

## НОВЫЕ МИНЕРАЛЫ

УДК 549.0

Д. члены В. И. ПОПОВА, В. А. ПОПОВ, Н. С. РУДАШЕВСКИЙ,  
С. Ф. ГЛАВАТСКИХ, В. О. ПОЛЯКОВ, А. Ф. БУШМАКИН

**НАБОКОИТ  $\text{Cu}_7\text{TeO}_4(\text{SO}_4)_5 \cdot \text{KCl}$  И АТЛАСОВИТ  
 $\text{Cu}_6\text{Fe}^{3+}\text{Bi}^{3+}\text{O}_4(\text{SO}_4)_5\text{KCl}$  — НОВЫЕ МИНЕРАЛЫ  
ВУЛКАНИЧЕСКИХ ЭКСГАЛЯЦИЙ<sup>1</sup>**

Nabokoite,  $\text{Cu}_7\text{TeO}_4(\text{SO}_4)_5 \cdot \text{KCl}$  and atlasovite,  $\text{Cu}_6\text{Fe}^{3+}\text{Bi}^{3+}\text{O}_4(\text{SO}_4)_5 \cdot \text{KCl}$  were found in sublimates of Talbachik volcano, Kamchatka. Tetragonal crystals are tabular with developed {001}, {110}, {012}, {014} forms; transparent, cleavage on {001}. The minerals are the end members of the isomorphous series. The properties of nabokoite and atlasovite accordingly are the following: the colour is yellow-brownish and dark-brown, hardness 98—117 kg/mm<sup>2</sup> (Mohs hardness 2 and 2.5), density 4.18 and 4.20 g/cm<sup>3</sup>. The minerals are biaxial (—),  $N_e=1.778$  and 1.783,  $N_e=1.773$  and 1.776. Microprobe analysis (wt %) gave: Cu 36.45, 30.48; Zn 1.01, 0.82; Pb 0.24, 2.04; Te 11.02, 1.03; Fe 0.06, 4.38; Bi 0.44, 11.5; V 0.05, 0.46; K 3.27, 3.20; Cs 0.1, 0.01; S 13.48, 12.9; Cl 2.92, 2.92; O(CHN—analyser) 28.8, 29.1 ± 1.5; H<sub>2</sub>O (TGA, IR-spectrum) is absent. The fusion point is 620 °C. Unit cell parameters (Å) are: a=9.84 and 9.86, c=20.52 and 20.58. The strongest lines in the powder pattern of nabokoite (d, I, hkl) are: 10.35, 10,002; 4.57, 4, 014; 3.421, 6,006; 2.881, 5, 224; 2.439, 7, 226; d of some reflections in the powder X-ray pattern of atlasovite are slightly enlarged. The paragenesis with anglesite, copper sulphates and chlorides is common. The name nabokoite is for S. I. Naboko the well-known investigator of postvolcanic processes of Kamchatka. Atlasovite is named in honour of V. V. Atlasov, (1661—1711), the russian explorer.

Большое трещинное Толбачинское извержение (БТТИ) на Камчатке в 1975—76 гг. характеризуется и ныне продолжающимися процессами метасоматоза и эксгальционного трещинного минералообразования. Описанию продуктов этих процессов посвящены монография (Набоко, Главатских, 1983) и ряд статей. Тонкозернистость минеральных корок и налетов на стенках трещин и неустойчивость некоторых минералов значительно осложняют их исследование.

