

УДК 553.81

КЛАСТЕРНЫЙ АНАЛИЗ СТРУКТУРНЫХ ПРИМЕСЕЙ АЗОТА В АЛМАЗАХ ЮЖНОЙ АФРИКИ: СВЯЗЬ РОССЫПЕЙ С КОРЕННЫМИ ИСТОЧНИКАМИ

Малых Олег Николаевич¹,
Oleg_Malykh@vsegei.ru

Asriël Vander Westhuizen²,
assievanderwesthuizen@gmail.com

¹ Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского,
Россия, 199106, г. Санкт-Петербург, Васильевский остров, Средний пр., 74.

² Trans Hex Operations,
P O Box 333, Alexander Bay 8290, Northern Cape, Republic of South Africa.

Актуальность. Разработана методика определения источников алмазоносных россыпей, которая уточняет историю их развития, направление сноса алмазов и вероятные новые области их накопления. Наряду с палеогеографическими исследованиями территорий данный метод сможет значительно расширить представление о развитии истории алмазоносных районов, в которых находятся как коренные, так и россыпные месторождения, определить перспективные направления их разработки.

Цель: определить вероятные коренные источники промышленных прибрежных морских и континентальных алмазоносных россыпей ЮАР.

Объекты: ряд самых крупных россыпей ЮАР и самые крупные алмазоносные трубки Южной Африки.

Методы. С помощью кластерного анализа исследовалось распределение азота в алмазах россыпей и трубок Южной Африки, выделялись совокупности с максимальным совпадением свойств, которые считались идентичными.

Результаты. Впервые разработана методика сопоставления примесей азота в алмазах россыпей и коренных источников статистическим методом (кластерный анализ). С помощью данной методики определены вероятные источники прибрежных и континентальных россыпей ЮАР. Полученные выводы были проверены с помощью другого метода сопоставления алмазов россыпей и коренных источников, который подтвердил сделанные заключения. Даны рекомендации для дальнейшего усовершенствования метода (использование большего массива данных, использование данных по алмазам других регионов, привлечение данных по другим характеристикам алмазов). Уточнена история эрозии и сноса алмазов из коренных трубок, формирования алмазоносных россыпей в мелу на территории Южной Африки, что открывает перспективы обнаружения крупных морских россыпей в глубоководной части устья р. Олтфантс. В дальнейшем методика может применяться при изучении истории формирования алмазоносных россыпей России и других алмазороссыпных регионов мира, определении перспективных направлений разведки и разработки данных месторождений.

Ключевые слова:

Кластерный анализ, алмазы, россыпи, кимберлитовые трубки, Южная Африка.

Введение

Поиск связи между коренными и россыпными месторождениями алмазов является актуальной задачей, поскольку позволяет установить источники россыпей, уточнить историю их развития, направления и перспективы разработки этих месторождений.

Сейчас признается, что концентрация структурной примеси азота в алмазах из кимберлитовых трубок, полученная при оптическом абсорбционном методе изучения инфракрасного спектра поглощения, является типоморфной [1–5], поэтому данная характеристика может быть использована для решения вопросов генезиса алмазов и установления возможных коренных источников россыпных месторождений. Единственная попытка поиска связи между коренными и россыпными месторождениями алмазов различных регионов мира с помощью статистического анализа была предпринята Г.К. Хачатрян [6]. С помощью построения гистограмм распределения частот она сопоставила основные характеристики оптически активных центров (форм азота и водорода) алмазов из россыпей различных районов мира с соответствующими

характеристиками алмазов из возможных коренных источников.

В настоящей работе для классификации месторождений алмазов по структурной примеси азота был применен кластерный анализ с использованием данных, полученных при изучении месторождений алмазов Южной Африки (ЮА) [7]. Для данного региона накоплен большой объем экспериментальных данных, характеризующих свойства алмазов [8–12], однако при отсутствии статистической обработки их практическая ценность невысока. В настоящее время большая часть прибрежных континентальных россыпей алмазов ЮА уже отработана, и основная добыча россыпных алмазов нацелена на морские россыпи. Изучение свойств алмазов из этих россыпей позволит уточнить историю их формирования и перспективы обнаружения месторождений в акватории Атлантического побережья этой части Африки.

Разработанный метод классификации месторождений алмазов в дальнейшем можно будет применять и для изучения россыпей других регионов, включая месторождения алмазов в России.

Краткий обзор геологии района, истории развития и формирования алмазоносных россыпей ЮА

Африка является ведущим производителем алмазов в мире. В настоящее время около 60 % мировой добычи алмазов происходит на Африканском континенте [13, 14]. Причем две страны, расположенные на юге Африки, занимают одни из первых мест по добыче алмазов в мире (Ботсвана – 2-е; ЮАР – 6-е, по данным на 2020 г.) [15, 16]. Добыча алмазов в этой части Африки ведется уже более 150 лет. Первая промышленная разработка россыпных алмазов началась в ЮАР в 1867 г., а коренных алмазоносных кимберлитов – в 1870 г. [13].

В геоморфологическом плане эту часть континента можно разделить на внутреннее плато и прибрежную область. Внутреннее плато представляет собой высокое плоскогорье с абсолютными высотами 900–950 м. Оно отделено от прибрежной области обрывом (Великим Уступом).

Геологическое строение Южной Африки довольно сложно. Нижнюю часть геологического разреза территории образует древний фундамент, верхнюю – мощный чехол, сложенный осадками бассейнов как древнего, так и молодого возраста [17].

Древний фундамент состоит из кратона и обрамляющих его мобильных поясов. Кратон Калахари (область, развитие которой стабилизировалось в архее – раннем протерозое) сложен гнейсами, гранулитами, зеленокаменными поясами, прорванными батолитами гранитоидов. Со всех сторон кратон окружают мезо- инеопротерозойские мобильные пояса.

Южная часть кратона перекрыта осадками древних бассейнов, сформировавшимися в архее – раннем протерозое (суммарной мощностью до 12 км), представленными метаморфизованными осадками (кварциты, сланцы) в древних толщах и доломитами, известняками, лавами базальт-андезитового состава (в верхней части) в протерозойской части разреза.

Две трети территории ЮА фрагментарно покрыты осадочными отложениями супергруппы Карру карбон-юрского возраста в виде крупных впадин, мощность осадков в которых достигает 1,2 км. Основание разреза этих отложений сложено ледниковыми отложениями, а верхняя часть – лавами андезит-базальтового состава.

Северо-западную часть ЮА перекрывает самый молодой обширный бассейн Калахари позднемел-голоценового возраста, выполненный терригенными отложениями мощностью около 100 м (до 300 м).

Источники алмазов

Все крупные промышленные алмазоносные трубки ЮА локализованы в пределах древнего кратона Калахари, который сформировался в архее – нижнем протерозое. Промышленные трубки внедрялись на поверхность в пять этапов: средний протерозой, кембрий, триас, верхний и нижний мел (рис. 1).

Неоднократно данные трубки подвергались эрозии с выносом алмазов, в результате чего на территории ЮА сформировались промышленные алмазоносные россыпные районы и поля (рис. 1, а).

