

УДК 549.01 + 549.08 + 549.765.2

## ТИТАНИТ В КОЭСИТ-КИАНИТОВОМ ЭКЛОГИТЕ ИЗ КИМБЕРЛИТОВОЙ ТРУБКИ УДАЧНАЯ

© 2022 г. Д. С. Михайленко<sup>1,2,3,6,\*</sup>, С. Аулбах<sup>4,5</sup>, А. В. Корсаков<sup>1</sup>,  
академик КАН Я. Шу<sup>2,3</sup>, член-корреспондент РАН Ф. В. Каминский<sup>6</sup>

Поступило 15.12.2021 г.

После доработки 23.12.2021 г.

Принято к публикации 27.12.2021 г.

Детально исследованы минералого-геохимические особенности титанита и сопутствующих минералов в редком образце кианит-коэсит-рутилсодержащего эклогита из кимберлитовой трубки “Удачная-Восточная”. Субидiomорфные зерна титанита (100–300 мкм) диагностированы в межзерновом пространстве. Состав отдельных зерен титанита характеризуется постоянным присутствием примесей  $Al_2O_3$ , F,  $P_2O_5$ , Zr и Sr, но варьирует в пределах ксенолита. Согласно отсутствию включений титанита в породообразующих минералах и его нахождению в межзерновом пространстве, кристаллизация титанита в изученном образце происходила на поздней стадии его образования, вероятнее всего в процессе метасоматического воздействия флюида/расплава. Кристаллизация породообразующих минералов (гранат + омфациит + кианит) и акцессорного рутила происходила совместно при  $3.5 \pm 0.32$  ГПа и  $920 \pm 65^\circ C$ . Значение  $Eu/Eu^* = 1.06$  в реконструированном валовом составе породы, высокое молярное содержание кианита (~17 об. %), а также значение  $Ca\# = Ca/(Ca + Mg + Fe + Mn) > 0.5$  в гранате указывают на субдукционную природу изученного эклогита. Вероятнее всего, формирование титанита в изученном образце происходило в результате метасоматического воздействия флюида/расплава, обогащенного кальцием, стронцием, крупными литофильными элементами и свинцом, по механизму, схожему с образованием эклогитов в комплексах Западного Тянь-Шаня.

**Ключевые слова:** эклогиты, титанит, рутил, кимберлиты, субдукция, метаморфизм

**DOI:** 10.31857/S2686739722040120

Среди глубинных включений в кимберлитах значительную роль играют эклогиты, среди которых преобладают биминеральные высокобарические разности, состоящие из граната и омфациита, в то время как кианитовые и коэсит-кианитовые эклогиты являются более редкими разновидностями [1]. Типичным акцессорным минералом в

этих эклогитах является рутил, который является главным минералом-концентратором высокозарядных элементов (HFSE). Наряду с рутилом, другим акцессорным минералом является значительно более редкий титанит (сфен),  $[Ca(Ti,Al,Fe^{3+})SiO_4(O,F,OH)]$ , который также является минералом-концентратором HFSE. До настоящего времени титанит в ксенолитах эклогитов из кимберлитов, насколько нам известно, в литературе описан не был. В отличие от других титансодержащих фаз, титанит играет важную роль в распределении редкоземельных элементов (РЗЭ; преимущественно Sm, Eu, Gd и Nd) в породе, а при отсутствии рутила также Ta и Nb. Присутствие рутила и титанита в эклогитах может указывать на их субдукционную природу (например, [2]).

Субдукция пород океанической и континентальной литосферы на мантийные глубины играет ключевую роль в процессах корово-мантийного рециклинга. В результате метаморфических преобразований пород мафического состава в процессе субдукции в высоко- и ультравысокобарических условиях формируются эклогиты, явля-

<sup>1</sup>Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева  
Сибирского отделения Российской академии наук,  
Новосибирск, Россия

<sup>2</sup>Институт геохимии Китайской академии наук,  
Гуанчжоу, Китай

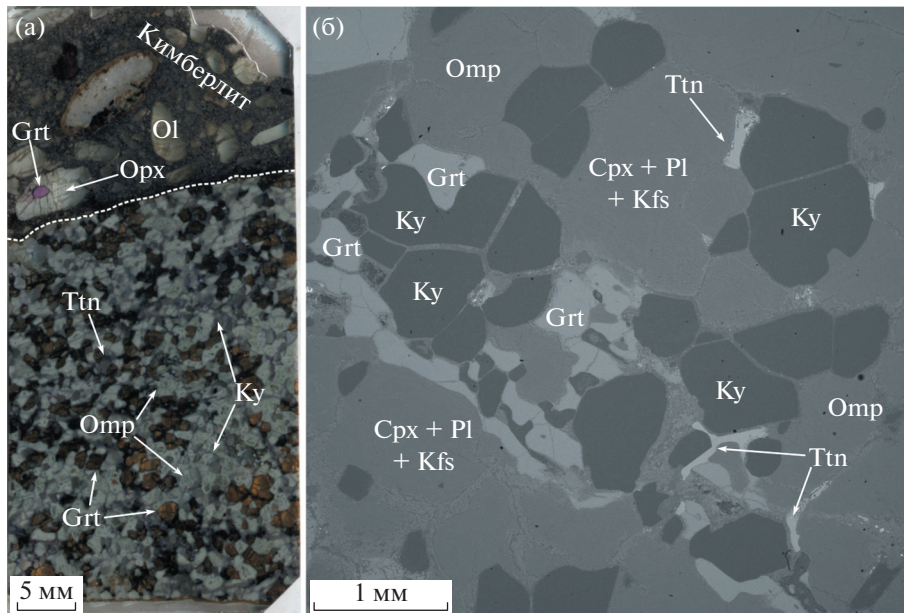
<sup>3</sup>Центр изучения глубинного строения Земли  
Китайской академии наук, Гуанчжоу, Китай

