

- нанцевым распределением золота // Отечественная геология. 2004. № 6. С. 22—35.
5. *Коньшев В.О.* Методология опробования на месторождении с крайне неравномерным и бонанцевым распределением золота // Разведка и охрана недр. 2005. № 2—3. С. 10—18.
 6. *Коньшев В.О.* О граничных условиях определения золота методом предварительного извлечения // Отечественная геология. 2005. № 3. С. 84—87.
 7. *Коньшев В.О., Савостьянов Е.В., Власов Г.Н.* Оценка сырьевой базы крупнообъемного месторождения Федоровское-1 и перспективы развития золотодобычи из окисленных и первичных руд // Отдельные статьи информационно-аналитического бюллетеня. — М.: Изд-во Московского государственного горного ун-та, 2003.
 8. *Коньшев В.О., Савостьянов Е.В., Власов Г.Н.* Месторождение Федоровское-1 в Кемеровской области, и особенности методики разведки объектов с крупными выделениями самородного золота в рудах // Руды и металлы. 2003. № 5—6. С. 22—53.
 9. *Страхов Н.М.* Типы литогенеза и их эволюция в истории земли. — М.: Госгеолтехиздат, 1963.
 10. *Щербаков Ю.Г., Рослякова Н.В., Колпаков В.В.* Федоровское месторождение золота и перспективы золотонности Южно-Сибирской рудной провинции (Горная Шория) // Геология и геофизика. 2003. Т. 44. № 10. С. 979—992.

Литология, петрология, минералогия, геохимия

УДК 552.323.6

Коллектив авторов, 2006

Геохимия (ICP-MS) и мантийный источник кимберлитов северо-востока Анголы

К.Н.ЕГОРОВ (ИЗК СО РАН), А.Я.ПОТМАН, Н.Н.ЗИНЧУК, С.Ф.НОСЫКО (ЯНИГП ЦНГРИ АК «АЛРОСА»), Л.А.СОНЕЕВА (ИЗК СО РАН)

В северо-восточной части Анголы расположена алмазная провинция Лунда-Норте, в которой сосредоточены основные алмазные ресурсы этой страны. В провинции известны четыре кимберлитовых поля: Катока, Камазамбо, Камутуэ и Камачия. Кимберлитовое поле Катока включает 24 кимберлитовых тела, среди которых трубка Катока — единственное разрабатываемое крупнейшее месторождение алмазов Анголы.

В настоящей статье приведены новые данные по вещественному составу кимберлитов поля Катока из трубок Катока, Камитонго-I, -II, Какелэ-I, -II, Луите, а также из шести кимберлитовых тел (аномалии 1—5, 8), находящихся в околотрубочном пространстве месторождения «Катока». Кимберлитовые трубки Катока, Камитонго-I, -II, Луите — слабоэродированные тела с сохранившимися кратерными отложениями, представленные пирокластическими кимберлитами и вулканогенно-осадочными образованиями с переотложенным кимберлитовым материалом. Большинство аномалий и трубки Какелэ-I, -II отличаются отсутствием пород кратерных фаций.

Для аналитических исследований выбирались преимущественно порфиновые кимберлиты, а при их отсутствии кимберлитовые брекчии. В трубках Катока, Камитонго-I, -II, Какелэ-II, Луите, аномалии 1, 8 анализировались кимберлиты обеих генетических разновидностей. Многие кимберлиты относятся к бесслюдяным разновидностям, слюдястые кимберлиты (общее количество флогопита до 15%) встречаются в трубках Камитонго-I, Какелэ-I, аномалии 2, 5.

Следует отметить, что в разрезе вмещающих пород кимберлитовых тел поля Катока практически отсутствуют карбонатные породы [6]. Значительная часть карбонатной фазы в ангольских кимберлитах имеет глубинный источник. Подавляющее большинство порфиновых кимберлитов (за исключением отдельных блоков в трубке Луите) содержат больше карбонатов, чем брекчии. По геологическим данным порфиновые кимберлиты в сложнопостроенных телах (Катока, Камитонго-I, -II, аномалии 1, 8, Луите) относятся к ранним фазам внедрения, а кимберлитовые брекчии — к поздним фазам формирования трубок.

Порфиновые кимберлиты содержат менее 5% ксенолитов кристаллических сланцев, гнейсов, гранитоидов, а также зерен кварца, полевых шпатов, амфибола. Вкрапленники псевдоморфоз по оливину размером 2—3 мм, реже до 8—10 мм составляют 20—25% объема породы и выполнены смектитом, реже серпентином и (или) кальцитом, магнетитом. Основная масса имеет кристаллически-зернистую структуру, состоит из мелких псевдоморфоз по оливину второй генерации (40—60%), окисдно-рудных минералов, измененного флогопита (1—8%), находящихся в кальцитовом, кальцит-смектитовом матриксе, пропитанным гидроксидами железа.

Кимберлитовые брекчии содержат ксенолиты осадочных, метаморфических пород и редкие мантийные включения перидотитов (в среднем 25—35% от объема породы). Среди осадочных пород отмечаются песчаники, алевролиты, реже аргиллиты. Обломки коровых пород представлены кристаллосланцами, гнейсами, амфиболитами, метапироксенитами, гранитоидами. В брекчиях встречаются округлые, эллипсоидные автолитовые обособления (1—3%) и обломки порфинового кимберлита ранней фазы внедрения (1—5%). Порфиновые выделения псевдоморфоз по оливину (15—20%) выполнены смектитовым материалом с гидроксидами железа, реже серпентином и (или) кальцитом. Вкрапленники измененного флогопита присутствуют в количестве 1—5%, в слюдястых разновидностях — до 10—15% от объема породы. Основная масса брекчии представлена смектитовыми, реже серпентин-карбонатными псевдоморфозами по оливину второй генерации, измененными чешуйками флогопита, окисдно-рудными минералами, сцементированных смектитовым, кальцит-гидрослюдистым, редко серпентин-кальцитовым матриксом.