Основные этапы эрозии алмазоносных трубок ЮА:

- на рубеже карбона–перми (C_2-P_1), когда территорию ЮА покрывало оледенение Двайка, ледники которого, вероятно, могли транспортировать алмазы на южную окраину континента и к Атлантическому океану [7, 18, 19] (рис. 1, а);
- в позднем мелу на этой части континента рядом исследователей [7, 20] предполагается существование палеореки Кару, которая выносила алмазы из трубок в устье современной р. Олифантс на побережье Атлантического океана (рис. 1, а);
- начиная со среднего миоцена и по настоящее время гидросеть территории уже имеет современный вид [20]. Вынос алмазов из коренных трубок осуществлялся р. Оранжевой и ее притоками (рис. 1, а).

Методы

Концентрация азота (изоморфная примесь) в алмазах зависит от условий образования и является его типоморфной характеристикой. Общее содержание связанного азота в кристаллах (N_{tot}) отражает тип глубинного источника и особенности химизма среды кристаллизации алмаза.

Азотные В-центры представляют собой характерную комбинацию в решетке алмаза, где четыре атома азота-тетраэдрически группируются вокруг вакансии углерода. Соотношение общего содержания азота в кристалле (N_{tot}) и относительного содержания азота в В-форме (% NB) служит индикатором температурного режима его формирования [5, 6]. Все данные в работе исследовались на этом типе диаграммы распределения азота в алмазах.

После размещения на диаграмме N_{tot}/NB исходных материалов по азотным примесям в алмазах россыпей и коренных трубок ЮА получилась довольно хаотичная картина (рис. 2). Сопоставить параметры россыпей и трубок в таком виде было невозможно.

Решено было применить кластерный анализ. Сделать *предварительную оценку* – разделить на кластеры каждый объект и рассчитать в каждом кластере центр. При близком расположении центров кластеров россыпи и трубки уже проводилась *качественная оценка* (площади взаимного пересечения данных кластеров). При значительной площади пересечения кластеров трубки и россыпи делался вывод о том, что данная трубка является вероятным источником данной россыпи.

Основное назначение *кластерного анализа* – разбиение множества исследуемых объектов и признаков на однородные группы (кластеры) так, чтобы каждый объект принадлежал только одной группе (кластеру). При этом объекты, принадлежащие одному кластеру, должны быть однородными, а объекты, принадлежащие разным кластерам, – разнородными.

Для выполнения задачи данного исследования был взят метод к-средних, т.к. его результатом является вычисление *центров кластеров* свойств объектов (что решало предварительную задачу работы).

Были использованы данные инфракрасной спектроскопии алмазов из самых крупных промышленных коренных трубок ($n=10$) и россыпей ($n=18$) Южной Африки [7] (рис. 1, б). Количество проб в выборках из трубок варьировалось в интервале 45–249 штук, из россыпей – 17–133.

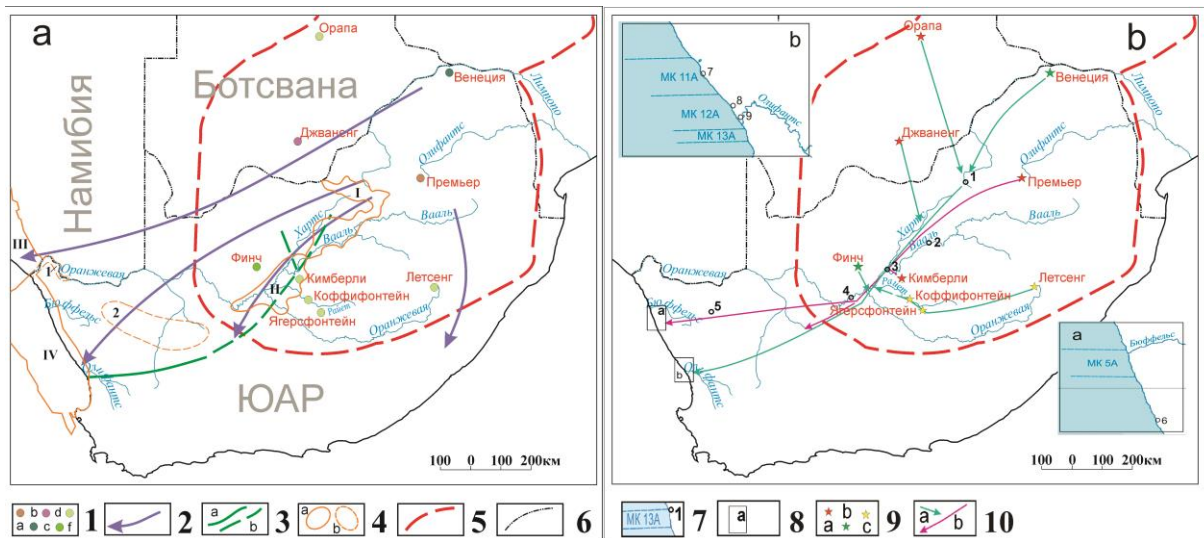


Рис. 1. Схема расположения главных промышленных алмазоносных трубок, россыпных районов, полей Южной Африки, основных направлений сноса алмазов в карбоне-кайнозойе (а) и обзорная карта опробованных промышленных алмазоносных кимберлитовых трубок и россыпей Южной Африки с данными по структурным примесям N в алмазах с направлениями рассеивания алмазов от основных коренных источников Южной Африки в мелу (постмеловое время) (b): 1 – возраст самых крупных промышленных алмазоносных кимберлитовых трубок: а) мезопротерозойский; б) кембрийский; с) триасовый; d) нижнемеловой; f) верхнемеловой; 2 – основные направления движения ледников оледенения Двайка (C_2-P_1) [7, 18, 19]; 3 – русло позднемеловой р. Кару: а) достоверное; б) предполагаемое [20]; 4 – алмазоносные россыпные: а) районы (I – Юго-Западный Трансвааль; II – Баркли Вест-Дуглас-Приска; III – Намаквалэнд; IV – Сперрребит); б) поля (1 – низовья р. Оранжевой; 2 – Бушменлэнд); 5 – граница кратона Калахари; 6 – государственные границы; 7 – россыпи: 1 – Ноитгедахт; 2 – Христиания; 3 – Сидней-на-Ваале; 4 – ср. течение р. Оранжевой; 5 – Бослуиспан; 6 – Хондеклип; 7 – Граув Дюнен; 8 – Гелвал Карру; 9 – Де Пюнт; МК 5А – морские концессии по добыче алмазов, их названия и границы; 8 – площади прибрежных россыпей: а) устье р. Бюффельс; б) устье р. Олифантс; 9 – самые крупные алмазоносные трубки Южной Африки (и их названия) с суммарными запасами (млн кар): а) более 300; б) 100–300; с) менее 100; 10 – палеонаправления сноса алмазов: а) предположительно меловые; б) постмеловые

