DOI:10.47765/0869-7175-2023-10009

УДК 553.1:577.4
© Н. Н. Зинчук, 2023

Сульфаты в кимберлитовых породах

Приведены результаты комплексного исследования безводных (ангидрит, барит, целестин и таумасит) и водных (гипс, эпсомит, метабазалюминит и брошантит) сульфатов из кимберлитовых пород. Высказывается предположение о возможности использования типоморфных особенностей преобладающих сульфатов из кимберлитов при совершенствовании технологических процессов извлечения из продуктивной руды ценного минерала.

Ключевые слова: водные и безводные сульфаты, типоморфизм минералов.

ЗИНЧУК НИКОЛАЙ НИКОЛАЕВИЧ, доктор геолого-минералогических наук, nnzinchuk@rambler.ru

Западно-Якутский научный центр (ЗЯНЦ) Академии наук Республики Саха (Якутия), г. Мирный

Sulphates in kimberlite rocks

N. N. ZINCHUK

West-Yakutian Scientific Center, Academy of Sciences of the Republic of Sakha (Yakutia), Mirny

Results of a comprehensive study of anhydrous (anhydrite, barite, celestite, and thaumasite) and hydrous (gypsum, epsomite, metabasaluminite, and brochantite) sulfates from kimberlite rocks are presented. An assumption is put forward for a possibility to use the typomorphic features of the predominant sulfates from kimberlites to improve the technological processes of extraction of the valuable mineral from a productive ore.

Key words: hydrous and anhydrous sulfates, mineral typomorphism.

Введение. Кимберлитовые породы – сложные природные образования, характеризующиеся оригинальными минералого-петрохимическими особенностями, вызванными совмещением признаков как ультраосновных пород, так и щелочных базальтоидов [1–7, 40–44]. В результате ранее проведённых исследований [8, 9, 14, 15, 17–19, 21, 23, 27, 28] была выполнена типизация коренных месторождений алмазов по комплексу признаков, позволившая построить типовые модели таких диатрем Сибирской (СП), Восточно-Европейской (ВЕП) и Южно-Африканской (ЮАП) платформ, существенно различающихся как по геологическим условиях локализации [10, 11, 13, 25, 26], так и вещественным составом [45–47]. Так, характерной чертой кимберлитовых тел Якутской алмазоносной провинции (ЯАП) СП является значительная изменчивость параметров их вещественного состава [12, 16, 20, 22, 24]. Высокий градиент изменчивости вещественных признаков в объёме кимберлитовых тел во многом связан с полигенностью и гетерохронностью компонентов самих слагающих трубки пород, охватывающих диапазон условий образования от верхней мантии, через пневматолитово-гидротермальную стадию до гипергенеза [29–32, 36]. В целом многообразие происходящих в трубочных диатремах процессов изменения кимберлитов с некоторой долей условности можно отнести к диафторезу [33–35, 37–39]. Обычно под диафторезом понимают регрессивное минералогическое преобразование, происходящее в процессе приспособления магматических и метаморфических пород к новым условиям более низких ступеней метаморфизма. Определяющим фактором диафтореза является масса поступающих в систему минералообразования извне H_2O и CO_2 в процессе регрессивного метаморфизма. Этим условиям соответствуют особенности постмагматического преобразования кимберлитовых пород [16, 20, 24, 26]. Сложность

и контрастность минералогического облика реальных кимберлитовых пород в значительной степени обусловлены развитием комплекса вторичных минералов. К настоящему времени в кимберлитовых породах древних платформ мира идентифицировано более 60 минералов-новообразований, входящих в различные классы существующих минералогических классификаций [12, 17, 19, 22, 23]. Установление места и роли каждого из вторичных минералов, реконструкция последовательности их образования, устойчивости в различных условиях имеют важное значение как для понимания природы и преобразования кимберлитовых пород, так и для совершенствования отдельных технологических процессов разработки месторождений. Представляется актуальной разработка принципов и методов диагностики вторичных минералов кимберлитов, основанных на детальном комплексном изучении этих новообразований с использованием собранного каменного материала из кимберлитовых диатрем Мирнинского (МКП), Далдынского (ДКП), Алакит-Мархинского (АМКП), Верхнемунского (ВМКП) и Накынского (НКП) кимберлитовых полей ЯАП. Особого внимания заслуживают те типы и разновидности кимберлитовых пород, микроскопическая диагностика которых существенно затруднена в связи с интенсивными метасоматическими, пневматолитово-гидротермальными и гипергенными процессами или принадлежностью к специфическим кратерными фациям [11, 16, 20, 24, 26].

Фактический материал, результаты исследований и их интерпретация. Материалом для настоящих исследований послужили образцы новообразований, в различные годы собранные при изучении коренных алмазных месторождений Сибирской, Восточно-Европейской и Южно-Африканской платформ, а также серия образцов этих минералов некимберлитовых источников (осадочного и гидротермального). В лабораторно-аналитических исследованиях принимали участие Б.П. Антонюк, В.П. Афанасьев, М.Д. Братусь, Г.В. Кузнецов, С.С. Мацюк, Ю.М. Мельник, А.Д. Харькив. Часть полученного ими материала была использована в совместных с автором статьи работах [1–6, 31, 39–43]. Наибольшее внимание было уделено детальному изучению люминесцентных свойств сульфатов из кимберлитов, которые до настоящего времени оставались слабоизученными, а также сравнительной характеристике с таковыми для однотипных минералов некимберлитовых источников. Перед исследованием люминесцентных характеристик безводных сульфатов предварительно выполнялись электронно-зондовые и спектральные исследования их химического состава.

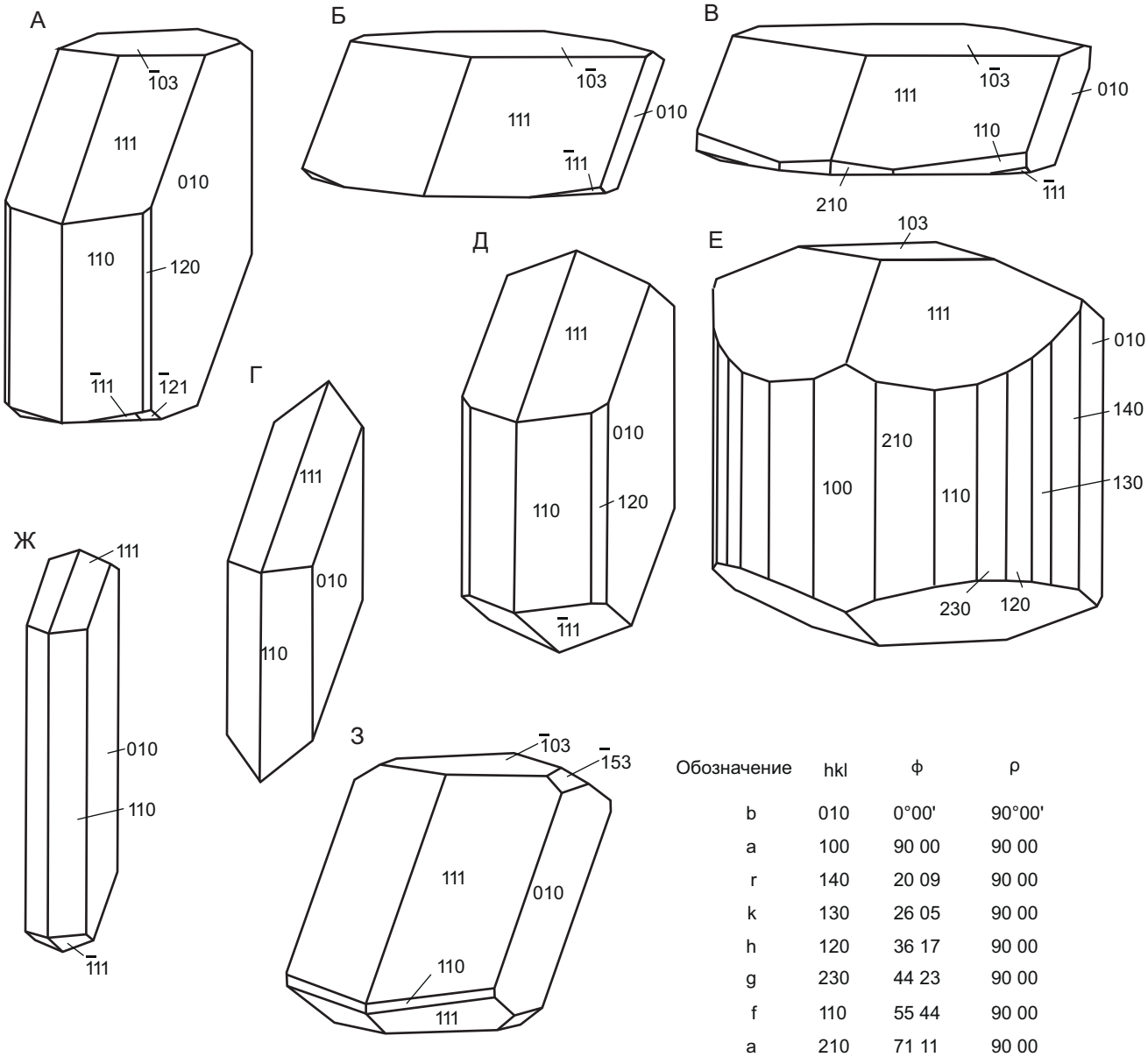
Минералы класса ***сульфатов*** в кимберлитовых породах древних платформ мира представлены водными и безводными разностями. Среди *водных* сульфатов идентифицированы гипс, эпсомит, метабазалюминит и брошантит. *Гипс* часто встречается в верхних горизонтах кимберлитовых пород СП, ВЕП и ЮАП, где он образует многочисленные жилы, прожилки и неправильные выделения, в том числе и обволакивающие вкрапленники других минералов. Встречаются игольчатые и волокнистые агрегаты минерала, реже в трещинах наблюдаются огранённые кристаллы (рис. 1). Жильные выделения гипса в верхних горизонтах диатрем (рис. 2) обычно вниз по разрезу переходят в безводный сульфат ангидрит. На дифрактометрических кривых гипс диагностируется по серии отражений с межплоскостными расстояниями, равными 0,754–0,756, 0,380, 0,306, 0,287 и 0,278 нм.

Эпсомит отмечен в отдельных блоках кимберлитов некоторых кимберлитовых трубок (Удачная, Юбилейная и др.), где придаёт породам белёсую окраску. Химическая формула минерала – $MgSO_4 \cdot 7H_2O$. На дифрактограммах минералу соответствуют рефлексы с межплоскостными расстояниями, равными 0,593, 0,532, 0,423, 0,295, 0,288 и 0,268 нм. На кривых ДТА дериватограмм новообразований, обогащённых эпсомитом, минералу принадлежит ряд эндотермических эффектов (рис. 3).