В целом изученные кимберлиты характеризуются значительными вторичными изменениями. Основными наложенными минералами во всех кимберлитах за исключением пород трубки Луите и глубоких горизонтов трубки Катока являются смектит-, вермикулит-гидрослюдистые смешанослойные образования; менее распространены карбонатные минералы, гидроксиды железа, серпентин. Ким-

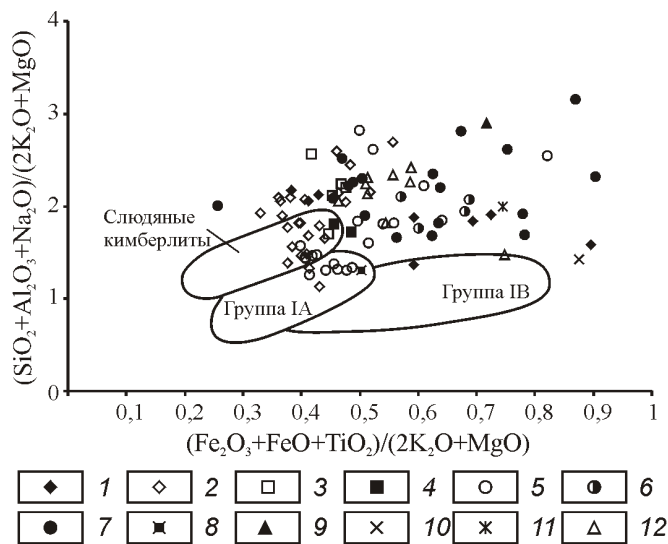


Рис. 1. Диаграмма С.І.—IIm.І. для кимберлитов северо-восточной части Анголы [13]:

трубки: 1 — Камитонго-І, 2 — Камитонго-ІІ, 3 — Какелэ-І, 4 — Какелэ-ІІ, 5 — Луите, 6 — Катока; аномалии: 7 — 1, 8 — 2, 9 — 3, 10 — 4, 11 — 5, 12 — 8

берлиты трубок Луите и Катока (глубина 350—600 м) преобразованы серпентин-карбонатной минерализацией.

Содержания индикаторных минералов в изученных кимберлитах изменяются от средних (250—300 г/т) до низких (100 г/т) значений при преобладании пикроильменита. Гранаты принадлежат преимущественно к различным генетическим группам лерцолитов; пиропы алмазных ассоциаций редки. Хромшпинелид встречается повсеместно, но в малых количествах. Среди индикаторных минералов кимберлитов поля Катока наиболее распространены клинопироксен с широкими вариациями Cr_2O_3 , Al_2O_3 , FeO , Na_2O .

Содержания петрогенных оксидов в 22 образцах ангольских кимберлитов изучены в химической лаборатории Института земной коры (ИЗК СО РАН) весовым методом. Концентрации редких элементов определялись по стандартной методике в Институте геохимии СО РАН с точностью измерений не ниже 10% для концентраций 1 ppm и не ниже 15—20% для концентраций 1—0,1 ppm методом индуктивно-связанной плазмы с масс-спектрометрическим окончанием. Исследованные валовые пробы кимберлитов с минимальной степенью вторичных преобразований очищались под бинокляром от ксенолитов и ксенокристов вмещающих осадочных пород и кристаллических пород фундамента.

Главная петрохимическая особенность большинства изученных кимберлитов — повышенное количество SiO_2 , Al_2O_3 , что в целом характерно для кимберлитов Южной Африки [4]. На диаграмме в координатах индексов контаминации коровым материалом (С.І.) и аккумуляции Fe-Ti-оксидов (IIm.І.) многие фигуративные точки составов ангольских кимберлитов располагаются преимущественно вне полей базальтоидных (группы IA и IB) и слюдяных кимберлитов Южной Африки (рис. 1). Изученные кимберлиты характеризуются повышенной контаминацией коровым материалом (С.І. 1—3), а также высокими значениями индекса IIm.І. 0,3—0,9.

Обогащение кремнеземом кимберлитов часто происходит за счет ксеногенной примеси кварца, полевых шпатов, которые полностью замещены карбонатом и смектитами. Присутствие ксенозерен полевых шпатов в валовых пробах хорошо фиксируется одновременным увеличением в кимберлитах содержаний SiO_2 , Al_2O_3 , Na_2O . Однако отдельные типы порфировых кимберлитов (трубка Луите, аномалия 1 и др.), не содержащие ксенозерна кварца, полевых шпатов и обладающие низкими количествами (в статье содержания даны как массовое содержание компонента в %): Al_2O_3 2—3,5, Na_2O 0,01—0,05, также обогащены SiO_2 37—40.

Высокие значения индекса IIm.І. 0,3 ангольских кимберлитов обусловлены повышенными содержаниями ильменита, а также пониженными количествами MgO . На диаграмме $CaO—MgO$ изученные кимберлиты значительно отличаются от кимберлитов Якутии (рис. 2, А); они не образуют четкого тренда изменения состава пород в зависимости от содержаний CaO и MgO , что связано с их более низким уровнем карбонатизации и интенсивным изменением кимберлитов смиттит-, вермикулит-гидрослюдистыми смешанослойными образованиями, которое сопровождается, прежде всего, активным выносом MgO . Такие кимберлиты содержат от 10 до 25% MgO , но при этом количество CaO в них не превышает 7% (см. рис. 2, А).

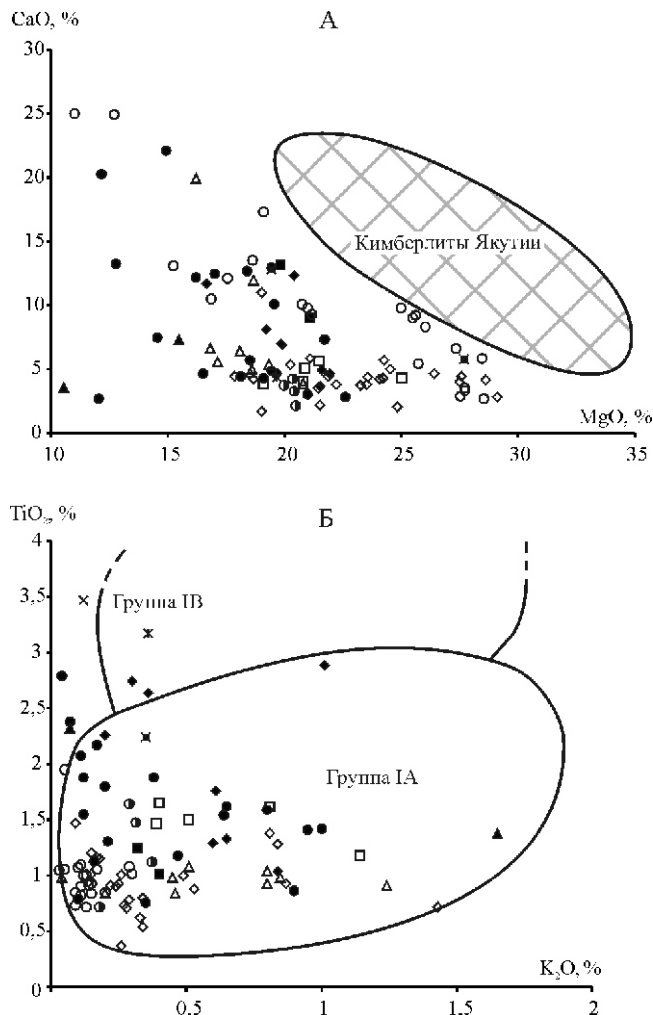


Рис. 2. Соотношение в кимберлитах северо-востока Анголы $CaO—MgO$ (А), $TiO_2—K_2O$ (Б):