<sup>4</sup>Институт наук о Земле, университет им. Гете,  
Франкфурт-на-Майне, Германия

<sup>5</sup>Изотопно-элементный исследовательский центр,  
университет им. Гете, Франкфурт-на-Майне, Германия

<sup>6</sup>Институт геохимии и аналитической химии  
им. В.И. Вернадского Российской академии наук,  
Москва, Россия

\*E-mail: pazilovdenis@igm.nsc.ru



**Рис. 1.** а – Микрофотография плоскополированной пластинки эклогита Uv-180 в кимберлите; б – Микрофотографии в режиме обратно-рассеянных электронов (BSE) фрагмента эклогита Uv-180, демонстрирующего положение породообразующих и акцессорных минералов в породе. Условные обозначения: Grt – гранат; Opx – ортопироксен; Ol – оливин; Ttn – титанит; Ky – кианит; Omp – омфацит; Cpx+Pl+Kfs – диопсид-плагиоклаз-калишпатовый симплектит.

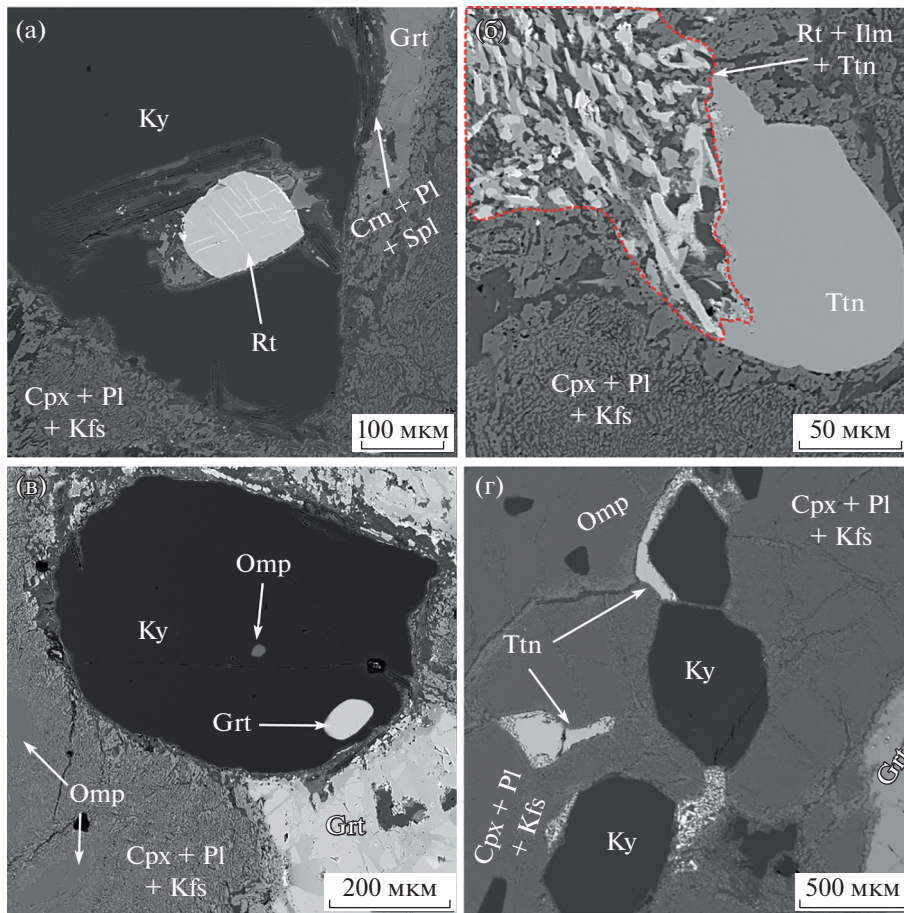
ющиеся важным компонентом литосферной мантии в основании древних кратонов. В ряде работ было показано, что эклогиты из кимберлитов в большинстве случаев имеют архейский возраст [2–5], что дает возможность оценить роль субдукции в раннем докембрии и вклад корового и мантийного компонентов при формировании глубинных частей литосферы.

В представленной работе мы приводим результаты детального минералого-геохимического исследования породообразующих и акцессорных минералов из редкого титанит- и рутилсодержащего коэсит-кианитового эклогита из кимберлитовой трубки “Удачная-Восточная”. Нами показано, что значительное метасоматическое воздействие флюида/расплава на изученный эклогит привело к образованию редкой минеральной ассоциации при  $3.5 \pm 0.32$  ГПа и  $920 \pm 65^\circ\text{C}$ .