Метабазалюминит установлен в виде ничтожной примеси в изменённых кимберлитах трубок Сытыканская, Юбилейная и др. Химическая формула минерала – $Al_4(SO_4) \cdot (OH)_{10}$. Наиболее уверенно примеси минерала диагностированы рентгенометрически по интенсивным рефлексам 0,850, 0,681 и 0,436 нм.

Брошантит установлен лишь в единичных изученных образцах изменённых кимберлитов трубок Удачная и Сытыканская, где только в отдельных случаях концентрация его достигает 10%. Химическая формула минерала – $Cu_4SO_4(OH)_6$. На дифрактограммах минералу соответствуют отражения с межплоскостными расстояниями, равными 0,382, 0,264, 0,249 и 0,174 нм.

Среди *безводных сульфатов* в кимберлитах диагностированы ангидрит, барит, целестин и таумасит. Ангидрит наиболее характерен (см. рис. 2) для кимберлитовых пород глубоких горизонтов трубок Мир, Интернациональная и др. [5–7] Иногда его таблитчатые кристаллы покрывают трещины в кимберлитах сплошной коркой. В местах растворения основных пород встречаются и натёчные (бугорчатые) агрегаты минерала, показатели преломления которого: n_g = 1,615, n_m = 1,575, n_p = 1,571. Химическая формула минерала – $CaSO_4$. По спектрам люминесценции ангидрит существенно отличается от аналогичного минерала другого генезиса (рис. 4).



Гипс $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ Gypsum
Моноклинная сингония призматический вид симметрии.
C_{2h} – 2/m (L_2PC)
a : b : c = 0,6895 : 1 : 0,4133; β = 98° 58'

Обозначение	hkl	ϕ	ρ
b	010	0°00'	90°00'
a	100	90 00	90 00
r	140	20 09	90 00
k	130	26 05	90 00
h	120	36 17	90 00
g	230	44 23	90 00
f	110	55 44	90 00
a	210	71 11	90 00
e	$\bar{1}03$	-90 00	2 32
n	$\bar{1}11$	-47 22	31 32
l	111	61 36	41 00

Рис. 1. Морфологические типы кристаллов гипса из кимберлитов трубки Молодость (А–Д) и Удачная (Е–З)

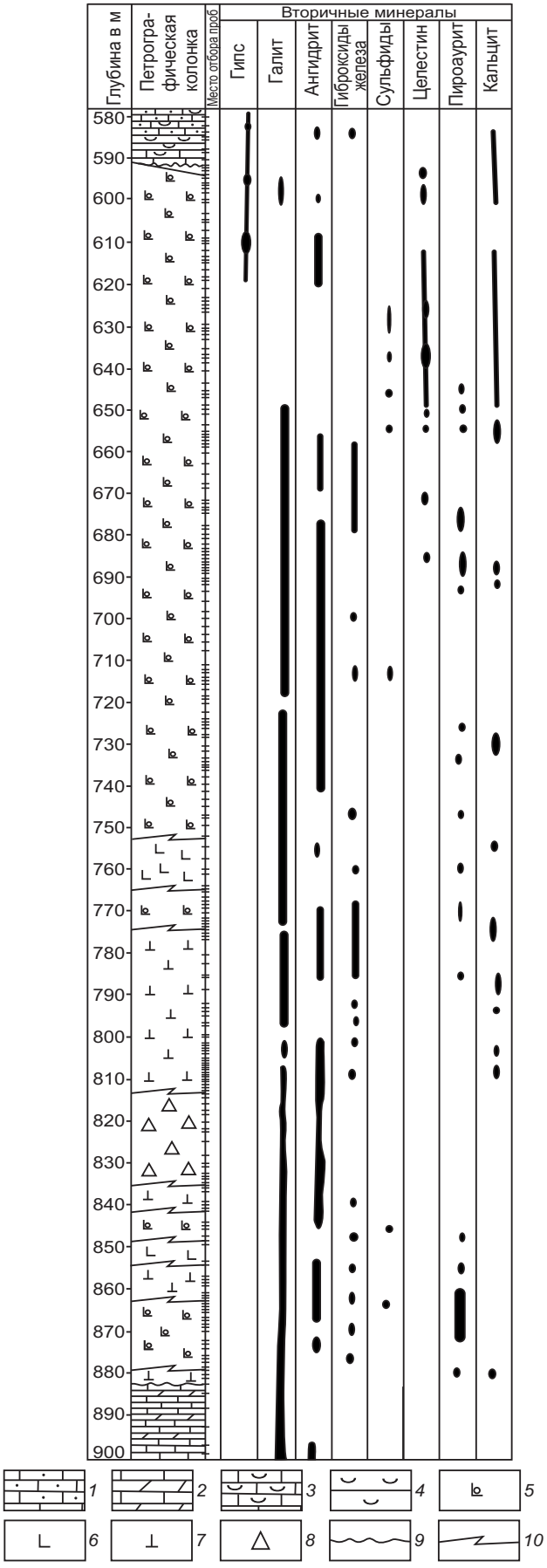


Рис. 2. Схема распределения преобладающих жильных вторичных минералов в кимберлитах глубоких горизонтов трубки Мир (по разрезу скв. 55):

известняки: *1* – песчанистые, *2* – доломитистые, *3* – с выделениями гипса; *4* – гипсы; брекчия: *5* – автолитовая кимберлитовая, *6* – кимберлитовая с массивной текстурой цемента, *7* – крупнопорфировая кимберлитовая, *8* – кластопорфировая кимберлитовая; *9* – граница между кимберлитами и вмещающими трубку породами; *10* – условные границы между отдельными типами кимберлитов

Барит выявлен при изучении вещественного состава трубок Удачная, Краснопресненская, Якутская и др. Агрегаты его обычно напоминают розы, сложенные линзовидными кристаллами. На кристаллах барита доминируют грани пинакоида и призмы (рис. 5). Сравнительно редко встречаются сплошные выделения крупнокристаллического барита. На дифрактометрических кривых минералу соответствует серия отражений с межплоскостными расстояниями, равными 0,439, 0,431, 0,386, 0,373, 0,354, 0,341, 0,330, 0,3078, 0,2813, 0,2714, 0,2648, 0,2201, 0,2112, 0,2094, 0,2044, 0,1921, 0,1749, 0,1677 и 0,1666 нм. Уверенно диагностируется минерал и на спектрах люминесценции (рис. 6).

Целестин отмечен в кимберлитовых породах СП, ВЕП и ЮАП в виде уплощённых радиальнолучистых агрегатов (рис. 7). Его кристаллы хорошо ограничены (рис. 8). Наиболее часто встречающимися простыми формами являются призмы и пинакоиды, образующие короткостолбчатые, таблитчатые и копьевидные кристаллы. Рентгенометрические и химические исследования, а также спектры люминесценции (см. рис. 8) подтверждают практически чистый состав целестина, и только в отдельных кристаллах фиксируется примесь BaO (до 1–2 %).

Таумасит обнаружен в кимберлитовых породах отдельных трубок (Заполярная, Новинка, Удачная и др.) в виде ветвящихся мономинеральных прожилок или гнёзд размером до 1–1,5 см. Встречаются и отдельные кристаллы минерала (рис. 9). На дифрактометрических кривых (рис. 10) таумаситу принадлежат рефлексы с межплоскостными расстояниями, равными 0,940, 0,547, 0,532, 0,423, 0,295, 0,288 и 0,268 нм. На кривых ДТА дериватограмм отмечается ряд эндотермических эффектов характерных таумаситов.

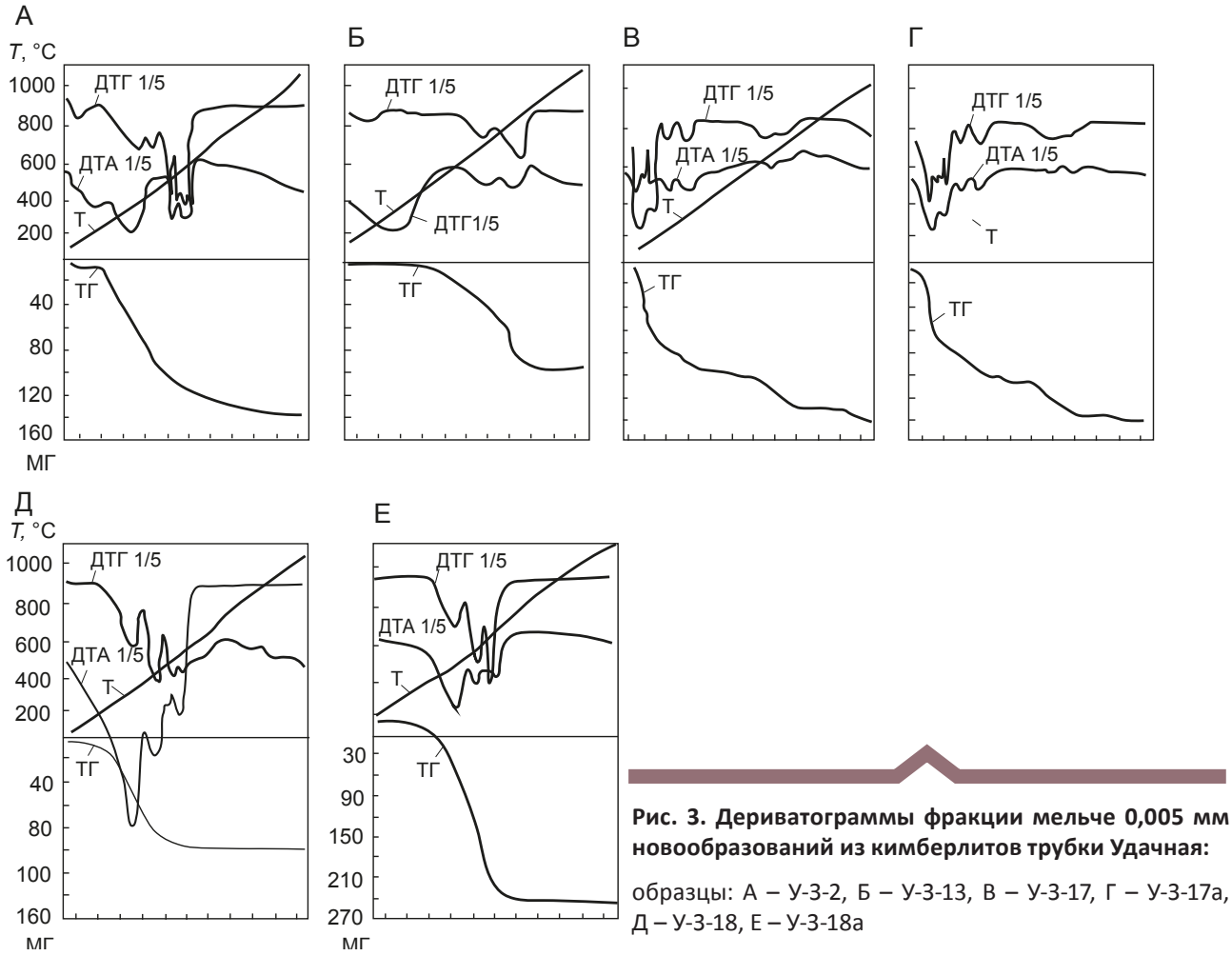


Рис. 3. Дериватограммы фракции мельче 0,005 мм новообразований из кимберлитов трубки Удачная:

образцы: А – У-3-2, Б – У-3-13, В – У-3-17, Г – У-3-17а, Д – У-3-18, Е – У-3-18а

На основании сравнительного изучения барита и целестина из кимберлитов можно утверждать, что между ними не существует непрерывного изоморфизма [31, 32, 36]. Максимальное содержание стронция и бария в барите и целестине достигает 2,31 и 2,52% соответственно. Из примесей электронно-зондовым анализом фиксируются Ca, Mg, реже Cu и Na. Спектральное изучение целестина и барита подтвердило постоянное присутствие в них таких примесей, как Cu (0,0001–0,5 г/т), Pb (0,0001–0,0012 г/т) и Ag (<0,001 г/т). Другие микропримеси не установлены. Было выполнено рентгенолюминесцентное исследование большой серии баритов и целестинов самого различного генезиса, а также проведены специальные эксперименты по активации соединений $BaSO_4$ и $SrSO_4$ ионами Pb, Mn и TR, что позволило представить существенно иную систему основных центров излучения в этих минералах [12, 19, 22, 14, 15, 18, 21, 27] по сравнению с предшествующими исследованиями.