Fig. 1. Layout of the main commercial diamondiferous pipes, placer areas, fields of the southern Africa, the main directions of diamond demolition in the Carboniferous–Cenozoic (a), overview map of the tested diamondiferous kimberlite pipes and placers in South Africa with data on the nitrogen impurity centers in diamonds with the directions of diamond dispersion from the main kimberlite sources of the southern Africa in the Cretaceous time (Post-Cretaceous) (b): 1 – age of the largest industrial diamondiferous kimberlite pipes: a) Mesoproterozoic; b) Cambrian; c) Triassic; d) Lower Cretaceous; f) Upper Cretaceous; 2 – main directions of movement of glaciers of the Dwyka glaciation (C_2-P_1) [7, 18, 19]; 3 – channel of the Late Cretaceous Karoo River: a) reliable; b) assumed [20]; 4 – diamondiferous placer: a) areas (I – South-Western Transvaal; II – Barkly West-Douglas-Priesca; III – Namaqualand; IV – Sperrgebiet); b) fields (1 – Lower Orange river; 2 – Bushmenland); 5 – boundary of the Kalahari craton; 6 – state borders; 7 – placer: 1 – Nooitgedacht; 2 – Christiania; 3 – Sydney-on-Vaal; 4 – Middle Orange river; 5 – Bosluispan; 6 – Hondeclip; 7 – Graauw Duinen; 8 – Gelwal; 9 – De Punt; MC 5A – marine diamond mining concessions, their names and borders; 8 – area of the coastal placers: a) mouth of the Buffels river; b) Olifants estuary; 9 – the largest diamondiferous pipes of southern Africa (and their names) with total reserves (million cts): a) more than 300; b) 100–300; c) less than 100; 10 – paleolines of diamond demolition: a) presumably Cretaceous; b) post-Cretaceous

Кластерный анализ выполнялся с помощью статистического пакета Statistica 13.5.0.17 (StatSoft, Россия). Для обработки данных использовался метод к-средних [21]. Данный метод относится к итеративным, основанным на дроблении исходной совокупности данных на k кластеров, расположенных на возможно больших расстояниях друг от друга. Алгоритм этого метода предполагает использование только исходных значений переменных, а процесс классификации начинается с задания начальных условий (количество кластеров, порог завершения процесса кластеризации и т. п.) [22].

При обработке данных этим методом используется евклидова метрика, поэтому перед проведением кластеризации необходимо стандартизировать перемен-

ные. Стандартизированные данные подвергали кластеризации (задавалось число кластеров, данные делились на заданное количество кластеров), после чего оценивалось качество кластеризации. Проверялись евклидовы расстояния (геометрическое расстояние в многомерном пространстве) между кластерами, в данном случае это расстояние между координатами на диаграмме Ntot/NB для каждой пробы. Чем меньше расстояние между объектами, тем они более схожи.

Также качественными показателями кластеризации (для каждого варианта с заданным числом кластеров) выступали показатели дисперсионного анализа характеристик алмазов: межгрупповая и внутригрупповая дисперсия, значения F -статистики и уровни значимости p . Чем больше значение межгрупповой и

меньше внутригрупповой дисперсий, тем лучше признак характеризует принадлежность объектов к кластеру и тем «качественнее» кластеризация. Также

оценивалось качество кластеризации по параметрам F и p . Качественной кластеризации соответствовало максимальное значение F и минимальное p .

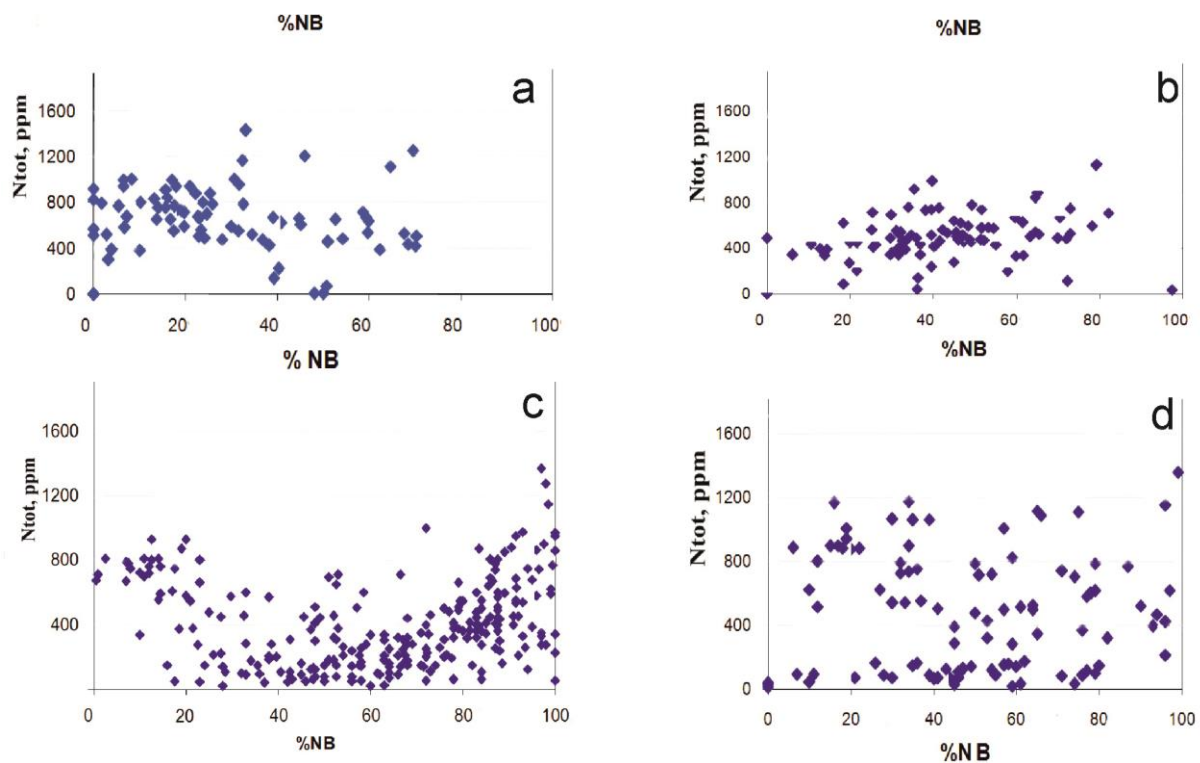


Рис. 2. Исходные диаграммы распределения примесей азота (N_{tot}/NB) в алмазах россыпей: а) Ноитгедехт; б) среднего течения р. Оранжевой; промышленных алмазоносных кимберлитовых трубок: в) Венеция; д) Премьер
Fig. 2. Initial diagrams of the distribution of nitrogen impurities (N_{tot}/NB) in placer diamonds: а) Nooitgedacht; б) middle Orange River; in diamonds of commercial diamondiferous kimberlite pipes: в) Venetia; д) Premier

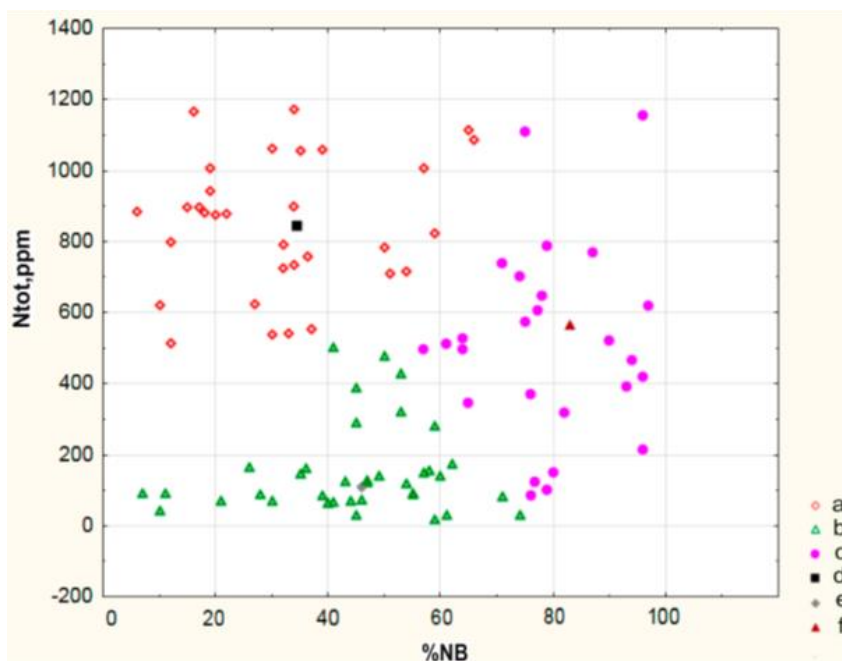


Рис. 3. Точечная диаграмма N_{tot}/NB . Трубка Премьер (3 кластера): а) точки кластера № 1; б) точки кластера № 2; в) точки кластера № 3; д) центр кластера № 1; е) центр кластера № 2; ф) центр кластера № 3
Fig. 3. Dot diagram of N_{tot}/NB . Premier pipe (3 clusters): а) points of cluster no. 1; б) points of cluster no. 2; в) points of cluster no. 3; д) center of cluster no. 1; е) center of cluster no. 2; ф) center of cluster no. 3