Ксенолит эклогита овальной формы Uv-180 ( $7.5 \times 5 \times 5$  см) найден в свежем кимберлите трубки “Удачная-Восточная”. Главные минералы эклогита представлены бледно-оранжевым гранатом (20 об. %), серовато-зеленым моноклинным пироксеном (57 об. %) и ярко-голубым кианитом (17 об. %), среди которых присутствуют розовые зерна титанита (6 об. %) (рис. 1а). Первичные акцессорные минералы представлены рутилом, кальцитом и коэситом. Следует отметить неоднородное распределение породообразующих минералов в пределах ксенолита. В левой части отмечается скопление кианита и коэсита, при этом в остальной части образца коэсит/кварц не диагно-

стирован. Титанит распределен равномерно в пределах изучаемого образца. В породообразующих минералах диагностированы следующие минеральные твердофазные включения: в гранате – омфацит, рутил, кианит и кальцит; в омфаците – кианит, рутил и гранат; в кианите – гранат, омфацит и рутил (рис. 1б). Включения титанита не диагностированы в неизмененных порфиробластах граната, кианита и омфацита. Коэсит, частично замещенный кварцем, представлен зернистыми агрегатами неправильной формы, расположенными в межзерновом пространстве. Породообразующие минералы в разной степени изменены, что выражается в развитии келифитовых кайм вокруг граната, замещении омфацита симплектитовым агрегатом клинопироксена, плагиоклаза и калиевого полевого шпата, формировании плагиоклаз-корундового и/или плагиоклаз-шпинелевого симплекти-та вокруг кианита, развития вокруг титанита кальцит-плагиоклаз-ильменитового или рутил-ильменит-альбитового симплекти-та. Кроме того, для рутила отмечаются каймы (~2 мкм) и субмикронные ламели ильменита (рис. 2а), а реликты коэсита окружены частоклоподобным (“palisade texture”) поликристаллическим кварцевым обрамлением.

Аналитические работы выполнены в “ЦКП многоэлементных и изотопных исследований СО РАН” (г. Новосибирск) и Франкфуртском изотопно-элементном исследовательском центре FIERCE; институт им. Гете, Франкфурт, Германия. Состав минералов ксенолита определен на



**Рис. 2.** BSE-микрофотографии отдельных участков из эклогита Uv-180: а – Кианит с включением рутила; б – Реликт титанита, частично замещенный рутил-ильменит-титанитовым симплектитом; в – Зерно кианита с неизменными включениями граната и омфацита; г – Ксеноморфные зерна титанита на границе зерен кианита и омфацита. Условные обозначения: Grt – гранат; Rt – рутил; Ttn – титанит; Ky – кианит; Omp – омфацит; Cpx+Pl+Kfs – диопсид-плаггиоклаз-калишпатовый симплектит; Crn+Pl+Kfs – корунд-плаггиоклаз-калишпатовый симплектит; Rt-Ilm-Ttn – рутил-ильменит-титанитовый симплектит.

рентгеноспектральном микроанализаторе “Jeol” JXA-8100; для анализа породообразующих силикатов (граната, омфацита и титанита) использовались ускоряющее напряжение 15 кВ и ток зонда 20 нА, время набора сигнала на пике и фоне при определении концентраций петрогенных элементов и микропримесей (P, Mn, Ti, Cr) составляло 80 и 40 с (табл. 1) соответственно. Концентрации редких и рассеянных элементов в гранате, омфаците, рутиле и титаните были определены с использованием лазерной абляции (ArF Excimer) индуктивно-связанной плазмы (LA-ICPMS) ELEMENT XR (“Thermo Fisher Scientific”) с лазером 193 нм (CompuPro 102, Coherent) в институте им. Гете (Франкфурт-на-Майне, Германия). В качестве стандарта использовалось синтетическое стекло NIST SRM 612 с дальнейшим нормированием на содержание SiO<sub>2</sub>, предварительно определенном на рентгеноспектральном микро-

анализаторе. Детальное описание параметров измерений представлено в работе [5].

Гранаты по химическому составу относятся к пироп–гроссуляр–альмандиновому ряду (Prp<sub>17</sub>Gr<sub>54</sub>Alm<sub>23</sub>Adr<sub>4</sub>) и, согласно классификации Колмана [6], соответствуют группе С. Гранат демонстрирует очень высокие содержания CaO, достигающие 22.8 мас. %. Содержания Na<sub>2</sub>O и TiO<sub>2</sub> варьируют от 0.1 до 0.2 мас. % и от 0.2 до 0.3 мас. % соответственно. Гранат из образца Uv-180 характеризуется повышенным содержанием тяжелых РЗЭ относительно легких РЗЭ (La<sub>n</sub>/Sm<sub>n</sub> 0.01; Dy<sub>n</sub>/Lu<sub>n</sub> 1.5 2; La<sub>n</sub>/Lu<sub>n</sub> 0.02) и наличием положительной европиевой аномалии (Eu/Eu\* = 1.23) (табл. 1; рис. 3а). Содержания никеля и ванадия в гранате составляют 35 и 139 гр/т соответственно.

