some chrome-spinels of diamond-bearing areas in connection with the problem of «false» indicators of kimberlites]. *Geologiya i geofizika – Russian Geology and Geophysics*, 2000, vol. 41, no. 12, pp. 1729–1741. (in Russ.).
- Vaganov V. I. *Almaznye mestorozhdeniya Rossii i mira (osnovy prognozirovaniya)*. [Diamond deposits in Russia and the world (basics of forecasting)]. Moscow: «Geoinformmark» publ., 2000. 371 p. (in Russ.).
- Afanas'ev V. P., Zinchuk N. N., Pokhilenko N. P. *Morfologiya i morfogeneza indikatornykh mineralov kimberlitov*. [Morphology and morphogenesis of kimberlite indicator minerals]. Novosibirsk, Manuscript publ., 2001. 276 p. (in Russ.).