

МИГРАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ИНДИКАТОРНЫХ МИНЕРАЛОВ КИМБЕРЛИТОВ В СВЯЗИ С ПРОГНОЗИРОВАНИЕМ МЕСТОРОЖДЕНИЙ АЛМАЗОВ

В.П.Афанасьев (Институт геологии и минералогии им. В.С.Соболева СО РАН)

Охарактеризованы условия формирования ореолов индикаторных минералов кимберлитов при седиментогенезе для континентальных, прибрежно-морских трансгрессивных и регрессивных обстановок, ингрессии и переотложения. Показано, что в любых литодинамических обстановках их максимальные концентрации тяготеют к коренным источникам.

Ключевые слова: индикаторные минералы кимберлитов, цикл седиментогенеза, механический ореол рассеяния, литодинамические условия формирования ореолов, переотложение ореолов.

Афанасьев Валентин Петрович. avp-diamond@mail.ru

MIGRATION PROPERTIES OF KIMBERLITE INDICATOR MINERALS IN VIEW OF FORECASTING OF DIAMOND DEPOSITS

V.P.Afanasyev

The formation conditions of kimberlite indicator minerals in terms of diamond deposits prospecting are characterized. The cycle of sedimentogenesis, the formation conditions of halos of continental, littoral transgression and regression settings in the conditions of ingression during the halos redeposition have been described. The principle conclusion is that the maximal concentrations of indicator minerals gravitate towards the primary sources in all lithodynamic settings.

Key words: kimberlite indicator minerals, sedimentogenesis cycle, mechanic scattering halo, formation conditions of halos, halos redeposition.

В проблеме миграционных свойств индикаторных минералов кимберлитов (ИМК), а также алмазов выделяются два аспекта: 1) миграционная способность отдельного зерна пирропа, пикроильмени-та, оливина, алмаза и т.д. и миграционная способность ассоциации ИМК, а через нее — подвижность, способность к перемещению всего ореола;

2) механические изменения отдельных минералов и всей транспортируемой ассоциации. В целом оба аспекта считаются важными для прогнозирования коренных месторождений алмазов. Однако их понимание основывается, как правило, на бытовой логике: чем дальше кимберлитовое тело, тем лучше окатаны минералы. Такой подход не учитывает реальную совокупность процессов седиментогенеза и поведение в них как отдельных минеральных частиц, так и всей транспортируемой минеральной ассоциации. Поэтому имеет смысл изучить в целом совокупность процессов, определяющих распределение индикаторных минералов и алмазов в связи с эрозией кимберлитовых тел. Чтобы яснее представлять условия формирования ореолов ИМК, рассмотрим характер цикла седиментогенеза.

Цикл седиментогенеза, как любой цикл, имеет начало, период развития, завершение. Начало цикла связано с возбуждением эрозионных процессов, завершение — с формированием осадка. На древних платформах, перспективных для прогноза алмазных месторождений, начало цикла всегда характеризуется континентальной обстановкой, т.е.

приподнятой сушей, в пределах которой начинают-ся активные процессы эрозии. Эти процессы затухают по мере нивелировки рельефа или подъема базиса эрозии. Соответственно, начальные фазы цикла седиментогенеза характеризуются относительно активным гидродинамическим режимом и перемещением обломочного материала, которое постепенно затухает и к концу цикла сменяется фиксацией и захоронением обломочных частиц.

Континентальный цикл седиментогенеза характерен для районов, длительное время сохранявших относительно высокое стояние. Однако подъем уровня Мирового океана не только подавляет эрозионные процессы на суше, но может привести к смене континентального седиментогенеза на морской. Наступание моря может иметь двойный характер. Если ему противостоит приподнятая суша, то происходит интенсивная береговая абразия, продуцирующая большое количество обломочного материала; наступание моря имеет трансгрессивный характер. Трансгрессия в береговой зоне наступающего бассейна активно перерабатывает, истирает и сортирует обломочный материал, поэтому сохраняются и накапливаются наиболее прочные частицы, отсортированные по размеру и плотности. Продвигающаяся в глубь суши береговая линия оставляет за собой выровненную поверхность (абразионный пенеплен), покрытую слоем галечника, гравия или песка. Формируется трансгрессивный разрез осадков: на размытой и выровненной поверх-

Теоретическое распределение индикаторных минералов кимберлитов относительно коренного источника:

1 — алмаз; 2 — пироп; 3 — пикроильменит; 4 — хромшпинелид

ности плотика залегают относительно крупные частицы (галечники, гравий), которые вверх по раз-резу сменяются более тонкими осадками, песками.