Первичный клинопироксен, слагающий основную массу породы, является омфацитом [7] и, согласно классификации Тэйлора и Нила [8], от-

**Таблица 1.** Представительные анализы содержания главных (мас. %) и редких элементов (г/т) в омфаците, гранате и титаните из коэсит-кианитового эклогита Uv-180 из кимберлитовой трубки “Удачная-Восточная”

	Омфацит (57 об. %)			Гранат (20 об. %)			Титанит (6 об. %)		Uv-180
	Матрикс		Включение	Матрикс		Включение	Матрикс		Порода*
SiO <sub>2</sub>	55.9	55.6	54.8	40.1	40.1	40.2	31.1	30.9	47.8
TiO <sub>2</sub>	0.22	0.23	0.18	0.28	0.21	0.17	36.9	37.0	2.28
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.6	14.9	13.5	21.3	21.4	21.4	3.02	3.02	23.2
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.02	0.01	0.01	0.02	0.03	0.05	н.п.	н.п.	0.01
FeO	2.54	2.53	2.93	12.0	12.0	12.3	н.п.	н.п.	3.91
MnO	0.00	0.01	0.02	0.18	0.20	0.17	н.п.	н.п.	0.05
MgO	6.86	6.93	7.80	4.57	4.52	4.77	н.п.	н.п.	4.91
CaO	12.6	12.8	14.5	21.9	21.8	21.5	28.0	28.1	13.2
Na <sub>2</sub> O	6.62	6.64	5.62	0.11	0.09	0.06	н.п.	н.п.	3.99
K <sub>2</sub> O	0.01	0.01	0.03	0.00	0.01	0.01	н.п.	н.п.	0.02
F	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	0.76	0.93	н.о.
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	н.п.	н.п.	н.п.	н.п.	н.п.	н.п.	0.57	0.48	н.о.
Сумма	99.4	99.6	99.4	100.5	100.4	100.7	100.3	100.4	100.0
Li	29	20	20	1.2	1.2	н.о.	0.843	0.902	13
Sc	10	10	9.9	27	27	н.о.	1.2	1.1	11
V	213	213	201	130	139	н.о.	230	231	188
Co	23	24	19	42	42	н.о.	0.188	0.189	21
Ni	490	493	381	35	35	н.о.	0.408	0.468	242
Cu	4.9	5.1	4.6	0.280	0.240	н.о.	0.327	0.306	3.0
Rb	0.005	0.004	1.4	0.009	0.008	н.о.	0.007	0.013	3.0
Sr	103	103	108	1.9	2.0	н.о.	717	717	117
Y	0.098	0.103	0.121	12	12	н.о.	39	39	4.8
Zr	23	23	24	13	14	н.о.	262	265	32
Nb	0.002	0.001	н.п.	0.002	0.003	н.о.	42	45	4.5
Ba	н.п.	н.п.	0.026	н.п.	н.п.	н.о.	0.113	0.006	15
La	0.118	0.114	0.195	0.020	0.020	н.о.	161	162	10
Ce	0.761	0.724	1.3	0.375	0.371	н.о.	797	806	47
Pr	0.156	0.154	0.282	0.185	0.201	н.о.	133	133	8.0
Nd	0.853	0.842	1.6	2.4	2.4	н.о.	627	634	39
Sm	0.187	0.188	0.247	1.7	1.7	н.о.	122	122	7.7
Eu	0.048	0.054	0.072	0.817	0.819	н.о.	33	32	2.1
Gd	0.096	0.102	0.132	2.3	2.3	н.о.	55	56	3.8
Tb	0.010	0.009	0.011	0.356	0.375	н.о.	4.3	4.3	0.342
Dy	0.044	0.031	0.044	2.4	2.4	н.о.	15	15	1.4
Ho	0.005	0.006	0.007	0.465	0.466	н.о.	1.7	1.7	0.195
Er	0.009	0.007	0.007	1.2	1.3	н.о.	2.7	2.8	0.401
Tm	0.001	0.001	0.002	0.157	0.170	н.о.	0.212	0.204	0.047
Yb	0.006	0.004	0.005	1.1	1.2	н.о.	0.875	0.913	0.275
Lu	0.001	0.000	0.001	0.152	0.158	н.о.	0.079	0.100	0.034
Hf	1.1	1.1	1.1	0.226	0.199	н.о.	11	11	1.3
Ta	н.п.	н.п.	н.п.	0.001	н.п.	н.о.	4.7	7.1	0.347
Pb	1.6	1.6	1.7	0.009	0.008	н.о.	33	34	3.0
Th	н.п.	н.п.	0.002	0.001	0.000	н.о.	21	22	1.2
U	н.п.	н.п.	н.п.	0.003	0.003	н.о.	6.0	6.0	0.353

Примечание. Составы включений омфацита и граната в кианите также представлены. н.п. — ниже пределов обнаружения; н.о. — не определялось.