На диаграмме Ntot/NB строили точечные графики с получившимися кластерами и их центрами.

По такому алгоритму данные по каждой россыпи (трубке) делились на 2–5 кластеров и вычислялись координаты их центров. Оптимальное количество кластеров для каждого объекта определялось по данным дисперсионного анализа и полученным графикам. В результате была сделана сводная таблица с оптимальными центрами кластеров по всем объектам работы (табл. 1).

Отдельно необходимо подчеркнуть особенность определения числа кластеров для коренных источников. По данным из алмазов трубы Премьер было признано логичным выделить 3 кластера (рис. 3). При дальнейшем изучении данных по остальным коренным трубкам было принято решение также выделять на них по 2–3 кластера, поскольку на большей части трубок оказалось двухмодальное распределение данных анализов, что подтверждают данные исследования [6]. Также не исключено, что в некоторых трубках все алмазы принадлежат одному кластеру.

Таблица 1. Параметры центров кластеров основных алмазоносных промышленных россыпей и трубок Южной Африки

Table 1. Parameters of cluster centers of the main diamondiferous industrial placers and pipes of the southern Africa

Россыпи/Placers								Промышленные трубки/Commercial pipes			
Название/Name	NB, %	Ntot, ppm	Доля в выборке Share of the total sample	Название Name	NB, %	Ntot, ppm	Доля в выборке Share of the total sample	Название Name	NB, %	Ntot, ppm	Доля в выборке Share of the total sample
Бакен/Baken	55	480	0,4	Хондеклип прибор.	44,5	569	0,5	Де Бирс	27	980	0,26
	32	390	0,41		85	1000	0,13	De Beers	21	210	0,64
	72	900	0,14	Hondeclip serf	23	288	0,4	Дютоиспан	27	310	0,38
Ср. теч. Оранжевой Middle Orange	38	800	0,2	МК 7А/МС 7А	40	420	0,5	Дютоиспан	45	660	0,59
	36	560	0,43		64	740	0,4		Финч/Finch	38	670
	20	360	0,2	МК 11А/МС 11А	28	600	0,42	17		105	0,42
	72	480	0,17		61,5	165	0,4	64	65	0,27	
Бослуиспан Bosluispan	46	80	0,2	МК 12А/МС 12А	73	470	0,3	Ягерсфонтейн	32	650	0,29
	41	490	0,36		28	460	0,3	Jagersfontein	63	80	0,64
	66	620	0,34		42	200	0,3	Коффифонтейн	38	640	0,18
Ноитгедачт Nooitgedacht	40	560	0,4	МК 12А (глуб.) MC 12А (deep)	50	500	0,24	Котффонтейн	58	130	0,73
	15	800	0,5		75	280	0,24		27	600	0,16
Сидней-на Ваале Sydney-on-Vaal	19	320	0,43	МК 12А, Де Пюнт MC12А, De Punt	51	80	0,35	Летсенг	67	530	0,52
	54	660	0,5		29	480	0,18		50	200	0,25
Христиания Christiania	43,5	625	0,46	МК12А, Гелвал MC12А, Gelwal	47	160	0,13	Джваненг	28	500	0,18
	24	370	0,46		25	530	0,6		66	210	0,43
	35	530	0,14		78	380	0,23		81	880	0,12
Хондеклип Hondeclip	52	590	0,33	МК 12А, Де Пюнт MC12А, De Punt	38	410	0,3	Орапа	12	830	0,28
	67	750	0,43		57	650	0,44		57	300	0,56
	32	530	0,41		81	370	0,2		47	125	0,35
Морск. Конц. (МК)ЗВ Marine Concession (MC) ЗВ	54	680	0,3	МК13А/МС13А	67	244	0,2	Премьер Premier	35	830	0,3
	68	260	0,11		44	570	0,3		84	570	0,31
МК* 5А/МС 5А	38	586	0,4	Граув Дюнен Graauw Duinen	38	280	0,41	Венеция Venetia	87,5	510	0,37
	69	690	0,2		25	380	0,3		58	170	0,47
	16	300	0,23		67	430	0,3		15	670	0,15
					32	1080	0,14				

Примечание/Note: МК* – морская концессия/МС* – marine concession.

Результаты и обсуждение

Для упрощения поиска связи между россыпями и трубками полученные данные по ним (центры кластеров) были сгруппированы по степени географической близости:

Промышленные трубки:

- 1) верховья р. Оранжевой (Летсенг, р. Райет (Коффифонтейн, Ягерсфонтейн));
- 2) устье р. Вааль (Кимберли (Де Бирс, Дютоиспан); Финч);
- 3) «дальние» трубки (Орапа, Венеция, Премьер и Джваненг);

Россыпи:

- 1) нижнее и среднее течение р. Оранжевой (Бакен, Бослуиспан, Среднее течение);
- 2) континентальные (Ноитгедачт, Сидней-на-Вале, Христиания);

- 3) морские устья р. Бюффельс (МК 3В,5А,7А, Хондеклип);
- 4) морские устья р. Олифантс (МК 11А,12А,13А, Граув Дюнен).

В каждой группе были вынесены центры кластеров на диаграмму Ntot/NB, причем кластеры по каждому объекту были разделены по удельному весу (доле в выборке по каждому объекту). Кластеры с максимальной долей в выборке были отнесены к 1 классу, средней – ко 2 и т. д.

Далее по очереди каждая группа россыпей сравнивалась на диаграмме Ntot/NB с определенной группой промышленных трубок. Как наиболее представительные в основном анализировались кластеры 1 класса. Классы меньшего ранга не анализировались как менее предста-

вительные, значительно увеличивающие объем работ и уводящие в сторону от основной цели исследования (определения основного источника россыпи). Случаи, когда кластеры 1 класса россыпи и трубки располагались рядом (или довольно близко), фиксировались и анализировались. Так как центр кластера является лишь

центром области, здесь уже анализировались области максимального сгущения кластерах россыпи и трубки и визуально оценивалась площадь их пересечения.

Наиболее интересные случаи приведены на рис. 4. Данные по кластерам с наибольшей площадью перекрытия были собраны в табл. 2.