Трансгрессия неизбежно сменяется регрессией. Отступающая береговая линия обнажает сушу и оставляет за собой сформированный в процессе трансгрессии абразионный пенепплен. Возобновляются континентальные условия седиментогенеза, при которых в первую очередь размываются осадки трансгрессивного этапа развития бассейна. Сохраняются частицы с наиболее высокой гидравлической крупностью, а более мелкие отступают вместе с береговой линией. Этот этап континентального седиментогенеза имеет иной характер, чем до трансгрессии, поскольку развивается на базе абразионного пенепплена с малыми абсолютными отметками и, соответственно, с вялыми гидравлическими процессами, которые незначительно активизируются по мере отступления моря.

Наступание моря на ранее пенеппленизированную сушу (ингрессия) сопровождается подтоплением суши, сменой дельтовых, озерно-болотных фаций прибрежным мелководьем, а аллювиальных — озерно-болотными и т.д. Эрозия ранее сформированных осадков практически не происходит, они лишь захораниваются под более тонкими осадками, вплоть до морских песков. Принципиально важно, что в этом процессе сохраняются ранее сформированные континентальные фации. Регрессия после ингрессии также приводит к возобновлению континентального режима и размыву ранее сформированных осадков.

Таковы основные типы седиментогенеза в обстановке гумидного климата. Ледниковое или эоловое осадконакопление нами не рассматривается. Транспортировка и переработка минералов-индикаторов и их ассоциаций в разных условиях происходят по-разному.

В континентальных условиях транспортировка минералов-индикаторов осуществляется в направлении максимума геопотенциала, т.е. от коренного источника в сторону конечного бассейна стока по системе водотоков. Направленное перемещение обуславливает векторный характер изменения транспортируемой ассоциации минералов. Нами получено теоретическое решение задачи перемещения ассоциации ИМК в континентальных условиях [3], показывающее экспоненциальное падение их концентрации по мере удаления от коренного источника, сортировку по размеру и плотности:

$$P = P_0 e^{-bx},$$

где P_0 — исходная концентрация минералов в коренном источнике; P — концентрации минералов после переноса на расстояние x ; b — относительный коэффициент инертности; x — расстояние в условных единицах. Данное выражение по форме аналогично уравнению Штернберга для расчета потери массы гальки в процессе истирания при переносе [6] и в целом уравнению диффузии, форма

которого является одной из основных, описывающих рассеяние вещества в природе. Из приведенного уравнения и кривых распределения индикаторных минералов и алмазов разного размера, построенных на его основе (рисунок), видно, что максимальная концентрация минералов тяготеет к коренному источнику. Вблизи источника минеральная ассоциация максимально близка к коренной, по мере удаления от него

гранулометрический спектр замельчается и ассоциация обедняется относительно плотными рудными минералами.

Полученные результаты хорошо согласуются с нашими наблюдениями по современному потоку рассеяния кимберлитовой трубки Мир и по р. Хатыстыр (Центрально-Алданский район), дренирующей группу сближенных трубок взрыва. Близкое по форме выражение получено Д.Сазерлендом [9] для изменения в процессе переноса средней массы алмазов (гранулометрическая сортировка) по результатам изучения африканских россыпей:

$$y = ae^{-bx^{1/2}},$$

где y — средний вес кристалла в каратах; x — расстояние от источника, км; a — средний вес кристаллов в коренном источнике; b — величина, связанная с гидравлической крупностью зерен.