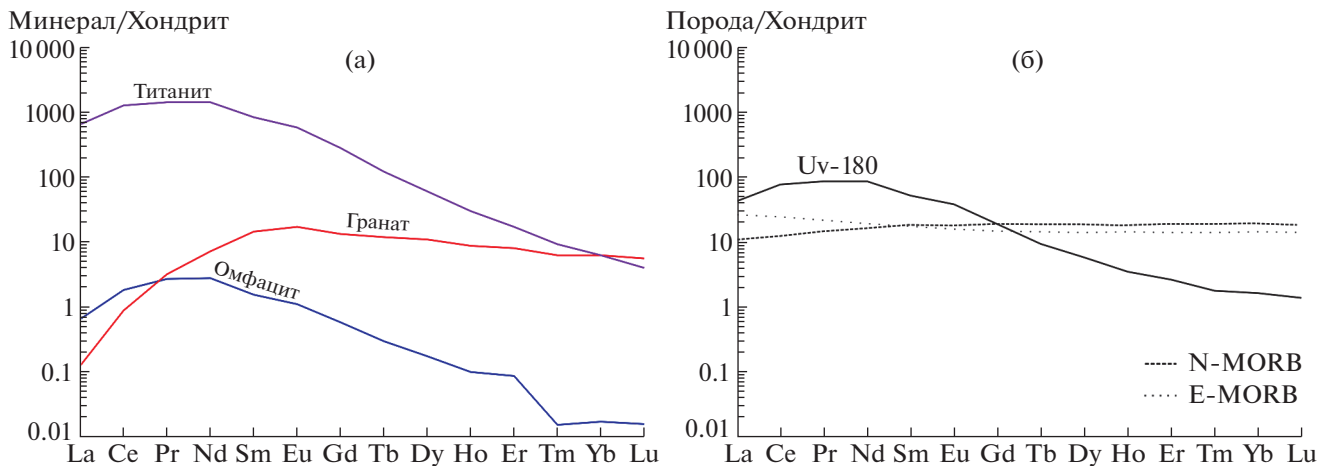


Рис. 3. (а) – Распределение редкоземельных элементов в гранате, омфациите и титаните в эклогите Uv-180; (б) – Реконструированный валовой состав Uv-180. Составы N-MORB и E-MORB согласно [9]. Спектры нормированы на хондрит C1 [9].

носится в группе С ( $Jd_{50}Di_{40}Hd_9$ ) с небольшими вариациями содержания  $Na_2O$  от 6.5 до 6.9 мас. %. Химический состав включений омфациита в кианите значительно отличается от омфациита в матриксе (табл. 1). Содержание  $K_2O$  в омфациите из матрикса и во включениях в кианите незначительно и варьирует от 0.01 до 0.05 мас. %. Омфациит характеризуется повышенным содержанием средних РЗЭ относительно тяжелых РЗЭ ( $La_n/Sm_n$  0.4;  $Dy_n/Lu_n$  3.9–8;  $n$  – нормированный на хондрит [7]) и демонстрирует слабopоложительную европиевую аномалию ( $Eu/Eu^* = 1.02$ ; рис. 3). Концентрация стронция составляет 103–108 гр/т при  $Sr/Sr^*$ , равном 5–8 ( $Sr/Sr^* = Sr_n/\sqrt{(Sm_n * Nd_n)}$ ) (табл. 1).

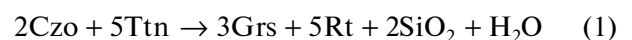
Распространение титанита в пределах образца неравномерное, без каких-либо пространственных закономерностей. Ксеноморфные зерна титанита (100–300 мкм) диагностированы в межзерновом пространстве между гранатом, омфациитом и кианитом (рис. 2б), в то время как включения титанита в порообразующих минералах отсутствуют. Титанит содержит примеси  $Al_2O_3$  (~3 мас. %), F (0.7–1.0 мас. %),  $P_2O_5$  (0.5–0.6 мас. %), Zr (260 гр/т) и Sr (717 гр/т) (табл. 1). Редкоэлементный спектр титанита, нормированный к составу хондрита [7], демонстрирует значительное обогащение легкими РЗЭ (~1000 хондритовых единиц) с плавным уменьшением к промежуточным и тяжелым РЗЭ (~10 хондритовых единиц). Европиевая аномалия в титаните практически отсутствует  $Eu/Eu^* = 1.04$ .

Валовой состав породы был рассчитан согласно методике, описанной в работе [10], и показывает следующие содержания петрогенных элементов: 47.6 мас. %  $SiO_2$ , 2.3 мас. %  $TiO_2$ ,

23.3 мас. %  $Al_2O_3$ , 3.9 мас. % FeO, 4.9 мас. % MgO, 13.3 мас. % CaO и 4 мас. %  $Na_2O$ . Согласно реконструированному составу, эклогит Uv-180 характеризуется дифференцированным спектром распределения РЗЭ с понижением от легких РЗЭ к тяжелым ( $\Sigma LREE = 104$  гр/т;  $\Sigma HREE = 2.7$  гр/т;  $La_n/Lu_n = 30.5$ ) (рис. 3б). Согласно редкоземельному спектру валового состава породы можно сделать вывод о том, что распределение РЗЭ и форму спектра контролирует титанит. Эклогит Uv-180 (табл. 1) показывает высокие содержания ванадия (188 гр/т), никеля (242 гр/т) и стронция (117 гр/т), при этом стронциевая ( $Sr/Sr^* = 0.24$ ) и европиевая ( $Eu/Eu^* = 1.06$ ) аномалии в реконструированном составе эклогита Uv-180 отсутствуют.