Основными преобладающими по частоте встречаемости (не менее 90% образцов самого различного происхождения) и интенсивности излучения в природных баритах и целестинах являются центры, связанные с присутствием Pb в составе минерала. При этом фиксируются два типа центров, излучающие в коротко- и длинноволновой частях РЛ-спектра (см. рис. 6). Центр с коротковолновым излучением (λ_m = 380–385 нм в барите и 400 нм в целестине) является ионом Pb^{2+}, изоморфно замещающим Ba^{2+} и Sr^{2+}. Достоверность этой модели подтверждена экспериментами по активации искусственных соединений $BaSO_4$ и $SrSO_4$ свинцом и, в частности, характером излучения промышленного люминофора Л-33 ($BaSO_4Pb$), используемого в технике [39]. Центр с длинноволновым излучением (λ_m = 830 нм в барите и 795–

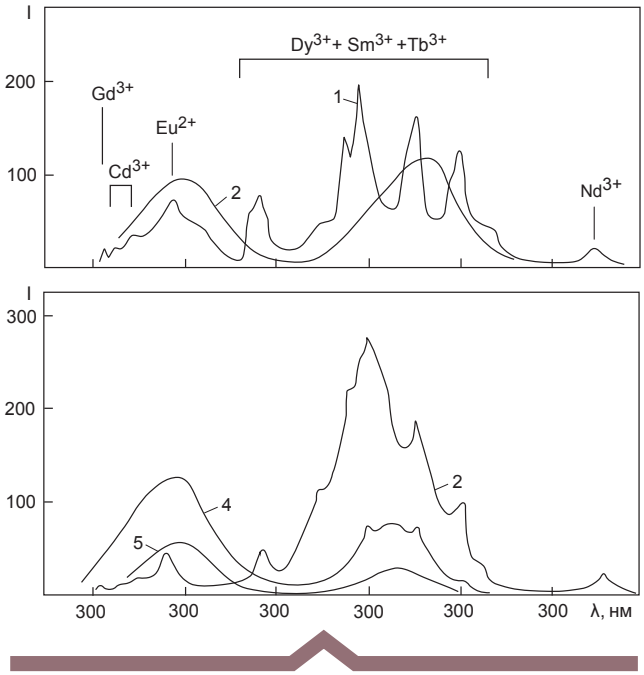


Рис. 4. Типы спектров рентгенолюминесценции ангидритов из гидротермальных месторождений (1), осадочных пород (2), кимберлитов трубки Мир (3, 5) и вмещающих карбонатных пород в районе трубки Удачная (4)

800 нм в целестине) рассматривается [23, 29] как ассоциативный центр – ион Pb^{2+} в комплексе с дефектом заряда на кислороде анионной решетки. Такие центры встречаются в природном микроклине и керамике и могут создаваться при активации ионами Pb соединений с крупными катионами – K, Sr и Ba. Следует отметить, что оба эти центра, в дальнейшем обозначенные как P_1 (Pb^{2+}) и P_2 (Pb^{+}), обладают в системе (Ba, Sr)SO_4 весьма высокой активностью, то есть РЛ-методом даже при минимальных содержаниях Pb (ниже уровня определения обычным спектральным анализом), например, в чистом виде $BaSO_4$, используемом в медицинской практике [39]. Активности или концентрации центров P_1 и P_2 достаточно хорошо прямо и положительно коррелируются между собой, особенно при анализе определённого генетического типа минералов. На типичных и наиболее распространённых РЛ-спектрах барита и целестина фиксируются исключительно центры P_1 и P_2, причём общая интенсивность излучения в барите в целом выше, чем в целестине (см. рис. 6). При этом центр P_1 обычно превалирует над центром P_2 в обоих минералах, хотя отмечались образцы с обратным соотношением концентраций этих минералов.

В спектрах РЛ синтетических соединений $BaSO_4$ и $SrSO_4$ при отсутствии Pb устанавливаются [39] довольно интенсивные полосы с λ_m = 320–330 нм, которые можно идентифицировать как решётчатые центры тип дефекта заряда на кислороде – O*, обычные для большинства природных и искусственных соединений. В природных же баритах и целестинах они в явном виде практически не фиксируются, проявляясь лишь в некотором уширении полос P_1 и смещении максимума излучения. Изучение центров излучения Eu^{2+} в барите и целестине проводилось на нескольких сериях искусственно активизированных соединений в широком диапазоне концентраций Eu. Установлены полосы излучения центров Eu^{2+} в барите (λ_m = 373 нм) и целестине (λ_m = 376 нм). Во всех случаях активации кроме центров Eu^{2+} присутствовали и центры Eu^{3+} (сложный линейчатый спектр), роль которых повышалась с увеличением концентрации Eu.

В природных минералах лишь для барита из некоторых гидротермальных месторождений (Северный Кавказ, Югославия) были выявлены [39] два образца с явно выраженными РЛ-центрами Eu^{2+} и Eu^{3+}. Характерно, что при этом отсутствовали какие-либо другие TR-центры. Учитывая очень близкое спектральное положение центров P_1 и Eu^{2+}, идентификацию последнего можно считать корректной и надёжной лишь при учёте ширины полосы (у Eu^{2+} она существенно у́же) и присутствии излучения Eu^{3+}. При наложении полос P_1 и Eu^{2+} наблюдается чёткая структура коротковолновой части спектра.

Излучение ионов Ce^{3+} в системе $BaSO_4$–$SrSO_4$ проявляется относительно редко и представлено двойными полосами: 303–323 нм для целестина и 305–335 нм в барите. В двух образцах барита (метасоматизированные кварциты Украинского щита (УЩ) и гидротермальное проявление Приднестровья) выявлено линейчатое излучение ионов Sm^{3+} и Nd^{3+} в комплексе с излучением Ce^{3+} [39]. В образцах барита из полиметаллического месторождения УЩ установлено излучение Dy^{3+} и Cd^{3+}. Такой комплекс центров обычно свидетельствует о существенно иттриевом составе TR-элементов в минерале.

Получив данные об особенностях рентгенолюминесценции целестина и барита различного генезиса, мы провели сравнительное изучение

этих же минералов из кимберлитов. Особое внимание уделено наиболее распространённому в верхних частях кимберлитовых диатрем целестину. Изученные образцы различались по морфологическим характеристикам и формам выделения (жеоды, прожилки, радиально-лучистые, пластинчатые, мелкокристаллические агрегаты и др.), а также окраске (бесцветные, голубые и коричневые). Спектры рентгенолюминесценции регистрировались по общепринятой методике, но, кроме регистрации спектров в стационарном режиме, изучалась кинетика переходного люминесцентного процесса [39]. Фиксировались концентрации центров излучения P_{10} и P_{20} в момент включения рентгеновского облучения и их изменение до достижения равновесных концентраций

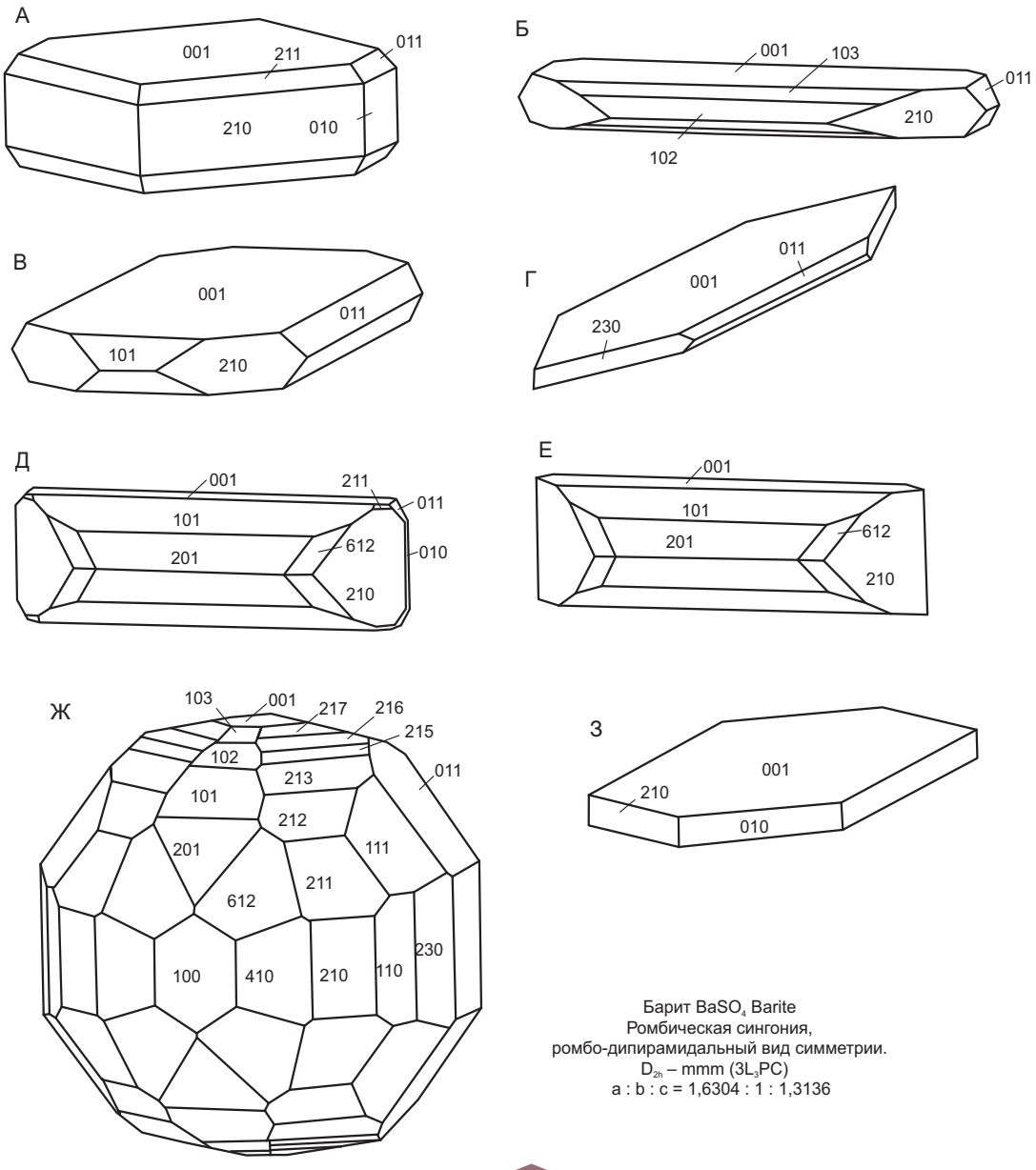


Рис. 5. Морфологические типы кристаллов барита из кимберлитов Якутии. *С использованием материалов Б. П. Антонюка*:

трубки: А – Ботуобинская (обр. Б-38), Б – Комсомольская Магнитная (обр. км-51), В – Якутская (обр. 03-62,5), Г, Ж, З – Удачная (Г – обр. УВ-226б, Ж – обр. 226а, З – обр. УВ-228), Д, Е – Ленинградская

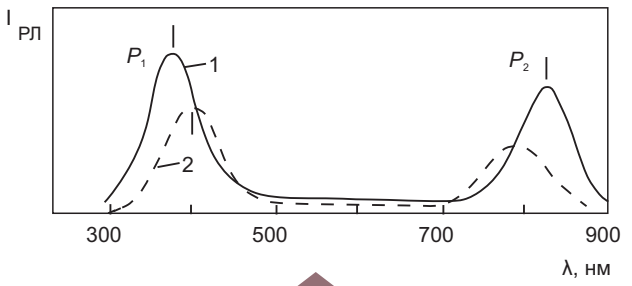


Рис. 6. Типичные спектры люминесценции барита (1) и целестина (2) с центрами излучения $Pb^{2+}(P_1)$ и $Pb^{+}(P_2)$

в установившемся режиме – P_1 и P_2. Характер изменения концентрации (кривая переходного процесса) для каждого конкретного РЛ-центра в минерале определяется как вещественной моделью центра (катионная примесь, решётчатый дефект заряда и др.), так и структурно-химическим состоянием кристалла (род и содержание примесей, структурное совершенство) и в целом характеризует генетические особенности минерала. Для центра P_1 в изученных целестинах из кимберлитов концентрация возрастает от некоторого начального I $(P_1)_0$ до установившегося значения I (P_2). Концентрация центров P_2, наоборот, снижается от начального значения I $(P_2)_0$ до I (P_2) в установившемся режиме. В качестве характеристики переходных процессов использовались [39] отношения начальной и конечной концентрации центров (P_{10}/P_1 и P_{20}/P_2) как некоторые кинетические люминесцентные факторы, определяющие структурно-химическое состояние кристалла и степень изменения этого состояния при радиационном воздействии. Минимальные радиационные изменения (значения P_{10}/P_1 и P_{20}/P_2 близки к 1) обычно характеризуют наименее совершенные в структурном отношении кристаллы и наиболее насыщенные примесями. Величины кинетического фактора имеют значение >1 для отрицательного процесса (затухание излучения) и <1 для положительного (разгорание излучения). Для конкретных центров излучения знак переходного процесса может быть как положительным, так и отрицательным, характеризуя специфические условия образования минерала и его структурно-химическое состояние.

В изученной серии образцов целестинов из кимберлитов основными центрами излучения являются наиболее характерные для этого минерала

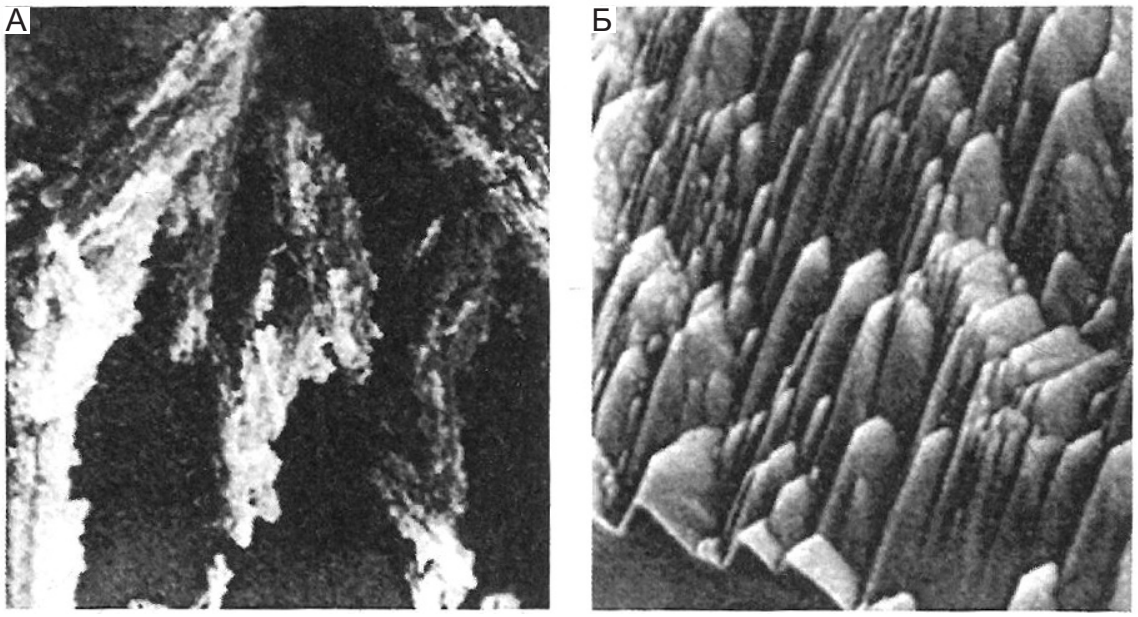
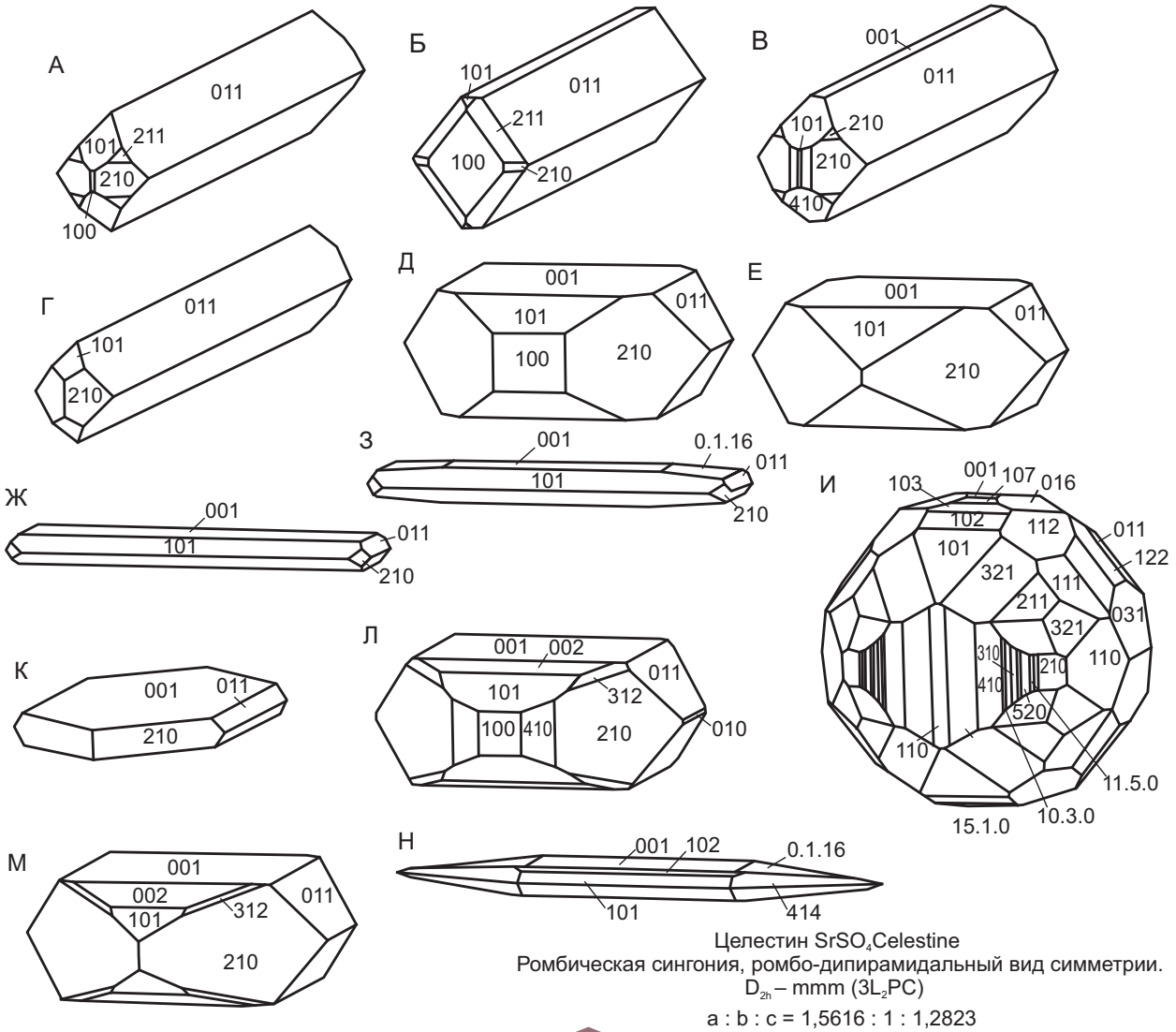


Рис. 7. Растровые электронные микрофотографии выделений целестина в кимберлитах трубки Удачная:

увеличение: А – 300, Б – 2000

центры P_1 и P_2. Явно выраженной особенностью изученных образов является постоянное преобладание концентрации центров P_1 ($P_1/P_2 > 1$). В целом распределение отношений P_1/P_2 для изученных целестинов из кимберлитов и для серии образцов самого различного источника другого типа месторождений мира, в которых это значение меньше 1, характерны примерно для 35–40 % образцов. Поэтому значение $P_1/P_2 > 1$ можно рассматривать как типоморфное для целестинов из кимберлитов. Другой, не менее важной особенностью изученных целестинов из кимберлитов явилось проявление в большинстве образцов явно выраженного излучения Ce^{3+}. В пробах целестина других источников проявление Ce^{3+} в РЛ-спектрах фиксировалось нами лишь на уровне следов и не считалось во многих случаях твёрдо установленным. В такой серии образцов излучение Ce^{3+} определяется по двойной достаточно хорошо разрешённой полосе 303–323 нм, причём интенсивность полосы вполне сопоставима с интенсивностью полос P_1-центров. Учитывая возможность