В 1980 г. из рудных камер, расположенных на главной кольцевой трещине Центрального фумарольного поля южного крыла Второго конуса Северного прорыва БТТИ (рис. 1), сотрудниками Института вулканологии ДВНЦ СССР С. И. Набоко и С. Ф. Главатских отобрана серия образцов, в которых были обнаружены новые минералы. Камеры располагались цепочкой (рис. 2) на участке длиной 18 м, вблизи Ядовитой фумаролы (известной, так же как «Ниша», — Набоко, Главатских, 1983). Вниз по склону в камерах отмечено постепенное снижение температуры (примерно от 700 до 450 °C, по данным 1978 г.). В камере I преобладают долерофанит и эвхлорин, в камере IV — гематит; из других минералов развиты атакмит, халькантит, халькокианит, толбачит, англезит, пийпит, ламмерит, тенорит, мелланоталлит и ряд других малоизученных (Набоко, Главатских, 1980, 1983, и др.). Наиболее богатая ассоциация минералов харак-

<sup>1</sup> Рассмотрено и рекомендовано к опубликованию Комиссией по новым минералам и названиям минералов Всесоюзного минералогического общества 28 мая 1984 г. (набокоит) и 15 марта 1985 г. (атласовит). Утверждено Комиссией по новым минералам и названиям минералов Международной минералогической ассоциации 28 августа 1986 г.

терна для камер I—III. В ряде случаев отмечена последовательность осаждения минералов: эвхлорина, долерофанита, пийпита, набокоита, англезита → халькокианита, халькантита, атакамита и других водных минералов.

В 1981 г. в зоне внутренней полукольцевой трещины проседания В. А. и В. И. Поповыми была обследована камера V в 40 м по аз. 210° от Ядовитой фумаролы (рис. 2). В небольшой щели, крутопадающей на восток (в сторону, противоположную кратеру), длиной около 80 см, шириной до 10 см и «высотой» около 50 см в глубине была видна раскаленная докрасна порода. На неровных стенках и своде щели, на расстоянии 15—20 см от



Рис. 1. Центральное фумарольное поле Второго конуса Северного прорыва БТТИ (вид с юга; на заднем плане — вулкан Острый Толбачик).

*Стрелкой* показано место находки набокоита и атласовита.

раскаленной породы и до устья, на пористый базальт выросли агрегаты минералов изумрудно-зеленого, голубого и буроватого цвета, среди которых рентгенометрически (с проверкой на  $\text{SO}_4^{2-}$  и  $\text{Cl}^-$ ) определены халькокианит, долерофанит, хлороксицит, атакамит, установленные ранее (Набоко, Главатских, 1983, и др.), а также бесцветные изометричные кристаллики англезита в сростках со светло-буроватым минералом в виде прозрачных тетрагональных табличек, часто с зонами более темной (коричневой и темно-коричневой) окраски. В образцах из разных камер отчетливо заметно преобладание светлоокрашенных кристаллов и зон над темноокрашенными. Как оказалось при их изучении, светлые и темные кристаллы представляют собой крайние члены единого изоморфного ряда. Минералы выделены из смеси путем растворения в воде других ассоциирующих с ними минералов. Светлоокрашенный теллурический член ряда назван набокоитом (nabokoite) в честь известной неутомимой исследовательницы постмагматических процессов на вулканах Камчатки и Курил, доктора геолого-минералогических наук Софьи Ивановны Набоко (род. в 1909 г.). Темноокрашенный железовисмутный член ряда назван атласовитом (atlasovite) в память о русском землепроходце Владимире Васильевиче Атласове (род. ок. 1661—1664—ум. в 1711 г.), который после походов на Камчатку представил в 1701 г. первое описание («скаска») природы и населения Камчатки и некоторые сведения о прилежащих островах и землях.

Набокоит образует тонкопластинчатые по (001) кристаллы с симметрией 4mm, размером до 1 мм, сростки кристаллов и сростки с кристаллами