см. услов. обозн. к рис. 1

Ангольские кимберлиты в основном соответствуют составам кимберлитов (см. рис. 2, Б) группы IA Южной Африки 13. Наиболее высокие содержания K_2O характерны для порфировых кимберлитов аномалии 3 и кимберлитовых брекчий трубки Камитонго-II; повышенные TiO_2

(1,5%) и $Ilm.I.$ 0,5 в ангольских кимберлитах коррелируют с количеством ильменита и титансодержащих оксидно-рудных фаз в основной массе породы. Таким образом, по уровню концентраций TiO_2 кимберлиты поля Катока относятся к низко- (TiO_2 1,0%) и умереннотитанистым (1,0—2,7% TiO_2)

1. Элементы-примеси, P_2O_5 и CO_2 в кимберлитах поля Катока (северо-восточная часть Анголы)

Элементы, ppm	Трубки											
	Катока				Камитонго-I		Камитонго-II		Какелэ-I		Какелэ-II	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Cs	0,50	0,36	0,44	0,86	0,20	0,55	0,29	0,35	0,96	0,46	0,43	0,43
Rb	11,63	13,95	29,79	36,94	27,73	23,35	13,62	10,94	47,84	23,84	23,64	23,52
Ba	666,55	552,66	309,36	733,56	917,30	609,43	748,23	725,73	938,14	796,42	1165,67	1474,18
Th	12,95	8,52	8,59	30,24	21,48	6,73	5,49	15,71	5,62	3,90	3,45	3,91
W	1,78	1,23	0,96	1,54	4,23	0,55	0,37	1,02	0,72	0,34	0,42	0,40
U	2,74	2,89	2,38	7,66	2,40	1,60	4,05	6,27	1,44	0,98	1,04	0,95
Nb	150,43	82,40	83,41	100,84	166,94	54,51	75,29	165,84	55,37	78,51	56,61	60,44
Ta	12,18	6,69	7,76	7,62	9,42	4,72	5,04	7,96	3,85	8,02	4,44	4,85
La	86,78	54,40	41,97	98,79	152,54	45,31	41,67	132,09	35,33	27,98	24,28	28,98
Ce	138,35	92,10	70,81	182,15	331,24	66,95	70,53	213,94	60,10	51,90	43,15	50,74
Pb	11,00	10,64	8,62	13,98	12,66	12,42	8,56	11,47	10,25	4,56	7,51	5,58
Mo	1,37	0,25	0,23	0,68	1,21	0,65	0,27	9,10	1,04	0,34	0,31	0,29
Pr	13,73	9,72	7,50	17,89	31,02	8,25	7,55	24,54	7,14	5,07	5,26	5,55
Nd	48,66	35,64	25,47	64,91	103,61	30,20	26,79	82,41	24,48	17,96	17,90	19,06
Sr	431,01	480,78	576,99	659,20	1743,30	234,10	340,34	657,38	483,49	396,01	335,92	411,71
Sm	6,94	5,72	4,19	13,09	13,63	5,13	3,78	11,93	3,85	3,02	2,80	3,05
Hf	3,39	2,09	2,07	2,91	4,46	2,33	1,62	3,78	2,28	3,04	1,96	2,54
Zr	133,64	87,67	76,60	112,55	175,33	91,28	73,53	174,91	89,68	105,90	75,41	102,80
Eu	1,64	1,39	0,98	3,48	3,10	1,27	1,09	3,08	1,15	0,82	1,05	1,24
Gd	6,90	5,33	4,17	13,48	17,15	5,87	3,92	12,21	4,10	3,28	2,88	3,19
Tb	0,95	0,73	0,48	1,70	1,95	0,71	0,60	1,80	0,58	0,39	0,42	0,43
Dy	2,27	2,09	1,83	5,32	3,68	2,31	1,39	3,78	1,73	1,51	1,22	1,33
Ho	0,38	0,35	0,31	0,86	0,61	0,42	0,23	0,58	0,31	0,27	0,21	0,23
Y	10,64	9,68	9,06	24,89	16,23	12,51	6,44	15,55	9,01	7,49	5,91	6,33
Er	1,77	1,43	1,06	3,18	3,64	1,49	1,10	3,06	1,25	0,87	0,83	0,86
Tm	0,13	0,12	0,11	0,37	0,23	0,16	0,07	0,16	0,12	0,11	0,07	0,08
Yb	0,84	0,73	0,71	2,40	1,63	0,92	0,49	1,08	0,73	0,65	0,47	0,54
Lu	0,14	0,12	0,10	0,35	0,23	0,13	0,07	0,14	0,11	0,09	0,07	0,07
P_2O_5 , %	0,53	0,42	0,27	1,25	1,16	0,17	0,22	1,05	0,18	0,16	0,18	0,18
CO_2 , %	4,89	4,12	1,74	5,13	14,3	1,87	2,31	5,39	2,31	2,2	9,85	6,38

Примечание. 1, 4, 5, 8, 13, 15, 18, 20, 21— порфировый кимберлит; 2, 3, 6, 7, 9—12, 14, 16, 17, 19, 22 — кимберлитовая брекчия.

кимберлитам 3. Более высокие содержания TiO_2 соответствуют порфировым кимберлитам трубки Камитонго-I (2,89%) и аномалии 5 (3,17%).