Что касается возможной дальности транспортировки отдельных зерен в зависимости от их механического износа, то Ф.Кюнел в экспериментах по аллювиальному износу минералов определил: неокатанное зерно кварца (близкое по прочности к пиропу) становится среднеокатым (20% потери массы), пройдя путь в 400 000 км [8]. Эта цифра показывает чрезвычайную устойчивость минерала в условиях континентального переноса и слабую подверженность износу. Нами изучено изменение окатанности оливинов и пиропов Верхнемунского кимберлитового поля по р. Муна на расстояние >100 км. На их зернах практически не появились признаки износа. Реально минералы переносятся значительно дальше [4], но для прослеживания этого процесса необходимо соблюдать одно условие: по мере удаления от источника объемы опробования должны расти по экспоненте. Опробование равными объемами приводит к тому, что на определенном расстоянии минералы перестают улавливаться в силу чисто статистических причин. Именно такую ошибку допустили наши предшественники, оценившие по Верхнемунскому полю дальность транспортировки оливина не более 6 км [1].

Учитывая закономерности транспортировки индикаторных минералов в континентальных условиях, констатируем следующее:

максимальные концентрации индикаторных минералов тяготеют к коренным источникам; на удалении могут формироваться локальные повышенные концентрации в разного рода геоморфологических ловушках, однако запасы в них будут определяться количеством перенесенных сюда минералов, а ассоциация будет иметь черты сортировки, обусловленные дальностью транспортировки;

минералы могут переноситься на многие десятки и сотни километров без заметного износа, однако возможности их обнаружения зависят от объемов опробования; при использовании равных объемов опробования можно установить лишь площадь максимальных концентраций, которая служит собственно минералогической аномалией, приуроченной к коренному источнику;

слабый износ или отсутствие видимых его признаков свидетельствуют о континентальных условиях формирования ореола, однако о близости коренного источника можно говорить только в случае сочетания

слабого износа с систематической встречаемостью повышенных концентраций и плохой сортировкой ассоциации минералов по гранулометрии и плотности; эти параметры служат основными критериями

локализации коренных источников; распределение индикаторных минералов по концентрации,

гранулометрии и плотности в водотоках имеет векторный характер, который сохраняется и после переотложения ИМК, что позволяет решать задачу локализации коренного источника, используя векторные данные по переотложенным

ореолам;

систематическое обнаружение индикаторных минералов при малых объемах опробования (лоток, скважина колонкового бурения) не говорит о дальнем и сверхдальнем переносах (сотни километров). Утверждение о возможности такого переноса должно опираться на прослеженный путь все возрастающих их концентраций, вплоть до коренного источника (источников). Систематическая встречаемость индикаторных минералов говорит о наличии местных коренных источников. Однако их местоположение можно установить лишь при минералогическом картировании признаков, чувствительных к транспортировке (концентрация, гранулометрия и ряд других [2]). По состоянию минералов, их изношенности невозможно оценить удаленность кимберлитового тела.

Прибрежно-морские трансгрессивные условия. Минералы из коренных источников, находящихся на суше на некотором удалении от береговой линии бассейна, транспортируются к нему по системе водотоков, где ассоциации изменяются в соответствии с континентальными обстановками. В первую очередь падает концентрация минералов, появляются признаки сортировки по гранулометрии и

плотности. В прибрежно-морскую переработку поступают минералы, прошедшие первичную обработку на суше. В волноприбойной зоне обломочный материал, включая индикаторные минералы кимберлитов, подвержен постоянному возвратно-поступательному движению. Обломочные зерна при этом механически изнашиваются вплоть до полного уничтожения абразивно менее устойчивых, в частности пикроильменита. Происходит хорошая сортировка их по гранулометрии и плотности. При гранулометрической сортировке

мно- жественные контакты между подвижными частица- ми (по принципу плотнейшей упаковки равновели- ких шаров) способствуют повышению темпов истирания. Сносимые с суши минералы накапли- ваются в условиях естественного шлихования [5]. В процессе продвижения береговой линии в глубь суши на выровненном дне бассейна формируется площадной ореол хорошо окатанных, гидравличе- ски сортированных абразивно устойчивых частиц из кимберлитовых минералов, как правило, пиро- пов и алмазов. По мере приближения береговой линии моря к коренным источникам сокращается расстояние транспортировки минералов по суше, соответственно, минералы менее дифференцирова- ны, возрастает их количество, становится разнооб- разнее гранулометрический спектр. Поэтому кон- центрация минералов, отчасти их гранулометрия в ореоле на дне трансгрессирующего бассейна повы- шаются, отражая приближение коренного источни- ка. При достижении береговой линией коренного источника его эрозия прекратится. Положение ким- берлитового тела в ореоле трансгрессивного типа будет отмечено минералогической аномалией по концентрации, возможно, гранулометрии индика- торных минералов с высокой или доминирующей ролью пиропов и алмазов.