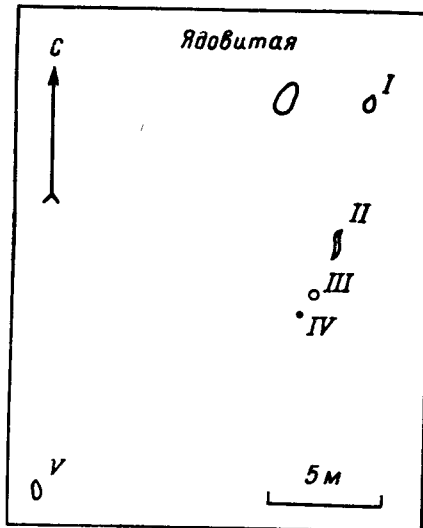
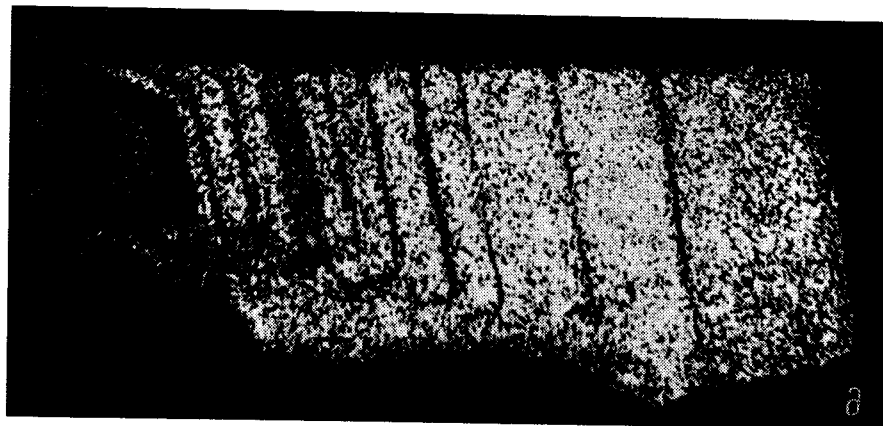
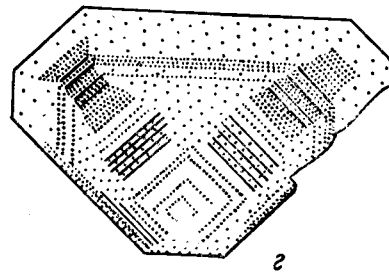
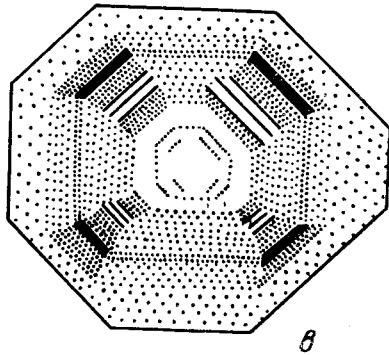
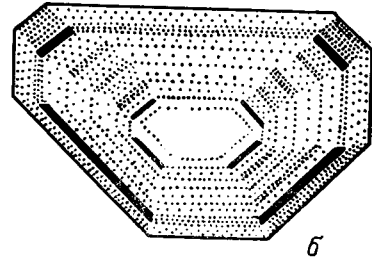
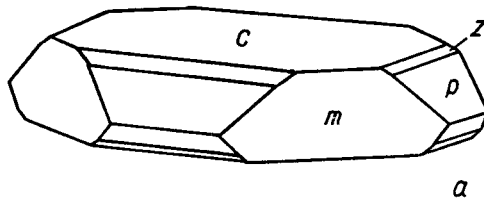


Рис. 2. Схема расположения фумарольных камер с набокситом и атласовитом на Центральном поле.

Рис. 3. Форма кристаллов набокнита и их зонально-секториальное строение.

*a* — аксономическая проекция; *б-г* — схемы распределения окраски в сечении (001); *черное* — зоны атласовита темно-коричневого цвета, *белое* — зоны набокнита желтовато-буроватого цвета, *точки* — зоны промежуточного состава и окраски; *д* — в рентгеновских лучах  $FeK_{\alpha}$  (JXA = 733) — пирамиде роста  $\langle 110 \rangle$ . *a-g* — увел. 100, *д* — увел. 500.