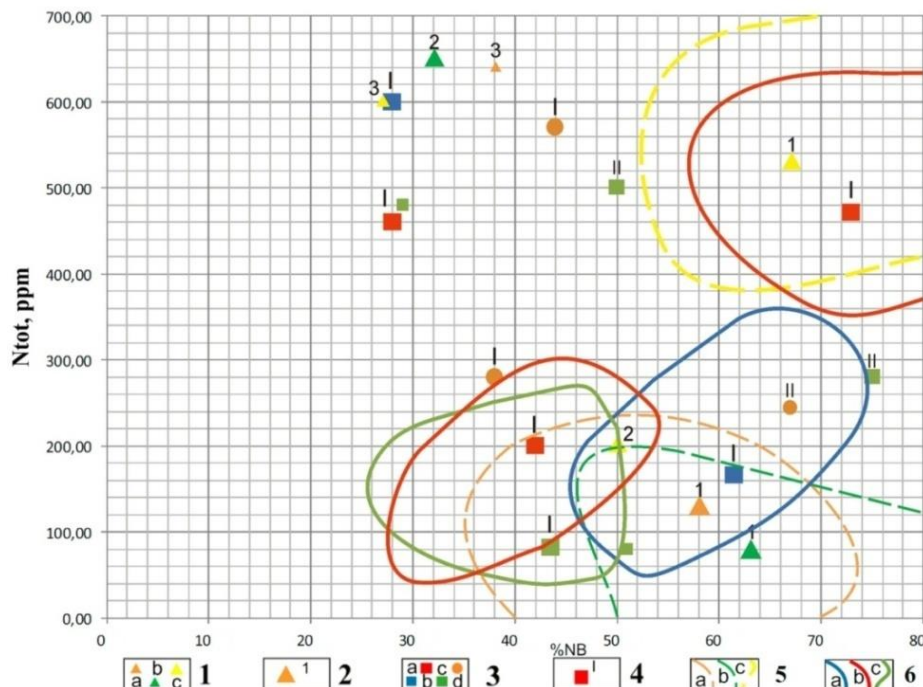


Рис. 4. Положение центров кластеров морских россыпей (устье р. Олифантс) и трубок верхней р. Оранжевой на диаграмме $Nt/NB:1$ – центры кластеров промышленных трубок: а) Коффифонтейн; б) Ягерсфонтейн; с) Летсенг; 2 – доля кластера от общей выборки по трубке (%): 1 – 50–70; 2 – 20–30; 3 – менее 20; 3 – центры кластеров из морских концессий: а) 11А; б) 12А; с) 12А (глубоководная часть); д) 13А; 4 – доля кластера от общей выборки по россыпи (%): 1 – 30–40; 2 – 20–30; 5 – площадь сгущения в кластерах с максимальным содержанием алмазов в трубке: а) Коффифонтейн; б) Ягерсфонтейн; с) Летсенг; 6 – площадь максимального сгущения кластеров россыпи: а) МК 11А; б) МК 12А; с) МК 12А (глубоководная часть)

Fig. 4. Position of the centers of clusters of marine placers (the mouth of the Olifants River) and the pipes of the upper Orange River in the diagram $Nt/NB:1$ – industrial pipe cluster centers: a) Koffiefontein; b) Jagersfontein; c) Letseng; 2 – cluster share of the total pipe sample (%): 1 – 50–70; 2 – 20–30; 3 – less than 20; 3 – cluster centers from offshore concessions: a) 11A; b) 12A; c) 12A (deep-water part); d) 13A; 4 – cluster share of the total sample by placer (%): 1 – 30–40; 2 – 20–30; 5 – area of concentration in clusters with the maximum diamond content in the tube: a) Koffiefontein; b) Jagersfontein; c) Letseng; 6 – area of maximum concentration of placer clusters: a) MC 11A; b) MC 12A; c) MC 12A (deep-water part)

Таблица 2. Сводная таблица россыпей Южной Африки и их вероятных источников (по данным кластерного анализа примесей азота алмазов)

Table 2. Summary table of placers of southern Africa and their probable sources (according to the cluster analysis of nitrogen impurities of diamonds)

Район/Area	Россыпи/Placers	Источники/Sours pipes
Континентальные/Continental	Ноитгедахт/Nooitgedacht	Венеция, Орапа/Venetia, Orapa
Устье р. Бюффельс Mouth of Buffels river	МК 5А/МС 5А	Кимберли/Kimberley
	Хондеклип (прибр.)/Hondeclip (serf.)	Премьер, Кимберли/Premier, Kimberley
Устье р. Олифантс Mouth of Olifants river	МК 12А, ДеПунт/МС 12А, DePunt	Орапа, Премьер/Orapa, Premier
	МК 12А, Гелвал/МС 12А, Gelwal	Кимберли/Kimberley
	Граув Дюнен/Graauw Duinen	
МК, устье р. Олифантс МС, Mouth of Olifants river	МК 11А/МС 11А	Орапа, Венеция, Джваненг, р. Райет Orapa, Venetia, Jwaneng, Riet river
	МК 13А/МС 13А	Орапа, Венеция, Кимберли Orapa, Venetia, Kimberley
	МК 12А/МС 12А	Орапа, Венеция, Летсенг Orapa, Venetia, Letseng
	МК 12А (глуб.)/МС 12А (deep)	Орапа, Венеция, Джваненг, р. Райет, Финч Orapa, Venetia, Jwaneng, Riet river, Finch

Россыпи и их вероятные источники (табл. 2) были вынесены на географическую карту (рис. 1, b).

Морские россыпи устья р. Олифантс оказались связаны со всеми «дальними» трубками, а также с трубками верховий р. Оранжевой и трубкой Финч. Снос в морские россыпи устья р. Бюффельс уже шел с трубок Премьер и куста трубок Кимберли. Данные построения позволяют сделать предположение о

направлении сноса из «дальних» трубок, скорее всего, в меловое время, когда восточный сегмент этой части континента был наиболее приподнят и шел интенсивный эрозионный снос материала из этих трубок палеорекой Кару [20] (рис. 1, a; рис. 5). По этому этапу истории геологического развития региона ЮА информация наиболее скудна, и данная работа, вероятно, сможет значительно расширить сведения о нем.

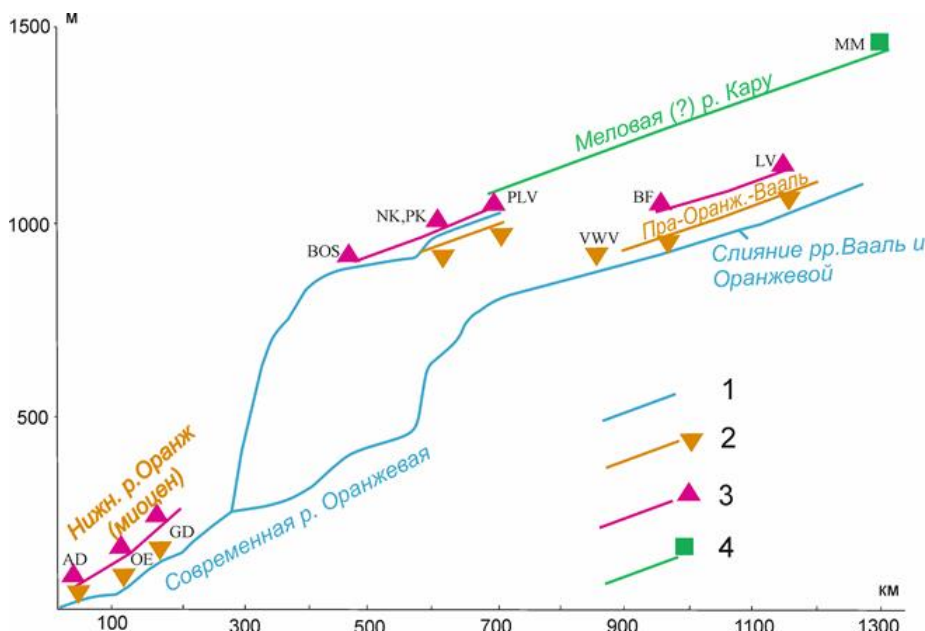


Рис. 5. Продольный профиль древних и современной долин р. Оранжевой [20]: 1 – современная долина; 2–4 – древние долины: 2 – плиоценовая, 3 – миоце-новая, 4 – верхнемеловая (р. Кару) и приуроченные к ней алмазоносные россыпи (AD – Аррис-дрифт, OE – Оина, GD – Грэсдрифт, GAL – Галпутс, BOS – Бослю, NK – Нелскоп, PK – Пардеколк, PLV – Пит Лаусли, VVW – Ван Уиксли, BF – Брэкфонтейн (Приска), LV – Нижн. терраса р. Вааль, MM – Маура Мутла