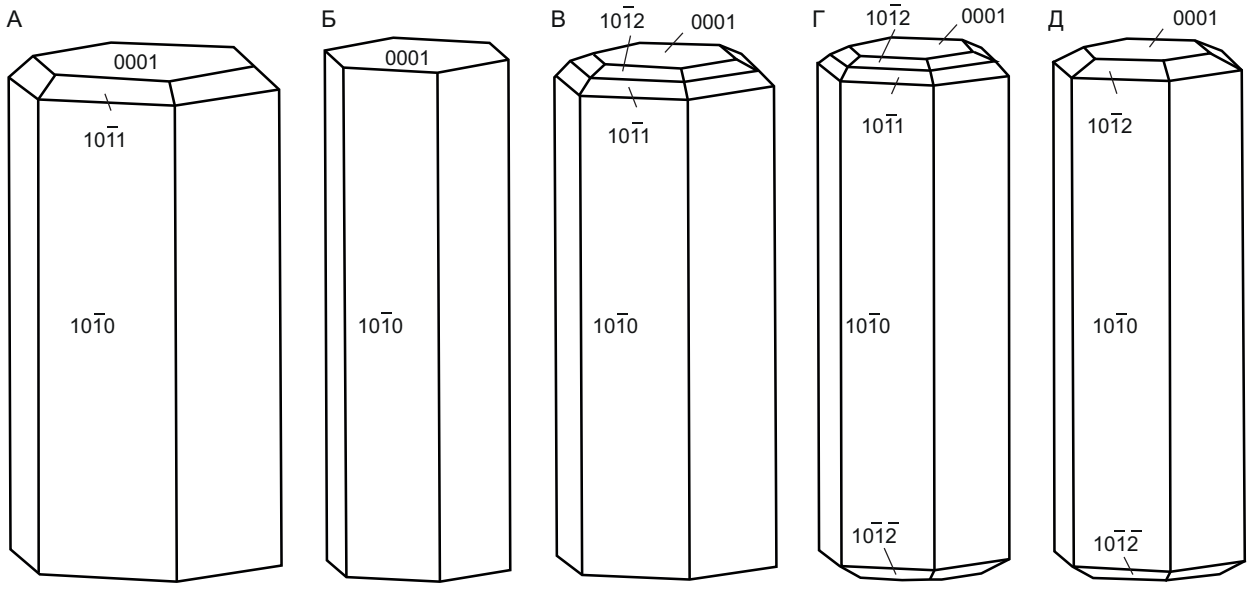
Целестин $SrSO_4$ Celestine
Ромбическая сингония, ромбо-дипирамидальный вид симметрии.
D_{2h} – mmm ($3L_2PC$)
a : b : c = 1,5616 : 1 : 1,2823

Рис. 8. Морфологические типы кристаллов целестина из кимберлитов Якутии. *С использованием материалов Б. П. Антонюка*:

трубки: А–Г – Комсомольская-Магнитная, Д–З – Прогнозная, И, Л, Н – Удачная, К – Якутская

неявного, слабовыраженного излучения Ce^{3+} на фоне полосы P_1-центров, нами [39] был использован определённый фактор формы спектра – f_c, вычисляемый как отношение интенсивностей излучения в точках 330 и 400 нм и отражающий (при условии отсутствия каких-либо центров излучения в этой области спектра) степень «цериевости» или «редкоземельности» целестина. Для изученных образцов целестина из кимберлитов значение f_c меняется от 0,16 до 1,33 (при максимальном проявлении Ce^{3+}). Следует при этом отметить, что роль факторов f_c как показателя «цериевости» целестина корректно интерпретируется лишь при значениях $f_c > 0,6$ и относительно низком проявлении центров, излучение которых устанавливается в области 350–400 нм. В нашем случае вариацию наиболее плотно распределённых значений f_c от 0,16 до 0,6 нельзя однозначно связывать лишь с увеличением роли Ce^{3+} в спектре. Возможно, в этом диапазоне значений f_c присутствует и излучение Eu^{2+} (~380 нм), на что указывает и смещение максимума полосы излучения P_1-центров от 400 до 385–390 нм, фиксируемое для большинства образцов по значениям f_c = 0,51–0,72. Эту группу образцов можно рассматривать как специфическую, с проявлением Eu^{2+}-Ce^{3+}-люминесценции.

Излучение Ce^{3+} отражает относительно повышенное содержание TR-элементов в отдельных образцах минерала. Отсутствие других характерных редкоземельных центров излучения (Cd^3, Sm^{3+}, Nd^{3+}, Dy^{3+}) связано в первую очередь с более высокой активностью излучения Dy^{3+} по сравнению с остальными, что установлено для обширной группы TR-содержащих минералов, и с общей малой концентрацией TR в целестине, что вполне соответствует ограниченному изоморфизму при относительно низких температурах кристаллизации. С другой стороны, это может свидетельствовать о селективном структурном



Таумасит $Ca_3Si(CO_3)(SO_4)(OH)_6 \cdot 12H_2O$ Thaumasite
Гексагональная сингония,
Гексагонально-пирамидальный C_6–6(L_6) вид симметрии.
a : c = 1 : 0,943

Формы

нижние	верхние	φ	ρ
$000\bar{1}$	0001	–	0°00'
$00\bar{0}\bar{2}$	$10\bar{1}0$	30°00'	90 00
	$10\bar{1}2$	30 00	28 34
	$10\bar{1}1$	30 00	47 26

Рис. 9. Морфологические типы кристаллов таумасита из кимберлитов Якутии. *С использованием материалов Б. П. Антонюка*:

трубки: А – Комсомольская-Магнитная, Б–Д – Новинка

отборе лёгких TR или о специфическом «цериевом» составе этих компонентов в минералообразующей среде. Однако эти вопросы могут быть выяснены лишь при широком изучении состава TR во всех минеральных комплексах кимберлитов.

Заключение. Приведённые данные показывают, что уверенная диагностика новообразований сульфатов из кимберлитовых пород возможна лишь с помощью точных физико-химических методов исследований. Наиболее важное место в этом комплексе принадлежит рентгеновским исследованиям, позволяющим проводить идентификацию присутствующих в изучаемых образцах минеральных фаз. Применение для изучения

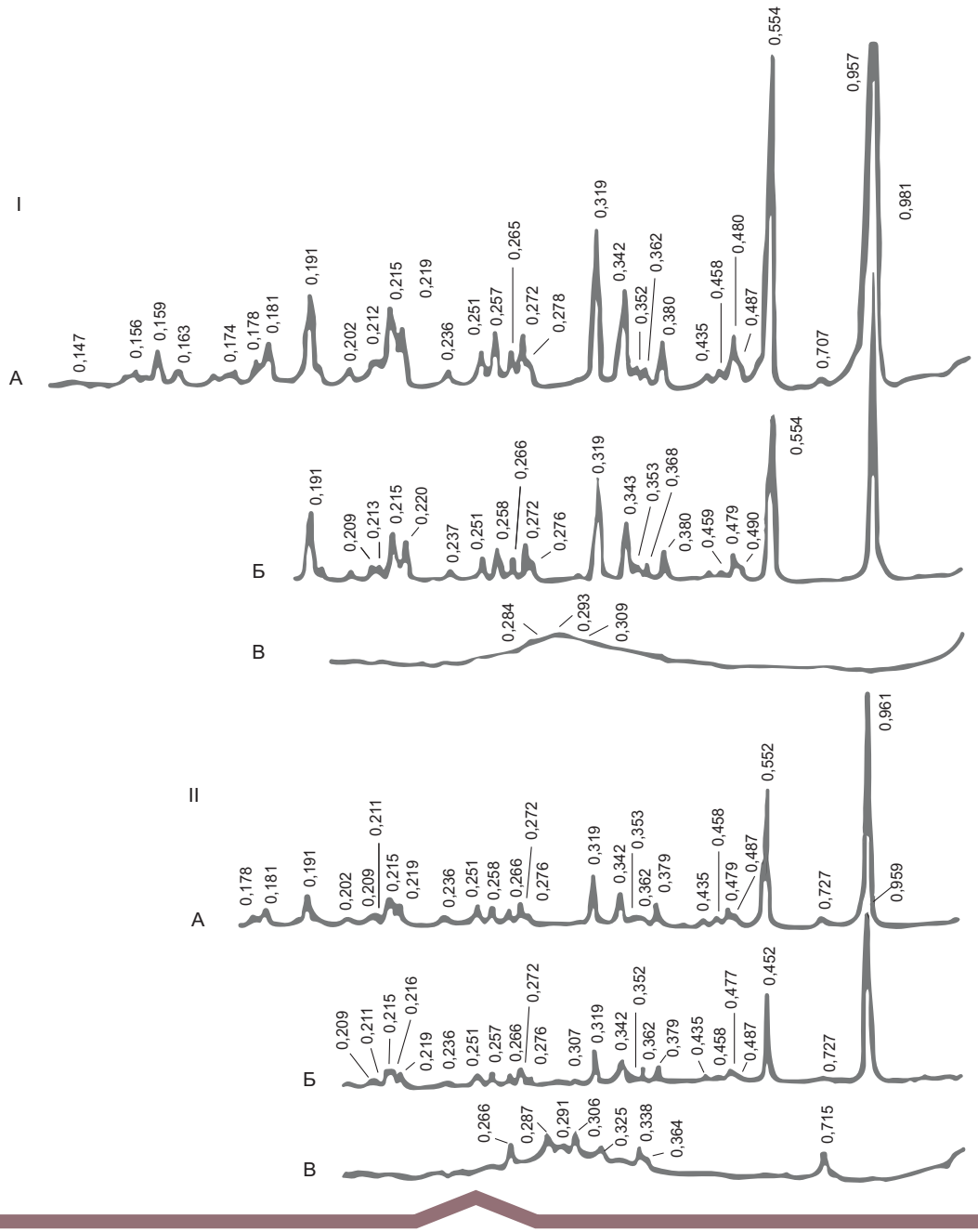


Рис. 10. Дифрактограммы обогащённых таумаситом новообразований кимберлитов трубки Удачная (I) и Заполярная (II):

препараты: А – исходный, Б – насыщенный глицерином, В – прокалённый в течение двух часов при *T* 600 °С

тех же проб дериватографии и оптико-спектроскопии даёт возможность уточнить в этих минеральных фазах формы и взаимоотношения водных и структурных форм и других компонентов. Состав петрохимических компонентов в мономинеральных образованиях, идентифицированных указанными методами, успешно можно определять с помощью рентгеноспектральных и химических (особенно для содержащих водные компоненты) анализов.