Концентрации элементов-примесей в изученных ангольских кимберлитах приведены в табл. 1. Большинство

ангольских кимберлитов по величине Zr/Nb 2 (пределы колебаний 0,83—1,70) относятся к кимберлитам I группы Южной Африки; Zr/Nb 2 (2,48 и 2,12), свойственное кимберлитам II группы Южной Африки, характерно только двум образцам (табл. 1, аномалии 20, 21,) порфирового

Ан. 1		Ан. 2	Ан. 3	Ан. 5	Ан. 8		Трубка Луите		
13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
0,51	0,50	0,43	0,12	0,42	0,04	0,34	0,19	0,17	0,21
11,14	32,18	37,29	5,52	31,00	1,83	11,94	3,23	8,76	7,07
996,22	429,50	1277,10	467,63	906,93	831,06	666,47	187,81	328,38	839,21
5,34	7,68	7,41	5,60	6,92	14,68	9,99	8,82	1,65	3,30
0,57	0,47	2,03	0,58	0,57	1,54	1,33	0,37	0,60	1,08
3,35	2,16	7,10	1,92	9,46	16,34	8,42	3,19	1,58	9,25
124,73	65,72	95,64	119,29	79,61	215,79	113,58	141,79	43,62	68,50
12,00	5,70	10,80	10,98	8,49	13,65	7,37	Не опр.	Не опр.	Не опр.
40,10	35,87	64,94	40,83	34,73	114,99	65,17	203,36	32,68	47,30
67,81	66,99	128,16	70,85	67,47	221,35	128,37	246,39	35,31	53,38
5,26	14,35	3,94	5,82	6,67	5,46	6,64	7,09	5,61	7,21
0,99	0,58	0,75	0,93	0,61	0,76	0,51	1,79	0,16	0,44
6,98	6,89	12,47	7,37	7,28	22,25	12,70	38,22	5,21	7,48
24,33	23,44	45,52	25,70	27,15	77,89	46,79	152,27	20,13	27,80
201,96	584,83	962,14	293,24	355,15	741,71	513,85	646,07	263,32	314,52
3,97	3,92	7,94	4,26	4,51	12,62	7,41	24,21	3,19	4,44
2,86	2,00	3,96	2,88	2,77	5,22	3,38	Не опр.	Не опр.	Не опр.
106,28	71,58	158,86	99,03	88,43	223,23	137,73	352,14	92,42	98,22
1,15	0,97	2,15	1,07	1,26	3,20	1,84	6,08	0,87	1,32
4,76	4,11	8,38	4,55	4,95	12,80	7,59	30,68	3,66	5,07
0,52	0,50	1,04	0,56	0,66	1,43	1,12	2,72	0,35	0,51
1,78	1,60	2,78	1,63	1,88	3,96	2,90	7,03	1,27	1,75
0,36	0,26	0,44	0,27	0,31	0,60	0,48	1,10	0,21	0,29
18,78	7,66	12,64	7,55	8,43	15,68	13,13	31,13	6,43	8,24
1,22	0,96	1,75	1,15	1,17	2,49	1,70	2,14	0,50	0,64
0,12	0,10	0,14	0,10	0,10	0,16	0,17	0,24	0,07	0,09
0,62	0,60	0,81	0,61	0,69	1,19	1,05	2,06	0,48	0,63
0,11	0,10	0,10	0,09	0,10	0,13	0,15	0,18	0,06	0,08
0,28	0,2	0,85	0,32	0,3	1,28	0,6	1,68	0,32	0,27
22,44	1,98	3,52	4,18	0,88	12,76	7,04	11,59	1,1	6,16

2. Главные соотношения элементов-примесей в кимберлитах поля Катока (северо-восточная часть Анголы)

Отношения	Трубки											
	Катока				Камитонго-I		Камитонго-II		Какелэ-I		Какелэ-II	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Zr/Nb	0,89	1,06	0,92	1,12	1,05	1,67	0,98	1,05	1,62	1,35	1,330	1,70
La/Nb	0,58	0,66	0,50	0,98	0,91	0,83	0,55	0,80	0,63	0,36	0,43	0,48
Ba/Nb	4,43	6,71	3,71	7,27	5,49	11,18	9,94	4,38	16,94	10,14	20,59	24,39
Ba/Th	51,45	64,88	36,03	24,25	42,71	90,62	136,26	46,19	166,83	204,06	337,51	376,76
Rb/Nb	0,08	0,17	0,36	0,37	0,17	0,43	0,18	0,07	0,86	0,30	0,42	0,39
Th/Nb	0,09	0,10	0,10	0,30	0,13	0,12	0,13	0,095	0,10	0,05	0,06	0,06
Th/La	0,15	0,16	0,20	0,31	0,14	0,15	0,13	0,12	0,16	0,14	0,14	0,13
Ba/La	7,68	10,16	7,37	7,42	6,01	13,45	17,96	5,49	26,55	28,46	48,02	50,88
U/Pb	0,25	0,27	0,28	0,55	0,19	0,13	0,47	0,55	0,14	0,21	0,14	0,17
Rb/Sr	0,03	0,03	0,05	0,06	0,02	0,10	0,04	0,02	0,10	0,06	0,07	0,06
La/Yb	103,53	74,58	59,39	41,19	93,57	49,21	84,38	122,10	48,60	43,20	51,47	53,99
Th/Pb	1,18	0,80	1,00	2,16	1,70	0,54	0,64	1,37	0,55	0,85	0,46	0,70
Sm/Nd	0,14	0,16	0,16	0,20	0,13	0,17	0,14	0,14	0,16	0,17	0,16	0,16
Ce/Sr	0,32	0,19	0,12	0,28	0,19	0,28	0,21	0,32	0,12	0,13	0,13	0,12
Nb/U	54,94	28,49	35,07	13,16	69,45	33,98	18,58	26,44	38,45	80,10	54,20	63,63
Zr/Hf	39,44	41,97	37,00	38,66	39,29	39,19	45,45	46,26	39,32	34,81	38,48	40,40
Ba/Rb	57,31	39,63	10,38	19,86	33,08	26,10	54,92	66,33	19,61	33,41	49,32	62,68
Th/U	4,73	2,94	3,61	3,95	8,93	4,19	1,35	2,50	3,90	3,98	3,31	4,12
Nb/La	1,73	1,51	1,99	1,02	1,09	1,20	1,81	1,25	1,57	2,81	2,33	2,08
Ba/Sr	1,55	1,15	0,54	1,11	0,53	2,60	2,20	1,10	1,94	2,01	3,47	3,58
Nb/Ta	12,35	12,31	10,75	13,23	17,72	11,54	14,93	20,83	14,37	9,78	12,75	12,45
Ce/Y	13,01	9,51	7,81	7,32	20,41	5,35	10,95	13,76	6,67	6,93	7,30	8,01

кимберлита трубки Луите, резко различающиеся между собой по степени карбонатизации. Наиболее карбонатизированный кимберлит (количество карбонатов 20%) имеет самые высокие концентрации Zr 352,14 ppm, Y 31,13 ppm и общей суммой редкоземельных элементов 716,68 ppm (табл. 1, аномалия 20). По Ce/Sr 0,38 и Nb/La 0,7 данный образец попадает в поле кимберлитов II группы Южной Африки [13]. Однако низкие содержания K₂O, BaO, Rb, U, а также пониженные TiO₂ не позволяют отнести его по петрогеохимическим признакам к кимберлитам II группы Южной Африки или оранжита. Серпентинизированный порфиновый кимберлит трубки Луите (см. табл. 1, аномалия 21) с количеством карбонатной фазы 2% характеризуется на порядок ниже величинами Zr 92,42 ppm, Y 6,43 ppm, а также общей суммой редкоземельных элементов 103,99 ppm. По геохимическим особенностям данный образец порфинового кимберлита аналогичен кимберлитовой брекчии трубки Луите (см. табл. 1, аномалия 22).