Fig. 5. Longitudinal profile of ancient and modern Orange River valleys [20]: 1 – modern valley; 2–4 – ancient valleys: 2 – Pliocene, 3 – Miocene, 4 – Upper Cretaceous (Karoo) and diamondiferous placers associated with it (AD – Arrisdrift, OE – Oena, GD – Grasdrift, GAL – Galputs, BOS – Bosluispan, NK – Nelskop, PK – Paardeakolk, PLV – Piet Louwsvlei, VVW – Van Wyxsvlei, BF – Brakfontein (Prieska), LV – Lower Vaal terrace, MM – Mahura Muthla

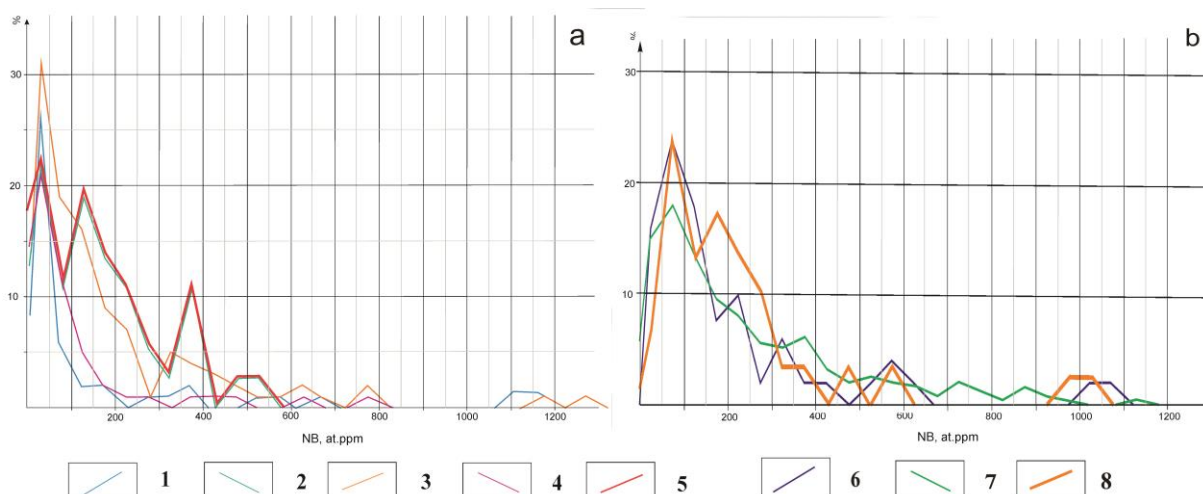


Рис. 6. Распределение азота в В-формах (NB, ppm) в алмазах: (a) из трубок: 1 – Финч; 2 – Летсенг; 3 – Орапа; 4 – Коффифонтейн; 5 – из россыпи МК 12А и (b) из трубок: 6 – Джэваненг; 7 – Венеция; 8 – из россыпи МК 13А

Fig. 6. Distribution of nitrogen in B-forms (NB, ppm) in diamonds: (a) from pipes: 1 – Finch; 2 – Letseng; 3 – Orapa; 4 – Koffiefontein; 5 – from the placer of the MC 12A and (b) from pipes: 6 – Jwaneng; 7 – Venetia; 8 – from the placer of the MC 13A

Была сделана пробная проверка данных этих выводов по методике Хачатрян [6], где сравнивали данные по частотам распределения NV алмазов морских россыпей района р. Олифантс (МК 12А,13А) и «дальних» трубок ЮА. На рисунках видно совпадение максимальных концентраций NV в алмазах из россыпи МК 12А и трубок Орапа, Финч, Летсенг, Коффифонтейн на уровне интервалов 0–50 и 100–150 ppm (рис. 6, а) и из россыпи МК 13А и трубок Джванег, Венеция на уровне интервала 50–100 ppm (рис. 6, б), что подтверждает сделанные предположения.

Еще одним доказательством связи трубки Орапа и россыпи МК 12А служит форма кристаллов алмазов. Для всех алмазов ЮА характерна тетрагексаэдрическая форма. Редкие кубические алмазы янтарного цвета встречены в районе россыпи МК 12А (Граув Дюнен) [7]. А среди коренных алмазов кристаллы кубической формы, преимущественно желтого цвета, часто встречаются среди алмазов трубки Орапа, также до 10 % кристаллов этой же формы оранжево-желтого цвета встречено в мелкой трубке Свартругенс (район Кимберли) [23].

Высокий потенциал алмазоносности устья р. Олифантс подтверждает современная добыча алмазов из морских прибрежных отложений этого района, где алмазы концентрируются в ловушках морского дна (котлах, промоинах). Причем ресурс этот является возобновляемым, ловушки после эксплуатации периодически заполняются алмазоносными отложениями [24], выносившимися из глубоководной части моря.

О поступлении в район этой реки алмазов из древних «дальних» трубок (Венеция (519 млн лет) и Премьер (1180 млн лет)) говорит о присутствии алмазов с бурными пятнами, особенностями текстуры [7], характерными для трубок этого возраста. Но, вероятно, эти алмазы могли быть сюда перенесены не в меловое время, а еще раньше – ледниками оледенения Двайка (320–270 млн лет назад) (рис. 1, а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зинчук Н.Н., Коптиль В.И. Типоморфизм алмазов Сибирской платформы. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2003. – 603 с.
2. Хачатрян Г.К. Азотные и водородные центры в алмазе, их генетическая информативность и значение для решения прогнозно-поисковых задач // Руды и металлы. – 2009. – № 4. – С. 73–80.
3. Boyd S.R., Kiflawi J., Woods G.S. Infrared absorption by the B nitrogen aggregate in diamond // *Philosophical Magazine*. – 1995. – V. 72. – № 3. – Part B. – P. 351–361.
4. Tappert R., Tappert M.C. *Diamonds in Nature. A guide to rough diamonds*. – Berlin; Heidelberg: Springer, 2011. – 153 p.
5. Taylor W.R. Nitrogen aggregation character, thermal history and stable isotope composition of some xenoliths-derived diamonds from Roberts Victor and Finch // *Sixth Internat. Kimberlite Conf. Extended Abstr.* – Novosibirsk, 1995. – P. 620–622.
6. Хачатрян Г.К. Азот и водород в алмазах мира как индикаторы их генезиса и критерии прогноза и поисков коренных алмазных месторождений: дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. – М., 2016. – 254 с.
7. Van der Westhuizen A. Provenance of alluvial diamonds in South Africa: a morphological and mineral chemistry study of diamonds and related heavy minerals from the Vaal-Orange system and the West Coast: Dis. ... Dr. of Philosophy. – Stellenbosch, 2012. – 394 p.