Проведённые исследования позволили сделать ряд выводов по наиболее часто встречаемым в кимберлитах сульфатам. Наиболее информативным оказался ангидрит в виде сростков с доломитом и целестином, встреченный в виде радиально-лучистых агрегатов и деформированных пластинчатых бесцветных кристаллов на поверхности кальцита, а также в виде «гипсовидных» прожилков с характерным шелковистым отливом. Последние содержат поздний магнетит и механические пылевидные включения лизардита, придающие ангидриту голубовато-зелёные тона. Очень интересен в генетическом плане ангидрит, ассоциирующий с целестином, отмеченный в виде примеси в екатеринite. В последнем случае он имеет уникальный химический состав, поскольку в природном ангидрите зафиксирована высокая концентрация PbO (8,31%) и CuO (2,89%). Известно, что смесимость в ряду $PbSO_4$–$CaSO_4$ является чрезвычайно ограниченной из-за различий в размерах Ca^{2+} и Pb^{2+}. Для природных ангидритов характерны две основные группы РЛ-спектров. Наиболее простым по составу является комплекс Mn^{2+} и SO_m^n – центров, характерный обычно для образцов осадочного происхождения. Вторую группу составляют ангидриты с интенсивно выраженным излучением TR-ионов, среди которых зафиксированы Gd^{3+}, Ce^{3+}, Eu^{2+}, Dy^{3+}, Tb^{3+}, Sm^{3+} и Nd^{3+}, что обычно присуще минералу гидротермального происхождения.

На спектрах рентгенолюминесценции *барита* из кимберлитов отмечены три полосы с максимумами 395, 630 и 830 нм. Последняя интерпретируется как центр P_2, в то время как первая смещена относительно обычного положения центров P_1 в барите в длиноволновую сторону примерно на 15 нм. Дальнейшее изучение барита из кимберлитов позволит прояснить вопрос о предпочтительности вхождения TR в бариевую или стронциевую систему, а также поможет оценить сравнительную селективность в отношении ионов Ba и Sr в рамках единого минералообразующего процесса.

Целестин в кимберлитах обладает более сложными люминесцентными свойствами, чем это представлялось на анализе материала из осадочных и гидротермальных проявлений. В первую очередь, это касается вхождения TR-элементов в структуру минерала. Наиболее показательным типоморфным признаком для некоторых разностей вторичного целестина является интенсивное проявление Ce^{3+}-излучения. Поскольку связь этого излучения с какими-либо другими внешними характеристиками минерала (окраска, форма выделения и др.) не устанавливается, то более перспективным является анализ парагенетических ассоциаций минерала и первичного вещества. Существенным отличием изученных образцов целестинов из кимберлитов является преобладание центров P_1 над центрами P_2 ($P_1/P_2 > 1$), что не характерно для целестинов некимберлитового генезиса. Интенсивное проявление излучения Ce^{3+} зафиксировано в образцах с относительно низкими значениями P_1/P_2 (1,12–1,99). Связь люминесцентных характеристик целестинов из кимберлитов с окраской выражается лишь в общем подавлении всех центров излучения путём реабсорбции при усилении интенсивности окраски. Полученные типоморфные особенности преобладающих сульфатов из кимберлитов предложено использовать как при проведении геолого-поисковых работ на алмазы, так и при совершенствовании технологических процессов при извлечении из продуктивной руды ценного минерала.

Твёрдый раствор $(Ca, Cu, Pb)SO_4$, впервые зафиксированный для природных сульфатов в кимберлитах, в дальнейшем заслуживает детального комплексного изучения. Учитывая заметно повышенную концентрацию свинца в изученных сульфатах (как и в карбонатах), можно предположить также наличие в кимберлитах и самого англезита, образовавшегося из остаточных сульфатных растворов, обогащённых Pb, Cu и Zn. Это предположение отчасти подтверждается обнаруженной в таких образцах примесью сфалерита.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Афанасьев В. П., Зинчук Н. Н.* Минералогия древних россыпей алмазов восточного борта Тунгусской синеклизы // Геология и геофизика. – 1987. – № 1. – С. 90–96.

2. *Афанасьев В. П., Зинчук Н. Н., Коптиль В. И.* Полигенез алмазов в связи с проблемой коренных россыпей северо-востока Сибирской платформы // Доклады Академии наук. – 1998. – Т. 361, № 3. – С. 366–369.
3. *Афанасьев В. П., Зинчук Н. Н., Логвинова А. Н.* Особенности распределения россыпных алмазов, связанных с докембрийскими источниками // Записки Российского минералогического общества. – 2009. – Т. 138, № 2. – С. 1–13.
4. *Афанасьев В. П., Похиленко Н. П., Логвинова А. М., Зинчук Н. Н., Ефимова Э. С., Сафьянников В. И., Красавчиков В. О., Подгорных М. М., Пругов В. П.* Особенности морфологии и состава некоторых хромшпинелидов алмазоносных площадей в связи с проблемой «ложных» индикаторов кимберлитов // Геология и геофизика. – 2000. – Т. 41, № 12. – С. 1729–1741.
5. *Братусь М. Д., Зинчук Н. Н., Краузе Г. Р., Витык М. О.* Условия кристаллизации и изотопная природа серы, углерода и кислорода сульфидно-кальциевой ассоциации в трубке Удачная (Якутия) // Геохимия. – 1998. – № 3. – С. 264–270.
6. *Братусь М. Д., Сворень И. М., Зинчук Н. Н., Аргунов К. П.* Газовые компоненты включений в алмазах различных морфологических типов из Якутии // Геохимия. – 1991. – № 11. – С. 1586–1595.
7. *Василенко В. Б., Зинчук Н. Н., Кузнецова Л. Г.* Геодинамический контроль размещения кимберлитовых полей центральной и северной частей Якутской кимберлитовой провинции (петрохимический аспект) // Вестник Воронежского госуниверситета. Геология. – 2000. – № 3 (9). – С. 37–55.
8. *Горшков А. И., Зинчук Н. Н., Котельников Д. Д., Шлыков В. Г., Жухлистов А. П., Мохов А. В., Сивцов А. В.* Новый упорядоченный смешанослойный минерал лизардит-сапонит из кимберлитов Южной Африки // Доклады РАН. – 2002. – Т. 382, № 3. – С. 374–378.
9. *Егоров К. Н., Зинчук Н. Н., Мишенин С. Г., Серов В. П., Секерин А. П., Галенко В. П., Денисенко Е. П., Барышев А. С., Меньшагин Ю. В., Кошкарев Д. А.* Перспективы коренной и россыпной алмазоносности Юго-Западной части Сибирской платформы // Геологические аспекты минерально-сырьевой базы Акционерной компании «АЛРОСА»: современное состояние, перспективы, решения. Дополнительные материалы по итогам региональной научно-практической конференции «Актуальные проблемы геологической отрасли АК «АЛРОСА» и научно-методическое обеспечение их решений», посвящённой 35-летию ЯНИГП ЦНИГРИ АК «АЛРОСА». – Мирный: МГТ, 2003. – С. 50–84.
10. *Зинчук Н. Н.* Геологические исследования при поисках алмазных месторождений // Вестник Воронежского ун-та. Геология. – 2021. – № 4. – С. 35–52.
11. *Зинчук Н. Н.* Докембрийские источники алмазов в россыпях фанерозоя // Вестник Воронежского ун-та. Геология. – 2021. – № 3. – С. 50–61.
12. *Зинчук Н. Н.* Карбонатизация кимберлитов при постмагматических процессах // Вестник Воронежского ун-та. Геология. – 2017. – № 4. – С. 63–71.
13. *Зинчук Н. Н.* Коры выветривания и их роль в формировании посткимберлитовых осадочных толщ // Руды и металлы. – 2022. – № 2. – С. 100–120.
14. *Зинчук Н. Н.* Кремнистые минералы в кимберлитах // Вестник Воронежского ун-та. Геология. – 2022. – № 4. – С. 38–52.
15. *Зинчук Н. Н.* О геохимических особенностях разновозрастных образований алмазоперспективных территорий // Отечественная геология. – 2023. – № 1. – С. 42–55.
16. *Зинчук Н. Н.* Об использовании гипергенных образований кимберлитов при алмазопоисковых работах // Отечественная геология. – 2020. – № 2. – С. 62–80.
17. *Зинчук Н. Н.* Об основных геолого-поисковых обстановках при прогнозировании кимберлитовых трубок // Наука и образование. – 2016. – № 4 (84). – С. 7–15.
18. *Зинчук Н. Н.* Об особенностях флюидных и гидротермальных включений в некоторых минералах кимберлитов // Проблемы минералогии, петрографии и металлогении. Научные чтения памяти П. Н. Чирвинского. Вып. 26. – Пермь : ПГНУ, 2023. – С. 45–64.
19. *Зинчук Н. Н.* Особенности алмазоносности разных фаз внедрения кимберлитов // Отечественная геология. – 2017. – № 1. – С. 105–111.
20. *Зинчук Н. Н.* Особенности минералов слюд в кимберлитах // Вестник Воронежского ун-та. Геология. – 2018. – № 2. – С. 29–39.
21. *Зинчук Н. Н.* Особенности петрографического изучения кимберлитовых пород // Отечественная геология. – 2022. – № 4. – С. 34–49.
22. *Зинчук Н. Н.* Особенности серпентинизации кимберлитовых пород // Вестник Воронежского ун-та. Геология. – 2017. – № 3. – С. 66–74.
23. *Зинчук Н. Н.* Особенности состава и распределения слюдистых образований в кимберлитовых породах Якутии // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. – 1991. – № 7. – С. 58–66.
24. *Зинчук Н. Н.* Особенности флюидных включений в минералах // Вестник Пермского ун-та. Геология. – 2021. – Т. 20, № 2. – С. 110–124.
25. *Зинчук Н. Н.* Роль петролого-минералогических и геохимических исследований в оценке потенциальной алмазоносности кимберлитов // Отечественная геология. – 2022. – № 1. – С. 36–47.
26. *Зинчук Н. Н.* Типоморфные свойства индикаторных минералов кимберлитов и их использование при прогнозировании месторождений алмаза на Сибирской платформе // Отечественная геология. –