В остальных кимберлитовых телах поля Катока (трубки Катока, Камитонго-I, -II, аномалии 1, 8) петрогеохимический состав кимберлитов в большей степени зависит от их фациального типа.

Порфиновые кимберлиты (см. табл. 1) в отличие от кимберлитовых брекчий обогащены Zr (133,64—352,14 ppm), Nb (124,73—215,79 ppm), Ce (128,16—331,24 ppm), Y (10,64—31,13 ppm), La (54,4—203,36 ppm) и редкоземельными элементами (288,36—663,03 ppm). Большинство из них характеризуется повышенными содержаниями TiO₂ (0,98—2,89%), P₂O₅ (0,85—1,68%) и более интенсивной степенью карбонатизации.

Кимберлитовые брекчии поля Катока (см. табл. 1) существенно обеднены Zr (73,53—105,9 ppm), Nb (54,51—78,51 ppm), Ce (43,15—70,84 ppm), Y (5,9—9,06 ppm), La (24,27—47,30 ppm) и редкоземельными элементами (100,14—276,87 ppm). Концентрации HFSE (высокозарядных элементов) и REE (редкоземельных легких и тяже-

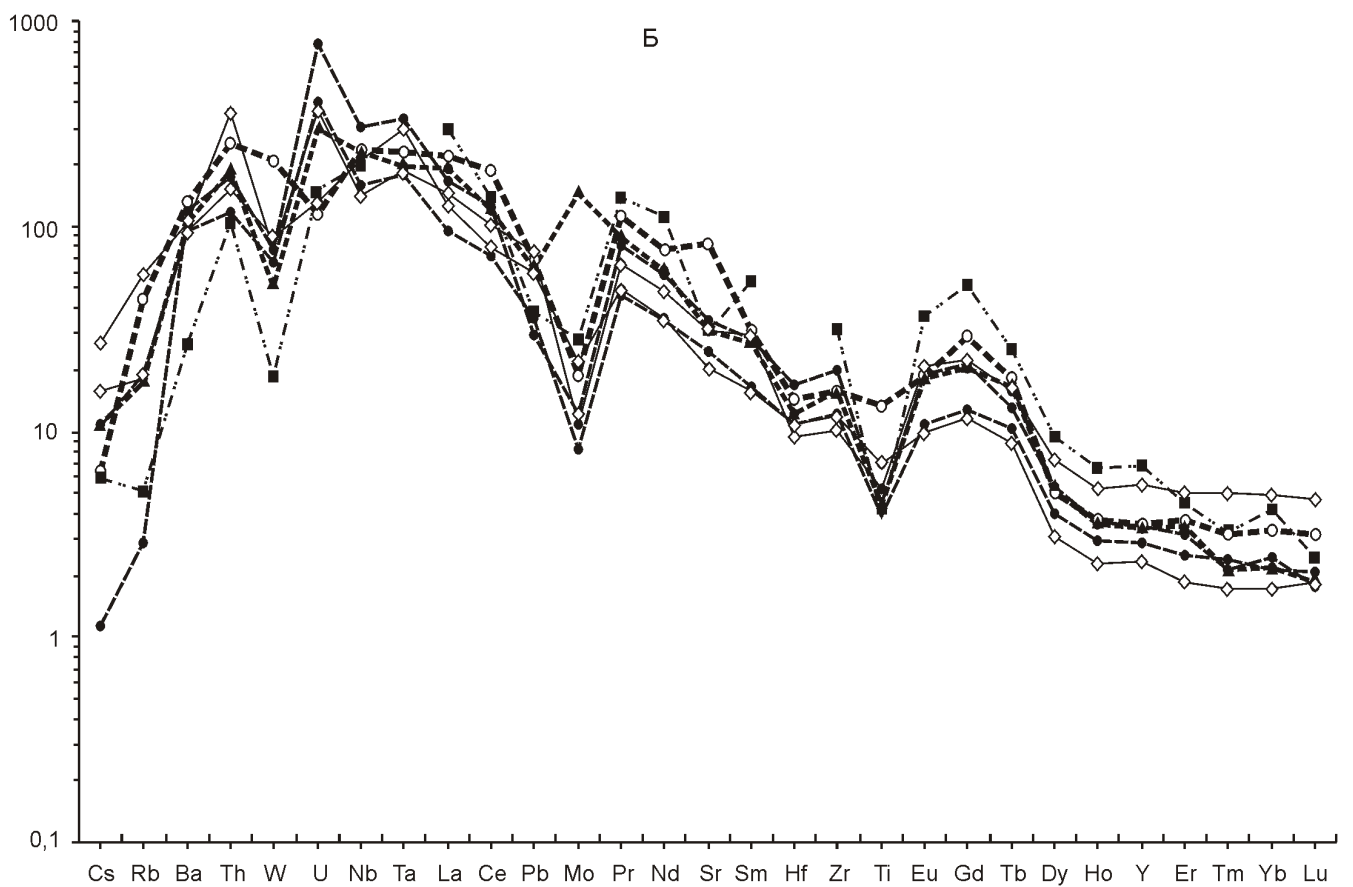
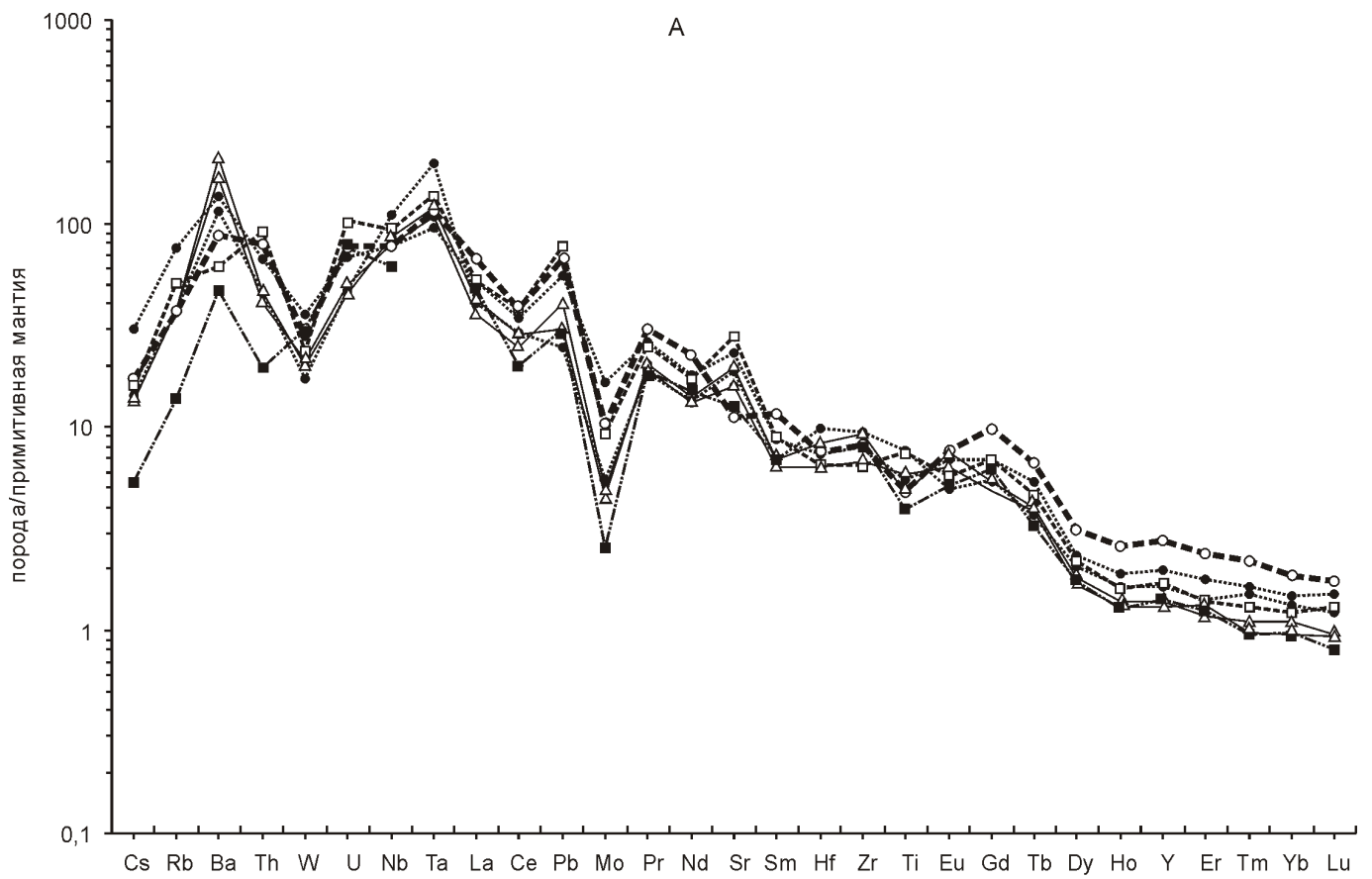
Ан. 1		Ан. 2	Ан. 3	Ан. 5	Ан. 8		Трубка Луите		
13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
0,85	1,09	1,66	0,83	1,11	1,03	1,21	2,48	2,12	1,43
0,32	0,55	0,68	0,34	0,44	0,53	0,57	1,43	0,75	0,69
7,99	6,53	13,35	3,92	11,39	3,85	5,87	1,32	7,53	12,25
186,39	55,91	172,39	83,46	131,02	56,60	66,68	21,29	199,02	245,31
0,10	0,49	0,39	0,05	0,39	0,01	0,10	0,02	0,20	0,10
0,04	0,12	0,08	0,05	0,09	0,07	0,09	0,06	0,04	0,05
0,13	0,21	0,11	0,14	0,20	0,13	0,15	0,04	0,05	0,07
24,84	11,97	19,66	11,45	26,11	7,23	10,22	0,92	10,05	17,74
0,64	0,15	1,80	0,33	1,42	2,99	1,27	0,45	0,28	1,28
0,055	0,055	0,04	0,95	0,09	0,002	0,02	0,01	0,03	0,02
64,68	60,26	80,04	67,08	50,15	96,35	61,79	98,72	68,08	75,08