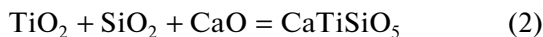
Геотермометр Равна и Терри [11] позволяет получить независимые оценки температуры и давления для гранат-пироксен-кианит-коэситовой минеральной ассоциации. Рассчитанные значения ( $3.5 \pm 0.32$  ГПа и  $920 \pm 65^\circ C$ ) соответствуют полю стабильности коэсита.

Титанит является преобладающим минералом в породах умеренных ступеней метаморфизма, преимущественно амфиболитовой фации, в то время как рутил образуется на фоне повышения давления при  $PT$ -параметрах, соответствующих условиям гранулитовой-эклогитовой фации [12], в результате реакции (1).

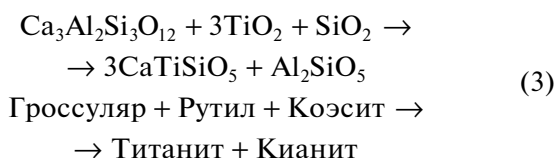


Модельная реакция образования титанита в метаморфических породах может быть записана в следующем виде  $TiO_2 + SiO_2 + CaO = CaTiSiO_5$ . В исследуемом образце, как и большинстве мета-

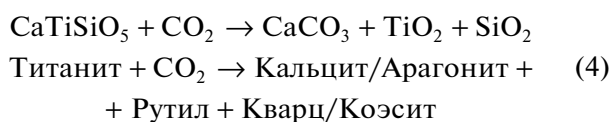
морфических пород, рутил и кварц/коэсит являются весьма распространенными минералами, тогда как СаО (известь) является крайне редким минералом, встречающимся в исключительных обстановках.



В то же время было показано, что в системе  $\text{CaTiAS}$  линии реакций для ассоциации гранат + титанит + клинопироксен + рутил + коэсит пересекаются в инвариантной точке при давлении 6 ГПа и температуре 1100°C [13]:



Карбонаты кальция или карбонатитовые расплавы встречаются в природе в породах различной глубинности и геодинамических обстановок, включая породы верхней и нижней мантии. Ранее участие карбонатно-силикатного расплава в породах Кокчетавского массива предполагалось для объяснения реакционных структур [14]. Образование титанита также определяется участием углекислотного флюида в метаморфических реакциях, что было показано при изучении карбонатно-силикатных ультравысокобарических пород Кокчетавского массива (Северный Казахстан). Так, флюид, сосуществующий с минеральной ассоциацией, отвечающей пику метаморфизма, был значительно обогащен  $\text{H}_2\text{O}$  при  $\text{XCO}_2 < 0.1$  [15]. Наиболее подходящим уравнением для определения  $\text{XCO}_2$  в титанит-рутил-содержащей минеральной ассоциации является следующая реакция [13]:



Титанит в ксенолитах эклогитов из кимберлитов вплоть до настоящего момента, насколько нам известно, в литературе описан не был. В последнее время большинством исследователей признается, что изначально кимберлитовые расплавы могли представлять собой щелочно-карбонатитовые расплавы [16], реликты которых были установлены и в нижнемантийных алмазах [17]. Таким образом, наличие в протолите карбонатов или взаимодействие ксенолита эклогита с карбонатитовым расплавом могло привести к появлению в породе титанита. Развитие реакционных кайм вокруг зерен граната, клинопироксена, киа-

нита и титанита указывает, что к моменту захвата кимберлитовым расплавом эта минеральная ассоциация уже существовала в изучаемом образце. Таким образом, формирование титанита в эклогитах не может быть связано с просачиванием кимберлитового расплава на стадии подъема.

Значительное метасоматическое изменение (ультра-)высокобарических пород, сформированных в результате субдукции их протолитов на глубины, превышающие 100 км, было показано на примере метаморфического комплекса в Западном Тянь-Шане (Западный Китай). В этом районе вмещающие породы голубосланцевой фации метаморфизма сечет карбонатно-кварцевая жила, содержащая также гранат, омфацил и титанит – характерные минералы для эклогитовой фации метаморфизма [18]. Предполагается, что внедрение обогащенного кальцием флюида привело к преобразованию вмещающих голубых сланцев в эклогит, со значительным перераспределением крупно-ионных литофильных и высокозарядных элементов, а также существенному увеличению содержания СаО от 6–7 мас. % в голубых сланцах до >13 мас. % в эклогите.