2021. – № 2. – С. 41–56.
27. *Зинчук Н. Н., Бардухинов Л. Д.* О специфике изучения алмаза при прогнозно-поисковых работах (на примере Сибирской платформы) // Руды и металлы. – 2021. – № 3. – С. 59–75.
28. *Зинчук Н. Н., Борис Е. И., Яныгин Ю. Б.* Особенности минерагении алмаза в древних осадочных толщах (на примере верхнепалеозойских отложений Сибирской платформы). – М. : МГТ, 2004. – 172 с.
29. *Зинчук Н. Н., Зинчук М. Н.* О специфике термобарических факторов оруденения // Проблемы минералогии, петрографии и металлогении. Научные чтения памяти П. Н. Чирвинского. Вып. 26. – Пермь : ПГНУ, 2023. – С. 65–86.
30. *Зинчук Н. Н., Зуев В. М., Коптиль В. И., Чёрный С. Д.* Стратегия ведения и результаты алмазопоисковых работ // Горный вестник. – 1997. – № 3. – С. 53–57.
31. *Зинчук Н. Н., Мельник Ю. М., Серенко В. П.* Апокимберлитовые породы // Геология и геофизика. – 1987. – № 10. – С. 66–72.
32. *Зинчук Н. Н., Стегницкий Ю. Б.* Особенности коры выветривания кимберлитов северо-востока Анголы // Вестник Воронежского ун-та. Геология. – 2020. – № 2. – С. 6–19.
33. *Котельников Д. Д., Зинчук Н. Н.* Кристаллохимические и структурные особенности глинистых минералов в корах выветривания в зависимости от типа исходных пород // Бюллетень Московского общества испытателей природы. Отдел геологический. – 2001. – Т. 76, № 3. – С. 69–79.
34. *Котельников Д. Д., Зинчук Н. Н.* Об аномалии общей схемы преобразования разбухающих глинистых минералов при погружении содержащих их отложений в стратисферу // Вестник Воронежского ун-та. Серия геология. – 2003. – № 2. – С. 57–68.
35. *Котельников Д. Д., Зинчук Н. Н.* Особенности глинистых минералов в отложениях различных осадочных формаций // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. – 1997. – № 2. – С. 53–63.
36. *Котельников Д. Д., Зинчук Н. Н.* Типоморфные особенности и палеогеографическое значение слюдистых минералов // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. – 1996. – № 1. – С. 53–61.
37. *Котельников Д. Д., Зинчук Н. Н.* Условия накопления и постседиментационного преобразования глинистых минералов в отложениях терригенной формации // Бюллетень Московского общества испытателей природы. Отдел геологический. – 2001. – Т. 76, № 1. – С. 45–53.
38. *Котельников Д. Д., Зинчук Н. Н., Кузьмин В. А.* Морфогенетические разновидности каолинита в корах выветривания и осадочном чехле земной коры. Ст. 1. Механизм образования каолинита в корах выветривания различных петрохимических типов пород // Известия ВУЗов. Геология и разведка. – 2006. – № 5. – С. 19–25.
39. *Савко А. Д., Шевырев Л. Т., Зинчук Н. Н.* Эпохи мощного корообразования в истории Земли. – Воронеж : ВГУ, 1999. – 102 с.
40. *Толстов А. В., Зинчук Н. Н.* Вклад Алмазной лабораторию ЦНИГРИ в научную кладовую Якутии // Руды и металлы. – 2022. – № 2. – С. 25–35.
41. *Харькив А. Д., Зинчук Н. Н., Крючков А. И.* Коренные месторождения алмазов Мира. – М. : Недра, 1998. – 555 с.
42. *Харькив А. Д., Зуенко В. В., Зинчук Н. Н., Крючков А. И., Уханов А. В., Богатых М. М.* Петрохимия кимберлитов. – М. : Недра, 1991. – 304 с.
43. *Хитров В. Г., Зинчук Н. Н., Котельников Д. Д.* Применение кластер-анализа для выяснения закономерностей выветривания пород различного состава // Доклады АН СССР. – 1987. – Т. 296, № 5. – С. 1228–1233.
44. *Afanas'ev V. P., Zinchuk N. N., Griffin V. L.* et al. Diamond prospects in the Southwestern plankt of the Tungusk Sineklise // Geology of ore Deposits. – 2005. – Т. 47, № 1. – P. 45–62.
45. *Grachanov S. A., Zinchuk N. N., Sobolev N. V.* The age of Predictable primary diamond sources in the Northeastern Sibirian platform // Doklady Eart Sciences. – 2015. – Т. 465, № 2. – P. 1297–1301.
46. *Kotelnikov D. D., Zinchuk N. N.* Comparative analysis of clay Mineral evolution under the Conditions of humid and arid Lithogenesis // Russian Geology and Geophysics. – 2008. – № 10. – P. 121–144.
47. *Serov I. V., Garanin V. K., Zinchuk N. N., Rotman A. Ya.* Mantle Sources of the kimberlite Vorcanism of the Sibirian Platform // Petrology. – 2001. – Т. 9. – № 6. – P. 576–588.

REFERENCES

1. *Afanas'yev V. P., Zinchuk N. N.* Mineralogiya drevnikh rossypey almazov vostochnogo borta Tungusskoy sineklizy [Mineralogy of ancient diamond placers of the eastern side of the Tunguska syneclise]. Geologiya i geofizika, 1987, No. 1, pp. 90–96. (In Russ.)
2. *Afanas'yev V. P., Zinchuk N. N., Koptil' V. I.* Poligenez almazov v svyazi s problemoy korennykh rossypey severo-vostoka Sibirskoy platformy [Diamond polygenesis in connection with the problem of bedrock placers in the northeast of the Siberian Platform]. Doklady Akademii nauk, 1998, V. 361, No. 3, pp. 366–369. (In Russ.)

3. *Afanas'yev V. P., Zinchuk N. N., Logvinova A. N.* Osobennosti raspredeleniya rossypnykh almazov, svyazannykh s dokembriyskimi istochnikami [Features of the distribution of alluvial diamonds associated with Precambrian sources], Zapiski Rossiyskogo mineralogicheskogo obshchestva, 2009, T. 138, No. 2, pp. 1–13. (In Russ.)
4. *Afanas'yev V. P., Pokhilenko N. P., Logvinova A. M., Zinchuk N. N., Yefimova E. S., Saf'yannikov V. I., Krasavchikov V. O., Podgornykh M. M., Prugov V. P.* Osobennosti morfologii i sostava nekotorykh khromshpinelidov almazonosnykh ploshchadey v svyazi s problemoy «lozhnykh» indikatorov kimberlitov [Features of the morphology and composition of some chrome-spinels of diamond-bearing areas in connection with the problem of «false» indicators of kimberlites], Geologiya i geofizika, 2000, V. 41, No. 12, pp. 1729–1741. (In Russ.)
5. *Bratus' M. D., Zinchuk N. N., Krauze G. R., Vityk M. O.* Usloviya kristallizatsii i izotopnaya priroda sery, ugleroda i kisloroda sul'fidno-kal'tsiyevoy assotsiatsii v trubke Udachnaya (Yakutiya) [Crystallization conditions and the isotopic nature of sulfur, carbon and oxygen of the calcium sulfide association in the Udachnaya pipe (Yakutia)], Geokhimiya, 1998, No. 3, pp. 264–270. (In Russ.)
6. *Bratus' M. D., Svoren' I. M., Zinchuk N. N., Argunov K. P.* Gazovyye komponenty vklyucheniy v almazakh razlichnykh morfologicheskikh tipov iz Yakutii [Gas components of inclusions in diamonds of various morphological types from Yakutia], Geokhimiya, 1991, No. 11, pp. 1586–1595. (In Russ.)
7. *Vasilenko V. B., Zinchuk N. N., Kuznetsova L. G.* Geodinamicheskiy kontrol' razmeshcheniya kimberlitovykh poley tsentral'noy i severnoy chastey Yakutskoy kimberlitovoy provintsii (petrokhimicheskiy aspekt) [Geodynamic control of the placement of kimberlite fields in the central and northern parts of the Yakutsk kimberlite province (petrochemical aspect)], Vestnik Voronezhskogo gosuniversiteta. Geologiya, 2000, No. 3 (9), pp. 37–55. (In Russ.)
8. *Gorshkov A. I., Zinchuk N. N., Kotel'nikov D. D., Shlykov V. G., Zhukhlistov A. P., Mokhov A. V., Sivtsov A. V.* Novyy uporyadochennyy smeshanosloynyy mineral lizardit-saponit iz kimberlitov Yuzhnoy Afriki [New ordered mixed-layer mineral lizardite-saponite from kimberlites South Africa], Doklady RAN, 2002, V. 382, No. 3, pp. 374–378. (In Russ.)
9. *Yegorov K. N., Zinchuk N. N., Mishenin S. G., Serov V. P., Sekerin A. P., Galenko V. P., Denisenko Ye. P., Baryshev A. S., Men'shagin Yu. V., Koshkarev D. A.* Perspektivy korennoy i rossypnoy almazonosnosti Yugo-Zapadnoy chasti Sibirskoy platformy [Prospects for primary and alluvial diamond content in the Southwestern part of the Siberian Platform], Geologicheskiye aspekty mineral'no-syr'yevoy bazy Aktsionernoy kompanii «ALROSA»: sovremennoye sostoyaniye, perspektivy, resheniya. Dopolnitel'nyye materialy po itogam regional'noy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Aktual'nyye problemy geologicheskoy otrasli AK «ALROSA» i nauchno-metodicheskoye obespecheniye ikh resheniy», posvyashchennoy 35-letiyu YANIGP TSNIGRI AK «ALROSA», Mirnyy, MGT publ., 2003, pp. 50–84. (In Russ.)
10. *Zinchuk N. N.* Geologicheskiye issledovaniya pri poiskakh almaznykh mestorozhdeniy [Geological research in the search for diamond deposits], Vestnik Voronezhskogo un-ta. Geologiya, 2021, No. 4, pp. 35–52. (In Russ.)
11. *Zinchuk N. N.* Dokembriyskiye istochniki almazov v rossypyakh fanerozoya [Precambrian sources of diamonds in Phanerozoic placers], Vestnik Voronezhskogo un-ta. Geologiya, 2021, No. 3, pp. 50–61. (In Russ.)
12. *Zinchuk N. N.* Karbonatizatsiya kimberlitov pri postmagmaticheskikh protsessakh [Carbonatization of kimberlites during postmagmatic processes], Vestnik Voronezhskogo un-ta. Geologiya, 2017, No. 4, pp. 63–71. (In Russ.)
13. *Zinchuk N. N.* Kory vyvetrivaniya i ikh rol' v formirovanii postkimberlitovykh osadochnykh tolshch [Weathering crusts and their role in the formation of post-kimberlite sedimentary strata], Rudy i metally, 2022, No. 2, pp. 100–120. (In Russ.)
14. *Zinchuk N. N.* Kremnistyye mineraly v kimberlitakh [Siliceous minerals in kimberlites], Vestnik Voronezhskogo un-ta. Geologiya, 2022, No. 4, pp. 38–52. (In Russ.)
15. *Zinchuk N. N.* O geokhimicheskikh osobennostyakh raznovozrastnykh obrazovaniy almazoperspektivnykh territoriy [On the geochemical features of uneven-aged formations of diamond-promising territories], Otechestvennaya geologiya, 2023, No. 1, pp. 42–55. (In Russ.)
16. *Zinchuk N. N.* Ob ispol'zovanii gipergennykh obrazovaniy kimberlitov pri almazopoiskovykh rabotakh [On the use of hypergene formations of kimberlites in diamond prospecting], Otechestvennaya geologiya, 2020, No. 2, pp. 62–80. (In Russ.)
17. *Zinchuk N. N.* Ob osnovnykh geologo-poiskovykh obstanovkakh pri prognozirovanii kimberlitovykh trubok [On the main geological prospecting conditions in the forecasting of kimberlite pipes], Nauka i obrazovaniye, 2016, No. 4 (84), pp. 7–15. (In Russ.)
18. *Zinchuk N. N.* Ob osobennostyakh flyuidnykh i gidrotermal'nykh vklyucheniy v nekotorykh mineralakh kimberlitov [On the features of fluid and hydrothermal inclusions in some minerals of kimberlites], Problemy mineralogii, petrografii i metallogenii. Nauchnyye chteniya pamyati P. N. Chirvinskogo. Is. 26, Perm, PGNU, 2023, pp. 45–64. (In Russ.)
19. *Zinchuk N. N.* Osobennosti almazonosnosti raznykh faz vnedreniya kimberlitov [Features of diamond