англезита. Обычно кристаллы набокоита прозрачны, желто-буроватого цвета с тонкими более темными зонами. В некоторых кристаллах отчетливо видна зональность и секториальность окраски с вариацией от светло-буроватого до желто-бурого и темно-коричневого цвета. По результатам измерения на гониометре ZRJ-3 главные формы —  $c$  {001},  $m$  {110}, второстепенные —  $p$  {012},  $z$  {014} (рис. 3); координаты граней даны в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Координаты граней кристаллов набокоита—атласовита

Символ	Измеренные		Вычисленные	
	$\varphi$	$\rho$	$\varphi$	$\rho$
001	—	0-00'	—	0°00'
110	45°06'	90 00	45°00'	90 00
012	0 00	46 00	0 00	46 13
014	0 00	27 00	0 00	27 33

Кристаллы атласовита темно-коричневого цвета, с более светлыми зонами в центральных частях зерен, имеют такую же огранку, но обычно таблитчатые или толстотаблитчатые. По зональности и окраске намечается смена центральной светло-окрашенной слабозональной, почти не секториальной части (набокоита) призматическим габитусом периферическими контрастно-зональными секториальными частями (набокоита—атласовита) со значительным развитием в огранке граней дипирамид, причем {001} преимущественно являются гранями торможения. Более темные зоны (атласовита) ярче проявлены в  $\langle 110 \rangle$ . Таким образом, появление темноокрашенных железо-висмутовых зон атласовита в кристаллах набокоита характеризует более поздний период кристаллизации в условиях понижающейся температуры. В отдельных камерах от жерла к устью более светлые кристаллы сменяются более темноокрашенными в соответствии с падением температуры.

Характеристика свойств набокоита в сравнении с атласовитом приведена в табл. 2. Главное различие их в составе и цвете, прочие свойства близки между собой. При раскалывании контрастно-зональных кристаллов с чередованием зон разного состава темные зоны выкалываются сравнительно легко, выявляя гетерометрию кристаллов. В контакте зон набокоита и атласовита в проходящем свете по полоске Бекке отчетливо видно, что показатели преломления темноокрашенных плеохроирующих зон (атласовита) несколько выше. В отраженном свете светло-серые с желтыми внутренними рефlekсами. Спектральное отражение набокоита приведено в табл. 3 (несколько занижено по сравнению с расчетным). Набокоит и атласовит в воде не растворяются; в HCl сначала немного светлеют, затем быстро растворяются, в HNO<sub>3</sub> растворяются без обесцвечивания. В КОН становятся рыхлыми, голубовато-зелеными, с поверхности и при нагревании превращаются в коричневые хлопья. В жидкости Клеричи через 12 ч чернеют с поверхности, с явными следами замещения солями таллия. В высокопреломляющих жидкостях в иммерсии становятся пористыми с краев зерен (частично растворяются).

Химический состав набокоита и атласовита исследован на микрозондах MS-46 «Самеса» Н. С. Рудашевским (ВСЕГЕИ), С. Е. Борисовским (ИГЕМ АН СССР) и на JXA-5A В. И. Сапным (ДВГИ ДВНЦ АН СССР) в разных зернах и разноокрашенных зонах кристаллов. Данные разных лабораторий сходны для содержаний Te, Fe, Bi, Zn, Pb и несколько различаются для Cu, K, Si Cl, что связано с выбором эталонов и очередностью анализа элементов. Во ВСЕГЕИ использованы следующие эталоны: металлические Cu, Te, Zn, Fe, Bi, V, санидин (K), содалит (Cl), пирро-