Считается, что коэсит-кианитовые эклогиты были образованы в результате субдукции комплексов океанической коры с их последующим преобразованием в ультравысокобарических условиях (например, [2]). Наличие европиевой аномалии ( $\text{Eu}/\text{Eu}^* = 1.23$ ) и низких суммарных концентраций тяжелых РЗЭ в гранате в изученном образце предполагает габброиды в качестве возможного протолита для эклогита [19]. Кроме того, существенное модальное количество кианита (~17 об. %), значение  $\text{Ca}\# > 0.5$  в гранате и валовое содержание  $\text{Al}_2\text{O}_3 = 23.2$  мас. % в изученном эклогите, возможно, указывают на заметное обогащение протолита породы плагиоклазом.

Кристаллизация порообразующих минералов (гранат + омфацил + кианит) и аксессуарного рутила на пике метаморфизма происходила совместно при  $3.5 \pm 0.32$  ГПа и  $920 \pm 65^\circ\text{C}$ . Согласно нашим минералого-петрографическим наблюдениям, таким, как отсутствие включений титанита в порообразующих минералах и его нахождение в межзерновом пространстве, можно сделать вывод о более позднем образовании титанита в изученном образце, вероятнее всего, в процессе метасоматического воздействия флюида/расплава. Присутствие кальцита в межзерновом пространстве, в том числе в виде включений в гранате, указывает на существенную роль карбонатно-госплава/флюида при кристаллизации первичных порообразующих минералов, а образование кальцит-содержащего симплектита вокруг титанита в изученном образце, вероятнее всего, связано с транспортировкой ксенолита

кимберлитовым расплавом к поверхности (например, [10, 20]).

Образование титанита в эклогите Uv-180, по видимому, могло также происходить в результате метасоматического воздействия флюида/расплава на метаморфическую породу, обогащенную кальцием, стронцием, крупными литофильными элементами и свинцом, по механизму, схожему с описанным в работе [18]. Следует отметить, что следов перекристаллизации рутила в титанит в изученном образце не обнаружено, в отличие от пород Западного Тянь-Шаня, что заслуживает более детального и прецизионного изучения эклогита Uv-180 в дальнейшем.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Д.М. благодарит Международную программу стипендий президента Китайской академии наук (PIFI, грант 2019PC0033). С.А. признательна за поддержку Немецкого фонда "Forschungsgemeinschaft" (DFG-grant AU356/11).

#### ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ № 21-77-10006. Отбор образцов выполнен в рамках госзадания ИГМ СО РАН.

FIERCE признателен за финансовую поддержку "Wilhelm and Else Heraeus Foundation" и "Deutsche Forschungsgemeinschaft" (DFG, INST 161/921-1 FUGG and INST 161/923-1 FUGG). FIERCE № 90.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Соболев Н.В.* Коэсит как индикатор сверхвысоких давлений в континентальной литосфере // Геология и геофизика. 2006. Т. 47. № 1. С. 95–104.
2. *Jacob D.E.* Nature and Origin of Eclogite Xenoliths from Kimberlites // Lithos. 2004. № 77. P. 295–316.
3. *Pearson D.G., Shirey S.B., Bulanova G.P., Carlson R.W., Milledge H.J.* Re-Os Isotope Measurements of Single Sulfide Inclusions in a Siberian Diamond and Its Nitrogen Aggregation Systematics // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1999. V. 63. P. 703–711.
4. *Aulbach S., Heaman L.M., Jacob D.E., Viljoen K.S.* Ages and Sources of Mantle Eclogites: ID-TIMS and in situ MC-ICPMS Pb-Sr Isotope Systematics of Clinopyroxene // Chemical Geology. 2019. V. 503. P. 15–28.
5. *Mikhailenko D.S., Aulbach S., Korsakov A.V., Golovin A.V., Gerdes A., Malygina E.V., Stepanov A.S., Yi-Gang Xu.* Origin of Graphite-diamond-bearing Eclogites from Udachnaya Kimberlite Pipe // Journal of Petrology. 2021. V. 62. № 8. P. 1–32. <https://doi.org/10.1093/petrology/egab033>
6. *Coleman R.G., Lee D.E., Beatty L.B., Brannock W.W.* Eclogites and Eclogites: Their Differences and Similarities // Geological Society of America Bulletin. 1965. V. 76. P. 483–508.
7. *Morimoto N.* Nomenclature of Pyroxenes // Mineralogy and Petrology. 1988. V. 39. P. 55–76.
8. *Taylor L.A., Neal C.R.* Eclogites with Oceanic Crustal and Mantle Signatures from the Bellsbank Kimberlite, South Africa, Part I: Mineralogy, Petrography, and Whole Rock Chemistry // Journal of Geology. 1989. V. 97. P. 551–567.
9. *McDonough W.F., Sun S.-s.* The Composition of the Earth // Chemical Geology. 1995. V. 120. P. 223–253.
10. *Mikhailenko D., Golovin A., Korsakov A., Aulbach S., Gerdes A., Ragozin A.* Metasomatic Evolution of Coesite-Bearing Diamondiferous Eclogite from the Udachnaya Kimberlite // Minerals. 2020. 10. 383.
11. *Ravna E.K., Terry M.P.* Geothermobarometry of Phengite-kyanite-quartz/coesite Eclogites // Eleventh Annual V. M. Goldschmidt Conference. Hot Springs, Virginia, USA. 2003. P. 3145.
12. *John T., Klemm R., Klemme S., Pfänder J.A., Hoffmann J.E., Gao J.* Nb-Ta Fractionation by Partial Melting at the Titanite-rutile Transition // Contributions to Mineralogy and Petrology. 2011. V. 161. № 1. P. 35–45.
13. *Tropper P., Manning C.E.* The Current Status of Titanite-rutile Thermobarometry in Ultrahigh-pressure Metamorphic Rocks: The Influence of Titanite Activity Models on Phase Equilibrium Calculations // Chemical Geology. 2008. V. 254. P. 123–132. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2008.03.01>
14. *Корсаков А.В., Тениссен К., Козьменко О.А., Овчинников Ю.И.* Реакционные структуры в клиноцитовых гнейсах // Геология и геофизика. 2006. Т. 47. № 4. С. 499–512.
15. *Ogasawara Y., Fukasawa K., Maruyama S.* Coesite Exsolution from Supersilicic Titanite in UHP Marble from the Kokchetav Massif, Northern Kazakhstan // American Mineralogist. 2002. V. 87. P. 454–461.
16. *Kamenetsky V.S., Golovin A.V., Maas R., Giuliani A., Kamenetsky M.B., Weiss Y.* Towards a New Model for Kimberlite Petrogenesis: Evidence from Unaltered Kimberlites and Mantle Minerals // Earth-Science Reviews. 2014. V. 139. P. 145–167.
17. *Kaminsky F.V., Ryabchikov I.D., Wirth R.* A Primary Natrocarbonatitic Association in the Deep Earth // Mineralogy and Petrology. 2016. V. 110. P. 387–398.
18. *Beinlich A., Klemm R., John T., Gao J.* Trace-element Mobilization During Ca-metasomatism Along a Major Fluid Conduit: Eclogitization of Blueschist as a Consequence of Fluid-rock Interaction // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2010. V. 74. № 6. P. 1892–1922.
19. *Aulbach S., Jacob D.E.* Major- and Trace-elements in Cratonic Mantle Eclogites and Pyroxenites Reveal Heterogeneous Sources and Metamorphic Processing of Low-pressure Protoliths // Lithos. 2016. V. 262. P. 586–605.
20. *Carswell D.A., Wilson R.N., Zhai M.* Ultra-high Pressure Aluminous Titanites in Carbonate-bearing Eclogites at Shuanghe in Dabieshan, Central China // Mineralogical Magazine. 1996. V. 60. № 400. P. 461–471.