1,02	0,53	1,88	0,96	1,04	2,69	1,50	1,24	0,29	0,46
0,16	0,17	0,17	0,17	0,17	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16
0,33	0,11	0,13	0,24	0,19	0,30	0,25	0,38	0,13	0,17
37,29	30,48	13,48	62,07	8,41	13,21	13,48	44,45	27,61	7,41
37,09	35,76	40,13	34,41	31,95	42,75	40,74	Не опр.	Не опр.	Не опр.
89,45	13,35	34,25	84,67	29,25	455,17	55,82	58,15	37,49	118,70
1,60	3,56	1,04	2,91	0,73	0,90	1,19	2,76	1,04	0,36
3,11	1,83	1,47	2,92	2,29	1,88	1,74	0,70	1,33	1,45
4,93	0,73	1,33	1,59	2,55	1,12	1,30	0,29	1,25	2,67
10,39	11,53	8,85	10,86	9,38	15,81	15,42	Не опр.	Не опр.	Не опр.
3,61	8,74	10,14	9,39	8,00	14,12	9,78	7,91	5,49	6,48

лых элементов) в кимберлитовых брекчиях не проявляют закономерных связей с содержанием оксидов титана и калия, которые изменяются в широких пределах (0,83—3,17% и 0,07—1,14% соответственно). Повышение концентраций HFSE и REE элементов в кимберлитовых брекчиях, как и в порфировых кимберлитах, зависит от степени карбонатизации и содержания P₂O₅ (см. табл. 1).

В целом среди всей выборки ангольских кимберлитов можно выделить две контрастные петрогеохимические группы: 1) кимберлиты, значительно обогащенные HFSE и REE; к ним относятся порфировые кимберлиты трубок Камитонго-I, -II, Катока, аномалий 1, 2, 8, карбонатизированный порфировый кимберлит трубки Луите, а также кимберлитовая брекчия аномалии 8; 2) кимберлиты обедненные HFSE и REE — кимберлитовые брекчия трубок Какелэ-I, -II, Камитонго-I, серпентинизированный порфировый кимберлит трубки Луите.

Геохимические особенности кимберлитов поля Катока рассмотрены с использованием индикаторных отношений элементов-примесей (табл. 2) и спайдерграмм (рис. 3).