Необходимо учитывать, что наступающий бас- сейн служит базисом эрозии для многих кимберли- товых тел. В пределах береговой линии интегри- руется материал из разных коренных источников масштаба куста или кимберлитового поля. При погружении на дно всего кимберлитового поля индикаторные минералы перестают поступать к береговой линии и развитие ореола прекращается. Таким образом, формируется интегральный ореол от группы кимберлитовых тел, отделенный от дру- гого подобного ореола пустым пространством или с редкими фоновыми минералами. Ореол будет иметь «кометную» форму с головкой в районе ким- берлитового поля и хвостом, указывающим направ- ление, в котором развивалась трансгрессия.

Данная модель позволяет сделать следующие выводы:

морской ореол трансгрессивного типа является интегральным от группы кимберлитовых тел мас- штаба кимберлитового поля или отдельного класте- ра (куста) кимберлитовых тел;

максимальные параметры ореола по концен- трации и гранулометрии минералов тяготеют к коренным источникам или совпадают с ними;

ореолы представлены наиболее абразивно устойчивыми, хорошо окатанными минералами; даже алмаз в этих условиях приобретает признаки износа;

векторные характеристики ореола можно выя- вить в масштабе всего ореола, который обычно никогда не наблюдается; на фрагментах ореолов, которые сохраняются после регрессии, векторные характеристики практически не видны. Поэтому по фрагментам трансгрессивных ореолов определить направление на коренные источники затруднитель- но. Тем не менее, обнаружение рядовыми объема- ми опробования устойчиво повторяющихся ассо- циаций индикаторных минералов трансгрессивно- го типа свидетельствует об их близости, так как по мере удаления от источников концентрация мине- ралов падает также по экспоненте.

На стадии трансгрессии моря трансгрессивные ореолы на дне моря должны быть распространены широко, в соответствии с количеством кимберли- тов, питавших развивающиеся ореолы. Однако сле- дующая за трансгрессией регрессия не позволяет сохраниться трансгрессивным ореолам в полном объеме, встречаются лишь фрагменты первых.

Прибрежно-морские регрессивные условия. Регрессия морского бассейна приводит к осуше- нию территории и возобновлению условий конти- нентального седиментогенеза, в первую очередь, эрозионных процессов. Естественно, вначале эро- дируются осадки, сформированные на трансгрес- сивной стадии, в том числе с ореолами индикатор- ных минералов трансгрессивного типа. Попадая в береговую зону, они отступают вместе с ней, лишь частично «застывая» на суше. Одновременно вскрываются кимберлитовые тела и подпитывают отступающую береговую линию свежими порция- ми минералов. В обстановке посттрансгрессивного абразионного пенеппена с малыми перепадами аб- солютных отметок активность эрозии невелика,

«свежих» минералов мало и они тяготеют к корен- ным источникам. Глубокой переработки минералов не происходит. Наименее транспортабельные круп- ные тяжелые минералы, преимущественно полу- окатанный пикроильменит, отстают от уходящей береговой линии и остаются на суше, формируя морские регрессивные ореолы [5]. Относительно мелкие и легкие минералы, сосредоточенные в пре-

делах береговой линии моря, отступают вместе с ней к месту стабилизации бассейна или его коллапса. Специфические осадки регрессивного типа не образуются, регрессивный ореол формируется практически на суше и представлен смесью остатков трансгрессивных ореолов, «свежих» минералов собственно континентального литодинамического типа и полуокатанных минералов, преимущественно крупного пикроильменита, прошедших частичную обработку в волноприбойной зоне, при преобладании последних.