content of different phases of kimberlite intrusion], Otechestvennaya geologiya, 2017, No. 1, pp. 105–111. (In Russ.)
20. *Zinchuk N. N.* Osobennosti mineralov slyud v kimberlitakh [Features of micas minerals in kimberlites], Vestnik Voronezhskogo universiteta. Geologiya, 2018, No. 2, pp. 29–39. (In Russ.)
21. *Zinchuk N. N.* Osobennosti petrograficheskogo izucheniya kimberlitovykh porod [Peculiarities of petrographic study of kimberlite rocks], Otechestvennaya geologiya, 2022, No. 4, pp. 34–49. (In Russ.)
22. *Zinchuk N. N.* Osobennosti serpentinizatsii kimberlitovykh porod [Features of serpentinization of kimberlite rocks], Vestnik Voronezhskogo un-ta. Geologiya, 2017, No. 3, pp. 66–74. (In Russ.)
23. *Zinchuk N. N.* Osobennosti sostava i raspredeleniya slyudistykh obrazovaniy v kimberlitovykh porodakh Yakutii [Peculiarities of the composition and distribution of mica formations in kimberlite rocks of Yakutia], Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geologiya i razvedka, 1991, No. 7, pp. 58–66. (In Russ.)
24. *Zinchuk N. N.* Osobennosti flyuidnykh vklyucheniy v mineralakh [Features of fluid inclusions in minerals], Vestnik Permskogo universiteta. Geologiya, 2021, V. 20, No. 2, pp. 110–124. (In Russ.)
25. *Zinchuk N. N.* Rol' petrologo-mineralogicheskikh i geokhimicheskikh issledovaniy v otsenke potentsial'noy almazonosnosti kimberlitov [The role of petrological, mineralogical and geochemical studies in assessing the potential diamond content of kimberlites], Otechestvennaya geologiya, 2022, No. 1, pp. 36–47. (In Russ.)
26. *Zinchuk N. N.* Tipomorfnyye svoystva indikatornykh mineralov kimberlitov i ikh ispol'zovaniye pri prognozirovanii mestorozhdeniy almaza na Sibirskoy platforme [Typomorphic properties of kimberlite indicator minerals and their use in predicting diamond deposits on the Siberian platform], Otechestvennaya geologiya, 2021, No. 2, pp. 41–56. (In Russ.)
27. *Zinchuk N. N., Bardukhinov L. D.* O spetsifike izucheniya almaza pri prognozno-poiskovykh rabotakh (na primere Sibirskoy platformy) [On the specifics of the study of diamond during predictive and prospecting work (on the example of the Siberian Platform)], Rudy i metally, 2021, No. 3, pp. 59–75. (In Russ.)
28. *Zinchuk N. N., Boris Ye. I., Yanygin Yu. B.* Osobennosti mineragenii almaza v drevnikh osadochnykh tolshchakh (na primere verkhnepaleozoyskikh otlozheniy Sibirskoy platformy), Moscow, MGT publ., 2004, 172 p. (In Russ.)
29. *Zinchuk N. N., Zinchuk M. N.* O spetsifike termobaricheskikh faktorov orudeneniya [On the specifics of thermobaric factors of mineralization], Problemy mineralogii, petrografii i metallogenii. Nauchnyye chteniya pamyati P. N. Chirvinskogo. Is. 26, Perm, PGNU publ., 2023, pp. 65–86. (In Russ.)
30. *Zinchuk N. N., Zuyev V. M., Koptil' V. I., Chornyy S. D.* Strategiya vedeniya i rezul'taty almazopoiskovykh rabot [The strategy of conducting and the results of diamond prospecting], Gornyy vestnik, 1997, No. 3, pp. 53–57. (In Russ.)
31. *Zinchuk N. N., Mel'nik Yu. M., Serenko V. P.* Apokimberlitovyye porody [Apokimberlite rocks], Geologiya i geofizika, 1987, No. 10, pp. 66–72. (In Russ.)
32. *Zinchuk N. N., Stegnitskiy Yu. B.* Osobennosti kory vyvetrivaniya kimberlitov severo-vostoka Angoly [Features of the weathering crust of kimberlites of the north-east of Angola], Vestnik Voronezhskogo un-ta. Geologiya, 2020, No. 2, pp. 6–19. (In Russ.)
33. *Kotel'nikov D. D., Zinchuk N. N.* Kristallokhimicheskiye i strukturnyye osobennosti glinistykh mineralov v korakh vyvetrivaniya v zavisimosti ot tipa iskhodnykh porod [Crystal-chemical and structural features of clay minerals in weathering crusts depending on the type of parent rocks], Byulleten' Moskovskogo obshchestva ispytateley prirody. Otdel geologicheskiy, 2001, V. 76, No. 3, pp. 69–79. (In Russ.)
34. *Kotel'nikov D. D., Zinchuk N. N.* Ob anomalii obshchey skhemy preobrazovaniya razbukhayushchikh glinistykh mineralov pri pogruzhenii soderzhashchikh ikh otlozheniy v stratisferu [On the anomaly of the general scheme of transformation of swelling clay mi-nerals during the immersion of deposits containing them intothe stratisphere], Vestnik Voronezhskogo gosuniversiteta. Seriya geologiya, 2003, No. 2, pp. 57–68. (In Russ.)
35. *Kotel'nikov D. D., Zinchuk N. N.* Osobennosti glinistykh mineralov v otlozheniyakh razlichnykh osadochnykh formatsiy [Peculiarities of clay minerals in deposits of various sedimentary formations], Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geologiya i razvedka, 1997, No. 2, pp. 53–63. (In Russ.)
36. *Kotel'nikov D. D., Zinchuk N. N.* Tipomorfnyye osobennosti i paleogeograficheskoye znacheniye slyudistykh mineralov [Typomorphic features and paleogeographical significance of micaceous minerals], Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geologiya i razvedka, 1996, No. 1, pp. 53–61. (In Russ.)
37. *Kotel'nikov D. D., Zinchuk N. N.* Usloviya nakopleniya i postsedimentatsionnogo preobrazovaniya glinistykh mineralov v otlozheniyakh terrigennoy formatsii [Conditions of accumulation and post-sedimentary transformation of clay minerals in deposits of terrigenous formation], Byulleten' Moskovskogo obshchestva ispytateley prirody. Otdel geologicheskiy, 2001, V. 76, No. 1, pp. 45–53. (In Russ.)
38. *Kotel'nikov D. D., Zinchuk N. N., Kuz'min V. A.* Morfogeneticheskiye raznovidnosti kaolinita v korakh vyvetrivaniya i osadochnom chekhle zemnoy kory. St. 1. Mekhanizm obrazovaniya kaolinita v korakh vyvetrivaniya razlichnykh petrokhimicheskikh tipov porod [Morphogenetic varieties of kaolinite in weathering crusts and

sedimentary cover of the earth's crust. Art. 1. The mechanism of kaolinite formation in the weathering crusts of various petrochemical types of rocks], Izvestiya VUZov. Geologiya i razvedka, 2006, No. 5, pp. 19–25. (In Russ.)
39. *Savko A. D., Shevyrev L. T., Zinchuk N. N.* Epokhi moshchnogo koroobrazovaniya v istorii Zemli [Epochs of powerful crust formation in the history of the Earth], Voronezh, VGU publ., 1999, 102 p. (In Russ.)
40. *Tolstov A. V., Zinchuk N. N.* Vklad Almaznoy laboratoriyu TSNIGRI v nauchnuyu kladovuyu Yakutii [The contribution of the TsNIGRI Diamond Laboratory to the scientific storeroom of Yakutia], Rudy i metally, 2022, No. 2, pp. 25–35. (In Russ.)
41. *Khar'kiv A. D., Zinchuk N. N., Kryuchkov A. I.* Korennyye mestorozhdeniya almazov Mira [Primary diamond deposits of the World], Moscow, Nedra, 1998, 555 p. (In Russ.)
42. *Khar'kiv A. D., Zuyenko V. V., Zinchuk N. N., Kryuchkov A. I., Ukhanov A. V., Bogatykh M. M.* Petrokhimiya kimberlitov [Petrochemistry of kimberlites], Moscow, Nedra publ., 1991, 304 p. (In Russ.)
43. *Khitrov V. G., Zinchuk N. N., Kotel'nikov D. D.* Primeneniye klaster-analiza dlya vyyasneniya zakonomernostey vyvetrivaniya porod razlichnogo sostava [Application of cluster analysis to elucidate the patterns of weathering of rocks of various compositions], Doklady AN SSSR, 1987, V. 296, No. 5, pp. 1228–1233. (In Russ.)
44. *Afanas'ev V. P., Zinchuk N. N., Griffin V. L.* et al. Diamond prospects in the Southwestern plankt of the Tungusk Sineklise, Geology of ore Deposits, 2005, V. 47, No. 1, P. 45–62.
45. *Grachanov S. A., Zinchuk N. N., Sobolev N. V.* The age of Predictable primary diamond sources in the Northeastern Sibirian platform, Doklady Eart Sciences, 2015, V. 465, No. 2, P. 1297–1301.
46. *Kotelnikov D. D., Zinchuk N. N.* Comparative analysis of clay Mineral evolution under the Conditions of humid and arid Lithogenesis, Russian Geology and Geophysics, 2008, No. 10, pp. 121–144.
47. *Serov I. V., Garanin V. K., Zinchuk N. N., Rotman A. Ya.* Mantle Sources of the kimberlite Vorcanism of the Sibirian Platform, Petrology, 2001, V. 9, No. 6, pp. 576–588.

Статья поступила в редакцию 18.04.23; одобрена после рецензирования 30.04.23; принята к публикации 11.05.23.
The article was submitted 18.04.23; approved after reviewing 30.04.23; accepted for publication 11.05.23.

Журнал «Отечественная геология» принимает участие в геологических конференциях, совещаниях, съездах в качестве информационного партнёра, освещая на своих страницах важные события отрасли.

Приглашаем к сотрудничеству представителей геологических, горно-геологических, горнодобывающих организаций и предприятий, отраслевых научно-исследовательских, академических и образовательных институтов по вопросам размещения рекламы или издания целевого номера.