Кимберлиты каждой из групп характеризуются определенными пределами вариаций (с небольшими отклонениями) индикаторных отношений элементов-примесей (см. табл. 2). Для кимберлитов первой группы свойственны низкие значения Ba/La (5,49—7,68), Ba/Nb (1,32—7,27), Ba/Th (21,29—66,68) и повышенные величины Ce/Y (7,32—20,41), La/Yb (74,58—122,1). На спайдерграмме кимберлитов (см. рис. 3), наиболее обогащенных HFSE, REE, отмечаются отчетливые максимумы содержаний Th, U, Nb и минимумы Pb, Hf, Zr, Ti. Распределение элементов от Nb до Mo во всех образцах носит плавный и выдержанный характер. Локальные отклонения значений отдельных элементов наблюдаются в кимберлитах Камитонго-I (максимумы W, Sr, Gd), Камитонго-II (Mo), Луите (Sm, Yb, Gd).



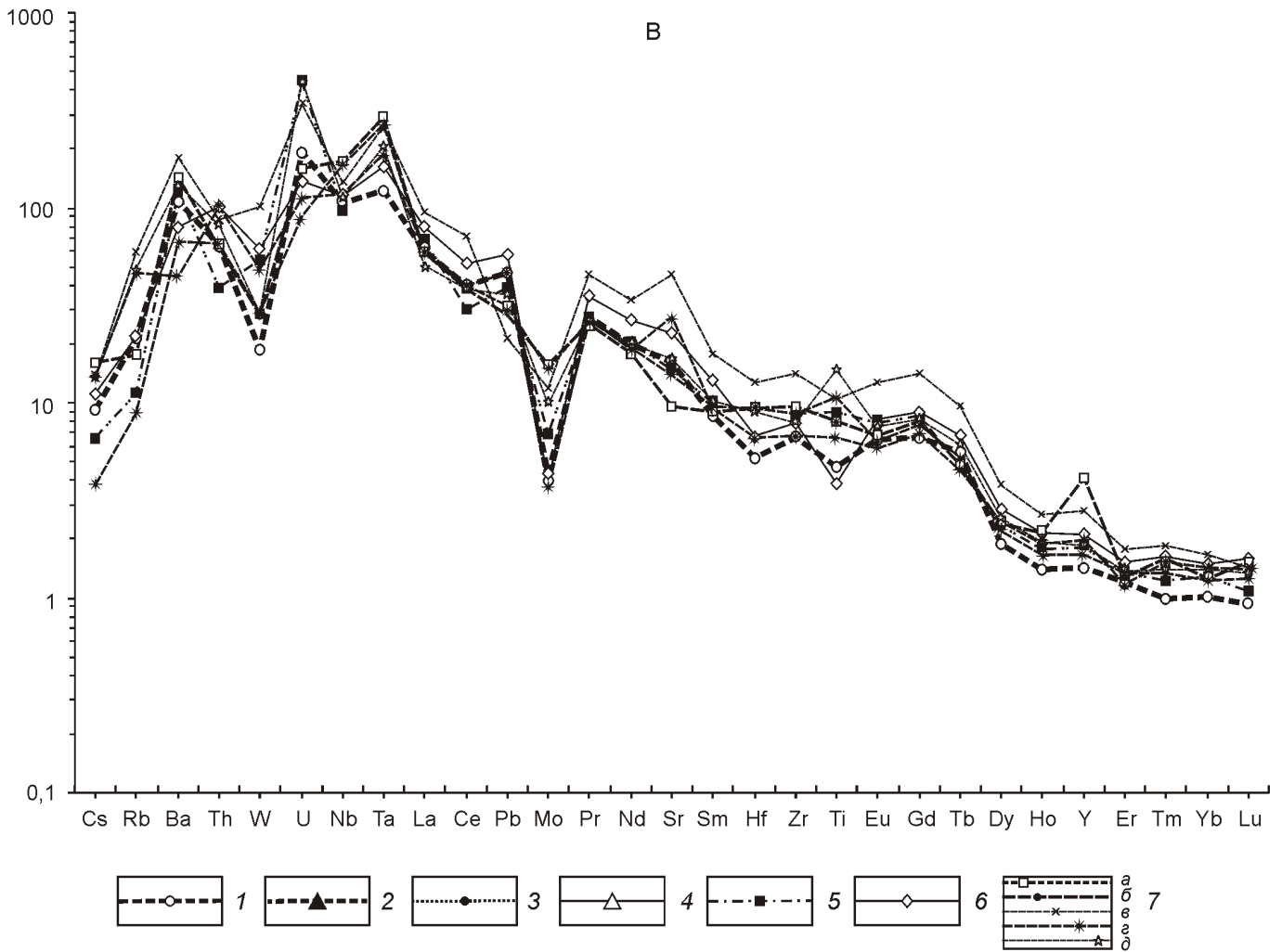


Рис. 3. Распределение элементов-примесей, нормированных к примитивной мантии [11] в ангольских кимберлитах:

петрогеохимические группы кимберлитов: А — 1, Б — 2, В — 3; трубки: 1 — Катока-I, 2 — Камитонго-I, 3 — Камитонго-II, 4 — Луите, 5 — Какелэ-I, 6 — Какелэ-II, 7 — аномалии: а — 1, б — 8, в — 2, г — 3, д — 5

По значениям индикаторных отношений и характеру распределения элементов-примесей кимберлиты первой группы близки кимберлитам группы I Южной Африки [13] и кимберлитам Якутии (за исключением кимберлитов Накынского поля) [3].

Кимберлиты второй группы имеют высокие величины Ba/La (10,05—50,88), Ba/Nb (7,53—24,39), Ba/Th (90,62—376,76) и низкие Ce/Y (5,35—8,01), La/Yb (49,21—68,08). Особенно контрастные различия между двумя группами кимберлитов отмечаются при сопоставлении спайдерграмм (см. рис. 3, А, Б). Кимберлиты второй группы характеризуются четкими максимумами Ba, Ta, Pb и отрицательными аномалиями Th, U, Nb, Ce. На спайдерграмме (см. рис. 3, Б) наблюдается более низкий уровень концентраций всех элементов, а также слабо дифференцированный, пологий наклон спектра распределения HFSE и REE.

По геохимическим признакам изученные кимберлиты второй группы близки золотоискочному петрогеохимическому типу кимберлитов трубок Пионерская, Ломоносовская (Архангельская алмазоносная провинция), а также накын-

скому петрогеохимическому типу кимберлитов трубки Нюрбинская (Якутская алмазоносная провинция) [2, 3].