В результате можно констатировать, что при регрессии моря в условиях абразионного пенепплена с низкой энергетикой гидравлических процессов индикаторные минералы слабо мигрируют, поэтому в генерализованном плане их максимальные концентрации и крупные гранулометрические классы тяготеют к коренным источникам. Ореол индикаторных минералов в регрессивных морских осадках интегральный. Он представлен смесью минералов трех литодинамических типов — континентального, морского трансгрессивного и собственно регрессивного. Из-за переработки в полосе береговой линии моря векторные характеристики регрессивных ореолов затушеваны и определение «пеленга» на объект затруднительно. Поиск коренного источника в таких случаях оптимально осуществлять путем выделения из минеральной смеси минералов, принадлежащих к континентальному литодинамическому типу. В условиях абразионного пенепплена они не могли существенно удалиться от источника. Их количество может быть небольшим в связи с незначительной эрозией кимберлитов, зато максимальные концентрации и крупный размер минералов служат дополнительным критерием прогноза.

Ингрессивные условия возникают при наступлении моря на ранее пенеппенизированную сушу. Ингрессия приводит лишь к подтоплению, обводнению суши; повышение базиса эрозии подавляет эрозионные процессы, способствуя сохранению ранее сформированных осадков, в том числе континентальных, которые захораниваются под озерно-болотными, а выше по разрезу — под морскими. При этом значительного перераспределения или направленного перемещения минералов не происходит. На минералах ингрессия может отразиться в виде их слабого вторичного износа, в том числе на полировке пиропов, если колебания воды на поверхности мелководного бассейна достигают минералов в осадках, ранее сформированных в континентальных условиях. В отличие от трансгрессии, формирующей типичный разрез морских осадков, при ингрессии в основании разреза, как правило, сохраняются ранее сформированные продуктивные континентальные фации, которые вверх по разрезу сменяются непродуктивными перекрывающими осадками.

Из краткого рассмотрения миграционных свойств минералов в различных литодинамических условиях следует, что во всех случаях их максимальные концентрации сохраняются вблизи коренных источников. В принципе минералы могут перемещаться на очень большие расстояния, однако уловить их на значительном удалении рядовыми объемами опробования практически невозможно. Использование ограниченных, как правило, небольших объемов опробования позволяет обнаружить только наиболее контрастные части ореолов, актуальные в плане прогноза, хотя при этом остается опасность пропуска малоконтрастных ореолов. Однако объем опробования — фактор субъективный и возможна его корректировка при соответствующей формулировке поисковой задачи. Увеличение объемов опробования приведет к расширению границ ореолов и обнаружению малоcontrastных ореолов.

Ореолы переотложенных индикаторных минералов. Выше рассмотрены модели ореолов, сформированных в одноактном процессе. Реально обломочный материал ореолов, как правило, переотложен, иногда неоднократно. В условиях древних стабильных платформ чередование циклов седиментогенеза (и их характер) определяется главным образом колебаниями уровня Мирового океана, поэтому синхронно и однотипно происходит на значительных территориях. Коллекторы с переотложенными минералами формируются в основном в фациях ближнего переноса. Это свидетельствует о том, что минералы практически проецируются из размытого более древнего коллектора на новую эрозионную поверхность без значительного перемещения. На принципе унаследованности при переотложении и строится прогноз местоположения источника. Как правило, продуктивные коллекторы, лежащие на кимберлитовмещающих породах, т.е. предшествующий коллектор размыт полностью, а слагавшие его минералы перешли в формирующийся коллектор. Иногда на одной продуктивной свите залегает другая, хотя обе содержат переотложенные минералы. Это означает, что нижняя свита находилась в условиях низких абсолютных отметок и потому не была эродирована, а минералы верхней свиты «наползли» на нее с эродироваемой территории в стороне от данной.

Такая ситуация имеет место в западной части Мало-Ботубинского района, где на продуктивных среднекаменноугольных отложениях лапчанской свиты с переотложенным трансгрессивным алмазпироповым ореолом залегают продуктивные отло-