Заключение

Впервые разработанная методика, основанная на кластерном анализе, для определения коренных источников алмазоносных россыпей по азотным примесям в алмазах Южной Африки дает сопоставимые результаты с использованными ранее методами [6]. Целесообразно дальнейшее обоснование результативности данного метода и его усовершенствование путем:

- привлечения большего массива данных по азотным включениям алмазов из россыпей и коренных источников, а также исследования данным методом других характеристикалмазов;
- определения коренных источников россыпей алмазов на других континентах, включая месторождения России.

Разработанная методика на данном этапе, естественно, не является окончательной. При дальнейшем ее усовершенствовании возможно комплексное сочетание кластерного метода и методики Г.К. Хачатрян. Также необходимо привлечение данных не только по азоту в алмазах, но и плейлети (пластинчатые дефекты в алмазах) и водорода, которые являются более «тонкими» характеристиками условий образования алмазов [6].

Основным результатом выполненной работы стала разработка методики определения возможных источников алмазоносных россыпей кластерным методом. Также в ходе исследования было определено вероятное направление мощного сноса алмазов из основных промышленных трубок юга Африки в меловое время. При таком широком потоке сноса в этот период существует возможность обнаружения новых крупных морских россыпей алмазов в районе устья р. Олифантс, особенно в глубоководной ее части.

В целом применение данного метода может способствовать конкретизации истории геологического развития регионов, указать направления освоения россыпных алмазоносных районов.

8. Deines P., Harris J.W., Gurney J.J. Nitrogen and ¹³C content of Finsch and Premier diamonds and their implications // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 1989. – V. 53. – P. 1367–1378.
9. Deines P., Harris J.W., Gurney J.J. The carbon isotopic composition and nitrogen content of lithospheric and asthenospheric diamonds from the Jagersfontein and Koffiefontein kimberlite, South Africa // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 1991. – V. 55. – P. 2615–2625.
10. Deines P., Harris J.W., Gurney J.J. Depth-related carbon isotope and nitrogen concentration variability in the mantle below the Orapa kimberlite, Botswana, Africa // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 1993. – V. 57. – P. 2781–2796.
11. Deines P., Harris J.W., Gurney J.J. Carbon isotope ratios, nitrogen content and aggregation state, and inclusion chemistry of diamonds from Jwaneng, Botswana // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 1997. – V. 61. – Iss. 18. – P. 3993–4005.
12. Viljoen K.S. An infrared investigation of inclusion bearing diamonds from the Venetia kimberlite, Northern Province, South Africa: implications for diamonds from craton-margin settings // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. – 2002. – V. 144. – P. 98–108.
13. Overview of diamond in Africa / M. De Wit, J. Davidson, S.E. Haggerty, J. Jacob, C. Skinner, M. Robert, R. Spaggiari, J. Ward // *Episodes*. – 2016. – V. 39 (2). – P. 199–239.
14. Metallogenic features of diamondiferous kimberlites in Botswana and China: enlightenment for exploration of the same type

- deposits / F. Liu, J. Yang, D. Lian, X. Yu, R.G. Kewame // *Geology in China*. – 2019. – V. 46 (1). – P. 43–76.
15. Бриллианты под давлением: глобальная алмазная отрасль в 2020–2021 годах. URL: <https://www.bain.com/ru/insights/global-diamond-industry-2020-21/> (дата обращения 22.01.2022).
16. World mineral production 2014–2018 / T.J. Brown, N.E. Idoine, S.E. Wrighton, E.R. Raycraft, S.F. Hobbs, R.A. Shaw, P. Everett, C. Kresse, E.A. Deady, T. Bide. – Keyworth, Nottingham: British Geological Survey, 2020. – 22 p.
17. Малых О.Н. Факторы контроля формирования промышленных молодых алмазоносных россыпей Южной Африки и Сибири // Геология и минеральные ресурсы Европейского Северо-Востока России: Материалы XVII Геологического съезда Республики Коми. Т. III. – Сыктывкар: ИГ Коми НЦ УрО РАН, 2019. – С. 207–212.
18. Du Toit A.L. The geology of South Africa. – London: Oliver & Boyd, 1954. – 611 p.
19. Visser J.N.J., Van Niekerk B.N., Van der Merwe S.W. Sediment transport of the Late Proterozoic glacial Dwyka Group in the southwestern Karoo Basin // *South African Journal of Geology*. – 1997. – V. 100. – P. 223–236.
20. De Wit M.C.J. Post-Gondwana drainage and the development of diamond placers in western South Africa // *Economic Geology*. – 1999. – V. 94. – № 5. – P. 721–740.
21. Применение методов кластеризации STATISTICA в геологии. URL: http://statsoft.ru/solutions/ExamplesBase/branches/detail.php?ELEMENT_ID=1595 (дата обращения 15.06.2021).
22. Буреева Н.Н. Многомерный статистический анализ с использованием ППП «STATISTICA». – Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, 2007. – 112 с.
23. Трофимов В.С. Геология месторождений природных алмазов. – М.: Недра, 1980. – 304 с.
24. Cole I., Ngcofe L., Halenyane K. Mineral commodities in the Western Cape Province, South Africa. Report № 2014-0012. – Western Cape: Western Cape Regional Office, 2014. – 85 p.

Поступила 18.01.2022 г.

Информация об авторах

Малых О.Н., ведущий инженер, эксперт научно-редакционного совета Всероссийского научно-исследовательского геологического института им. А.П. Карпинского.

Asriël Vander Westhuizen, доктор философии, главный геолог, Trans Hex Operations.

UDC 553.81

CLUSTER ANALYSIS OF STRUCTURAL NITROGEN IMPURITIES IN SOUTHERN AFRICAN DIAMONDS: PLACER RELATIONSHIP WITH KIMBERLITE SOURCES

Oleg N. Malykh¹,
Oleg_Malykh@vsegei.ru

Asriël Van der Westhuizen²,
assievanderwesthuizen@gmail.com

¹ Russian Geological Research Institute,
74, Sredny avenue, Vasilievsky Island, Saint Petersburg, 199106, Russia.

² Trans Hex Operations,
PO Box 333, Alexander Bay 8290, Northern Cape, Republic of South Africa.

Relevance. The authors have developed the methodology for determining the sources of diamond-bearing placers, which clarifies the history of their development, the direction of diamond demolition and probable new areas of their accumulation. Along with paleogeographic studies of territories, this method will be able to significantly expand the understanding of the development of the history of diamondiferous areas in which both kimberlite pipes and placer deposits are located, and identify promising areas for their development.

Objective: to determine the probable root sources of productive coastal marine and continental diamondiferous placers of southern Africa.

Objects: a number of the largest diamondiferous placers of the Republic of South Africa and the largest diamondiferous pipes of southern Africa.

Methods. Using cluster analysis, the authors studied nitrogen distribution in the diamonds of placers and pipes of southern Africa, identified the aggregates with the maximum coincidence of identical properties.