Остальные ангольские кимберлиты (третья группа), имеющие промежуточный петрогеохимический состав (см. таблицы 1, 2, аномалии 2, 3, 7, 13, 15—17, 22) по отдельным концентрациям HFSE, REE, индикаторным отношениям и спектру распределения элементов-примесей (см. рис. 3, В) проявляют наибольшее сходство с кимберлитами трубок Якутской алмазоносной провинции: Мир, Интернациональная, Айхал и даек Сербия, Монтичеллитовая, а также с кимберлитами трубок Пионерская и им. В.Гриба (Архангельская алмазоносная провинция) [2, 3].

Таким образом, обогащение редкими и редкоземельными элементами кимберлитов поля Катока зависит от степени карбонатизации пород и незначительно от их фациального типа. Наиболее высокие концентрации HFSE (высокочарядные элементы) и REE (редкоземельные элементы) имеют карбонатизированные порфиоровые кимберлиты (трубки Луите, Камитонго-I), а наименьшие — кимберлитовые брекчии с количеством карбонатов не 3% (трубка Какелэ-I). Особенно контрастно различие между карбона-

тизированным и серпентинизированным образцами порфинового кимберлита трубки Луите (см. рис. 3, А, Б).

Кимберлиты I группы Южной Африки и подавляющее большинство кимберлитов Якутии возникли из слабоистощенной астеносферной мантии типа BSE (средний состав Земли) под воздействием богатых CO₂ флюидов [1, 10, 12]. Источником низкотитанистых кимберлитов накынского и золотицкого типа являются участки литосферной мантии, истощенной HFSE, но слабо обогащенной LILE (крупноионные литофильные элементы) [2, 3].

Исходя из минералого-петрографических и петрогеохимических особенностей изученных кимберлитов, можно предположить, что кимберлиты поля Катока сформировались в результате смешения в различных пропорциях кимберлитовых выплавов из мантийной литосферы, обедненной HFSE и слабо обогащенной LILE с богатым CO₂ флюидорасплавом, насыщенным HFSE и LREE. От первых фаз кимберлитового магматизма поля Катока к более поздним уменьшалось влияние карбонатитоподобного флюидорасплава на петрогеохимический состав ангольских кимберлитов.

Существование кимберлитовой магмы в виде карбонатно-силикатного расплава, насыщенного CO₂, доказано расчетными и экспериментальными работами [7–9]. Основные концентраторы HFSE и REE — главные минералы (кальцит, апатит, бадделейт) карбонатной составляющей кимберлитового расплава [4, 5]. Процессы флюидно-магматической дифференциации карбонатно-силикатного расплава могли приводить к образованию контрастных петрогеохимических различий в пределах одной фазы внедрения, как, например, в трубке Луите. В результате дегазации CO₂ и (или) ликвации карбонатной составляющей в процессе заполнения диатремовой полости силикатный кимберлитовый расплав существенно обеднялся HFSE и REE.

Таким образом, петрогеохимический состав ангольских кимберлитов имеет признаки двух мантийных источников: 1) слабоистощенной астеносферной мантии (BSE) и 2) литосферной мантии, истощенной HFSE, но слабо обогащенной LILE. Кроме того, существенное влияние на геохимию редких и редкоземельных элементов кимберлитов оказывали процессы ликвации и флюидно-магматической дифференциации исходного кимберлитового расплава.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Агашев А.М., Орихаши Ю., Ватанабе Т.* и др. Изотопно-геохимическая характеристика кимберлитов Сибирской платформы в связи с проблемой их происхождения // Геология и геофизика. 2000. Т. 41. № 1. С. 90—99.
2. *Богатилов О.А., Кононова В.А., Первов В.А.* и др. Источники, геодинамическая обстановка образования и перспективы алмазоносности кимберлитов окраины Русской плиты: Sr-Nd-изотопия и (СР-MS) геохимия // Петрология. 2001. Т. 9. № 3. С. 227—241.
3. *Богатилов О.А., Кононова В.А., Голубева Ю.Ю.* и др. // Петрогеохимические и изотопные вариации состава кимберлитов Якутии и их причины // Геохимия. 2004. № 9. С. 915—939.
4. *Илупин И.П., Ваганов В.И., Прокопчук Б.И.* Кимберлиты: Справочник. — М.: Недра, 1990.
5. *Маришицев В.К.* Вертикальная неоднородность кимберлитовых тел Якутии. — Новосибирск: Наука, 1986.
6. *Носыко С.Ф., Ротман А.Я.* Специфика кимберлитовых проявлений и перспективы алмазоносности северо-востока Анголы // Проблемы прогнозирования, поисков и изучения месторождений полезных ископаемых на пороге XXI века. — Воронеж: Воронеж. гос. ун-т, 2003. С. 102—108.
7. *Перчук Л.Л., Ваганов В.И.* Природа кимберлитов Якутии // Проблема петрологии земной коры и верхней мантии. — Новосибирск, 1978. С. 27—48.
8. *Dalton J.A., Presnall D.C.* The continuum of primary carbonatite-kimberlite melt composition in equilibrium with lherzolite: data from the system CaO—MgO—Al₂O₃—SiO₂—CO₂ at 6 GPa // J.Petrol. 1998. Vol. 39. P. 1953—1964.
9. *Eggler D.H.* The principle of the zone of invariant vapor composition: an example in the system CaO—MgO—SiO₂—CO₂—H₂O and implications for the mantle solidus // Cam. Inst. Wash. Yearbook. 1977. P. 428—435.
10. *Makhotkin I.L., Sablukov S.M., Zhuravlev D.Z.* et al. Geochemistry and Sr-Nd isotopic composition of kimberlites, melilitites and basalts from Arkhangelsk region, Russia // Extended Abstr. 6th Kimberlite Conf. Novosibirsk, Russia. 1995. P. 342—344.
11. *McDonough W.F., Sun S.S.* The composition of the Earth // Chem. Geol. 1955. Vol. 120. P. 223—253.
12. *Menzies M.A., Wass S.Y.* CO₂ and LREE-rich mantle below Eastern Australia: a REE and isotopic study of alkaline magmas and apatite-rich mantle xenoliths from the Southern Highlands Province, Australia: an enriched mantle origin // Earth Planet. Sci. Lett. 1983. Vol. 65. P. 287—302.
13. *Taylor W.R., Tompkins L.A., Haggerty S.E.* Comparative geochemistry of West African kimberlites: evidence for a micaceous kimberlite end member of sublithospheric origin // Geochim. et Cosmochim. Acta. 1994. Vol. 58. № 19. P. 4017—4037.