жения ботубинской свиты с существенно пикроильменитовой ассоциацией. Последняя «наползла» на отложения лапчанской свиты, вероятно, с восточных румбов, где в ботубинское время развивалась эрозия. Однако расстояние, на которое переместились отложения, вряд ли велико и определяется масштабами Мирнинского кимберлитового поля, т.е. первыми километрами. Другой случай, более масштабной транспортировки, наблюдается по северо-западному борту Вилюйской синеклизы, где в связи с воздыманием Анабарской антеклизы в меловое время начался размыв юрского коллектора по периферии синеклизы, вовлеченной в воздымание, и миграция индикаторных минералов к внутренним ее частям [7]. В результате минералы с периферических частей коллектора оказались «наползшими» на поверхность того же коллектора, сохранившегося в пределах синеклизы. Такая же ситуация в бассейне р. Конончан, где большое количество окатанного пикроильменита, пиропов с признаками гипергенной коррозии лежит на поверхности юрских отложений. Но и в этом случае речь не идет о значительных перемещениях. Последовательный размыв юрских отложений с периферии в юго-восточных румбах на протяжении мела — палеогена приводит к перемещению индикаторных минералов наподобие плаща на расстояние в первые километры,

возможно, первые десятки километров по периферии. Затухает их миграция по мере приближения к полю сплошного развития юрского коллектора в пределах синеклизы. Поэтому минералы в районе р. Конончан, по-видимому, поступали из размытых юрских отложений ближнего окружения, где обнажаются нижнепалеозойские породы. Таким образом, в процессе переотложения в фациях ближнего переноса минералы практически сохраняют свое предшествующее положение, т.е. работает принцип унаследованности.

В ряде случаев повышение активности эрозионных процессов может приводить к миграции индикаторных минералов на некоторое расстояние в зависимости от факторов, возбуждающих эрозию, и времени их действия. Так, воздымание Анабарской антеклизы как мощный, длительно действующий фактор могло обусловить более значительное перемещение минералов, чем локальные факторы в пределах Мирнинского поля на протяжении ботубинского времени.

Подводя итог, констатируем, что в отношении индикаторных минералов кимберлитов действует основной закон россыпеобразования — разубоживание полезного компонента по мере удаления от коренного источника. Рассмотрение различных литодинамических обстановок формирования ореолов показывает, что максимальные концентрации индикаторных минералов в любом случае тяготеют к коренным источникам. Поэтому выявление устойчивых концентраций индикаторных минералов при использовании ограниченных объемов опробования надежно свидетельствует о наличии местных коренных источников. Представлениям о происхождении тех или иных устойчивых концентраций минералов на определенной площади за счет весьма удаленных известных коренных источников следует противопоставить требование проследить «дорожку» этих минералов во все возрастающих количествах вплоть до указанных источников, поскольку «пустых» промежутков между ними быть не может.

Обнаружение индикаторных минералов с точки зрения их миграционных свойств служит первым и важнейшим прогнозным признаком. Однако далее должна следовать сложная работа по идентификации и локализации коренных источников.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алмазные месторождения Якутии / А.П.Бобриевич, М.Н.Бондаренко, М.А.Гневушев и др. – М.: Госгеолтехиздат, 1959.
2. Афанасьев В.П. К методике минералогического картирования шлиховых ореолов кимберлитовых тел // Геология и геофизика. 1989. № 5. С. 36-42.
3. Афанасьев В.П., Бабенко В.В. Миграционные свойства кимберлитовых минералов // ДАН СССР. 1988. Т. 303. № 3. С. 714–718.
4. Афанасьев В.П., Варламов В.А., Гаранин В.К. Зависимость износа кимберлитовых минералов от условий и дальности транспортировки // Геология и геофизика. 1984. № 10. С. 119–124.
5. Афанасьев В.П., Зинчук Н.Н. Основные литодинамические типы ореолов индикаторных минералов кимберлитов и обстановки их формирования // Геология рудных месторождений. 1999. Т. 41. № 3. С. 281–288.
6. Девдариани А.С. Математический анализ в геоморфологии. – М.: Недра, 1967.
7. Стратиграфия и литология «водораздельных галечников» Мархино-Тюнгского междуречья и палеогеография времени их накопления в связи с историей формирования алмазоносных россыпей в центральной и северо-восточной частях Сибирской платформы / М.И.Плотникова, О.И.Кардопольцева, О.Г.Салтыков и др. // Геология алмазных месторождений. 1963. С. 123–141.
8. Kuenen Ph.H. Experimental abrasion on sand // Amer. J. Sci. 1959. Vol. 257. P. 212.
9. Sutherland D.G. The transport and sorting of diamonds by fluvial and marine process // Econ. Geol. 1982. Vol. 77. N 7. P. 1613–1620.