**TITANITE IN COESITE-KYANITE-BEARING ECLOGITE  
FROM KIMBERLITE PIPE UDACHNAYA****D. S. Mikhailenko<sup>a,b,c,f,#</sup>, S. Aulbach<sup>d,e</sup>, A. V. Korsakov<sup>a</sup>, A. V. Golovin<sup>a</sup>,  
Academician of CAS Y. Xu<sup>b,c</sup>, and Corresponding Member of the RAS F. V. Kaminsky<sup>f</sup>**<sup>a</sup>*Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation*<sup>b</sup>*State Key Laboratory of Isotope Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Science, Guangzhou, Kehua street, Tianhe district, 510640, China*<sup>c</sup>*CAS Center for Excellence in Deep Earth Science, Guangzhou, 510640, China*<sup>d</sup>*Institut für Geowissenschaften, Goethe-Universität Frankfurt, Frankfurt am Main, Germany*<sup>e</sup>*Frankfurt Isotope and Element Research Center (FIERCE), Goethe-University Frankfurt, Frankfurt am Main, Germany*<sup>f</sup>*Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry (GEOKhI), Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*<sup>#</sup>*E-mail: pazilovdenis@igm.nsc.ru*

The mineralogical and geochemical features of titanite and associated minerals in a rare sample of kyanite-coesite-rutile-bearing eclogite from the Udachnaya-Vostochnaya kimberlite pipe have been studied in detail. Subidiomorphic titanite grains (100–300 μm) were identified in the intergranular space. The composition of individual grains of titanite is characterized by a constant presence of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, F, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, Zr, and Sr impurities but varies within the xenolith. Based on the absence of titanite inclusions in the rock-forming minerals and their presence in the intergranular space, titanite was formed in the studied sample at a late stage of its formation, most likely in the process of metasomatic action of the fluid/melt. Crystallization of rock-forming minerals (garnet + omphacite + kyanite) and accessory rutile occurred jointly at 3.5 ± 0.32 GPa and 920 ± 65°C. The value of Eu/Eu\* = 1.06 in the reconstructed bulk composition of the rock, the high modal content of kyanite (~17% vol.), and the value of Ca# = Ca/(Ca + Mg + Fe + Mn) > 0.5 in garnet indicate a subduction nature of the studied eclogite. Most likely, the formation of titanite in the studied sample occurred as a result of the metasomatic action of a fluid/melt enriched in calcium, strontium, large lithophilic elements, and lead, by a mechanism similar to the formation of eclogites in the units of the Western Tien Shan.

*Keywords:* eclogite, titanite, rutile, kimberlite, subduction, metamorphism