Results. The authors developed the method for comparing nitrogen impurities in placer diamonds and root sources by a statistical method (cluster analysis). With the help of this technique, the probable sources of coastal and continental placers of the Republic of South Africa were determined. The findings were verified using another method of comparing placer diamonds and root sources, which confirmed the conclusions made. Recommendations are given for further improvement of the method (using a larger array of data, using data on diamonds from other regions, attracting data on other characteristics of diamonds). The history of erosion and demolition of diamonds from the root pipes, the formation of diamondiferous placers in the Cretaceous on the territory of the southern Africa was clarified, which opens up prospects for the discovery of large marine placers in the deep-water part of the mouth of the Olfants River. In the future, the methodology can be used to study the history of the formation of diamondiferous placers in Russia and other diamondiferous regions of the world, to determine promising areas of exploration and development of these deposits.

Key words:

Cluster analysis, diamonds, placers, kimberlite pipes, southern Africa.

REFERENCES

- Zinchuk N.N., Koptil V.I. *Tipomorfizm almazov Sibirskoy platformy* [Typomorphism of diamonds of the Siberian platform]. Moscow, OOO «Nedra-Biznescentr» Publ., 2003. 603 p.
- Khachatryan G.K. Azotnye i vodorodnye tsentry v almaze, ikh geneticheskaya informativnost i znachenie dlya resheniya prognozno-poiskovykh zadach [Nitrogen and hydrogen centers in diamond, their genetic informativeness and significance for solving predictive and search tasks]. *Rudyimetallogy*, 2009, no. 4, pp. 73–80.
- Boyd S.R., Kiflawi J., Woods G.S. Infrared absorption by the B nitrogen aggregate in diamond. *Philosophical Magazine*, 1995, Part B, vol. 72, no. 3, pp. 351–361.
- Tappert R., Tappert M.C. *Diamonds in nature. A guide to rough diamonds*. Berlin, Heidelberg, Springer, 2011. 153 p.
- Taylor W.R. Nitrogen aggregation character, thermal history and stable isotope composition of some xenoliths-derived diamonds from Roberts Victor and Finch. Sixth Internat. *Kimberlite Conf. Extended Abstr.* Novosibirsk, 1995. pp. 620–622.
- Hachatryan G.K. *Azotivodorod v almazakh mira kak indicatory ikh genezisa i kriterii prognoza i poiskov korennykh almaznykh mestorozhdeniy*. Diss. Dokt. nauk [Nitrogen and hydrogen in the diamonds of the world as indicators of their genesis and criteria for forecasting and searching for indigenous diamond deposits. Dr. Diss.]. Moscow, 2016. 254 p.
- Van der Westhuizen A. *Provenance of alluvial diamonds in South Africa: a morphological and mineral chemistry study of diamonds and related heavy minerals from the Vaal-Orange system and the West Coast*. Dr. Diss. Stellenbosch, 2012. 394 p.
- Deines P., Harris J.W., Gurney J.J. Nitrogen and ¹³C content of Finsch and Premier diamonds and their implications. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1989, vol. 53, pp. 1367–378.
- Deines P., Harris J.W., Gurney J.J. The carbon isotopic composition and nitrogen content of lithospheric and asthenospheric diamonds from the Jagersfontein and Koffiefontein kimberlite, South Africa. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1991, vol. 55, pp. 2615–2625.
- Deines P., Harris J.W., Gurney J.J. Depth-related carbon isotope and nitrogen concentration variability in the mantle below the Orapa kimberlite, Botswana, Africa. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1993, vol. 57, pp. 2781–2796.
- Deines P., Harris J.W., Gurney J.J. Carbon isotope ratios, nitrogen content and aggregation state, and inclusion chemistry of diamonds from Jwaneng, Botswana. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1997, vol. 61-18, pp. 3993–4005.
- Viljoen K.S. An infrared investigation of inclusion bearing diamonds from the Venetia kimberlite, Northern Province, South Africa: implications for diamonds from craton-margin settings. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2002, vol. 144, pp. 98–108.
- De Wit M., Davidson J., Haggerty S.E., Jacob J., Skinner C., Robert M., Spaggiari R., Ward J. Overview of diamond in Africa. *Episodes*, 2016, vol. 39(2), pp. 199–239.
- Liu F., Yang J., Lian D., Yu X., Kewame R. G. Metallogenic features of diamondiferous kimberlites in Botswana and China: enlightenment for exploration of the same type deposits. *Geology in China*, 2019, vol. 46 (1), pp. 43–76.
- Brillianty pod davleniem: globalnaya almaznaya otrasl v 2020–2021 godakh* [Brilliant under pressure. The Global Diamond Indus-

- try 2020–2021]. Available at: <https://www.bain.com/ru/insights/global-diamond-industry-2020-21/> (accessed 22 January 2022).
16. Brown T.J., Idoine N.E., Wrighton C.E., Raycraft E.R., Hobbs S.F., Shaw R.A., Everett P., Kresse C., Deady E.A., Bide T. *World mineral production 2014–2018*. Keyworth, Nottingham, British Geological Survey, 2020. 22 p.
 17. Malykh O.N. Faktory kontrolya formirovaniya promyshlennykh molodykh almazonosnykh rossypey Yuzhnoy Afriki i Sibiri [Factors controlling the formation of industrial young diamondiferous placers in South Africa and Siberia]. *Geologiya i mineralnye resursy Evropeyskogo Severo-Vostoka Rossii. Materialy XVII Geologicheskogo sezda Respubliki Komi* [Geology and mineral resources of the European North-East of Russia. Materials of the XVII Geological Congress of the Komi Republic]. Syktyvkar, Institute of Geology of Komi SC UB RAS, 2019. Vol. 3, pp. 207–212.
 18. Du Toit A.L. *The geology of South Africa*. London, Oliver & Boyd, 1954. 611 p.
 19. De Wit M.C.J. Post-Gondwana drainage and the development of diamond placers in western South Africa. *Economic Geology*, 1999, vol. 94 (5), pp. 721–740.
 20. Visser J.N.J., Van Niekerk B.N., Van der Merwe S.W. Sediment transport of the Late Proterozoic glacial Dwyka Group in the southwestern Karoo Basin. *South African Journal of Geology*, 1997, vol. 100, pp. 223–236.
 21. *Primenenie metodov klasterizatsii STATISTICA v geologii* [Application of clustering methods STATISTICS in geology]. Available at: http://statsoft.ru/solutions/ExamplesBase/branches/detail.php?ELEMENT_ID=1595 (accessed 15 June 2021).
 22. Bureeva N.N. *Mnogomerny statistichesky analiz s ispolzovaniem PPP «STATISTICA»* [Multivariate statistical analysis using the «STATISTICA» program]. Nizhniy Novgorod, N.I. Lobachevsky Nizhniy Novgorod State University Publ., 2007. 112 p.
 23. Trofimov V.S. *Geologiya mestorozhdeniy prirodnykhalmazov* [Geology of natural diamond deposits]. Moscow, Nedra Publ., 1980. 304 p.
 24. Cole I., Ngcofe L., Halenyane K. *Mineral commodities in the Western Cape Province, South Africa*. Report no. 2014-0012. Western Cape, Western Cape Regional Office, 2014. 85 p.

Received: 18 January 2022.

Information about the authors

Oleg N. Malykh, senior engineer, expert of the scientific and editorial board, Russian Geological Research Institute.
Asriël Vander Westhuizen, Dr. Of Philosophy, chief research geologist, Trans Hex Operations.