Таблица 2

## Сопоставление данных о свойствах набокоита и атласовита

Свойства	Набокоит	Атласовит
Облик кристаллов	Тонкопластинчатый по {001}	Пластинчатый и толсто-пластинчатый
Простые формы	Одинаковые	( <i>c, m, p, z</i> )
Цвет	Светло-коричневый, желто-буроватый	Темно-коричневый
Цвет порошка	Желто-коричневый	Светло-коричневый
Прозрачность		Прозрачный
Блеск		Стеклообразный
Хрупкость		Хрупкий
Твердость (кгс/мм <sup>2</sup> )	117 (2—2.5 по шкале Мооса)	98—108
Спайность		По {001} совершенная
Флюоресценция		Не флюоресцирует
Температура плавления		620 (5) °C
Плотность (г/см <sup>3</sup> ):		
измеренная	4.18 (5)	4.20 (5)
вычисленная	4.00	4.12
Оптические свойства (для белого света):		Одноосный (—)
<i>N<sub>o</sub></i>	1.778 (3)	1.783 (3)
<i>N<sub>e</sub></i>	1.773 (3)	1.776 (3)
$\Delta$	0.005	0.007
Плеохроизм	Нет	<i>N<sub>o</sub></i> — красно-коричневый <i>N<sub>e</sub></i> — желтоватый
Рентгеноструктурные данные:		
пространственная группа		<i>P4/nsc</i>
<i>a</i> <sub>0</sub>	9.84 (2) Å	9.86 (2) Å
<i>c</i> <sub>0</sub>	20.52 (2) Å	20.58 (2) Å
<i>c</i> <sub>0</sub> : <i>a</i> <sub>0</sub>	2.0854	2.0872
<i>c</i> : <i>a</i> (гониметрическое)		2.099
Отличия по химическому составу (мас. %):		
Te	11.02	1.03
Fe	0.06	4.38
Bi	0.44	11.50
Cu	36.15	30.48

Примечание. Твердость измерена на ПМТ-3 при  $P = 10$  г; температура плавления — на нагревательном столике с хромель-алюмелевой термопарой, плотность — в концентрированном растворе Клеричи.

Таблица 3

## Дисперсия отражения (%) набокоита

$\lambda$ , нм	$R_1$	$R_2$	$\lambda$ , нм	$R_1$	$R_2$
400	6.7	6.3	575	6.8	6.4
425	6.7	6.3	600	6.8	6.5
450	6.7	6.3	625	6.9	6.6
475	6.7	6.3	650	6.9	6.6
500	6.7	6.3	675	6.9	6.6
525	6.7	6.4	700	6.8	6.5
550	6.8	6.4			

Примечание. МСФП-2, эталон — кремний, аналитик В. Е. Клейнбок (ЛОМО).

тин (S), PbS(Pb); в ИГЕМе — эгирин (Fe), халькопирит (Cu), адуляр (K), Bi-283 (Bi), ZnS(Zn), Те металлический, барит (S), Cl-апатит (Cl); в ДВГИ — CuSbS<sub>2</sub>(Cu), PbS(Pb), Bi<sub>2</sub>S<sub>3</sub>(Bi, S), FeS<sub>2</sub>(Fe), NaCl(Na), K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>(K), ZnSe(Zn), CdTe(Te). Содержание кислорода 28.8—29.1±1.5 мас. % определено хромотографическим методом на анализаторе СНН-3 Л. И. Машинской (ВАМИ) из навесок 0.9358 мг и 0.2871 мг с бензойной кислотой в качестве эталона (26.202 мас. % O<sub>2</sub>); весьма возможно занижение результата анализа на 1.5—2 мас. % из-за неполного взаимодействия O<sub>2</sub> и С при анализе.

Для расчета формул использованы 5 анализов набокоита (теллуrowого члена) и 4 анализа атласовита (железо-висмутового члена). Результаты анализов даны в табл. 4. Эмпирические формулы (в расчете на O+Cl=

Т а б л и ц а 4

Химический состав набокоита и атласовита (мас. %)

Элемент	Набокоит		Атласовит	
	колебания	среднее	колебания	среднее
Cu	34.06—37.4	36.15	30.0—31.0	30.48
Zn	0.81—1.20	1.01	0.66—1.30	0.82
Pb	0—0.61	0.24	1.70—2.47	2.04
Te	10.4—11.5	11.02	0—2.77	1.03
Fe	0.04—0.11	0.06	4.29—4.55	4.38
Bi	0—0.76	0.44	11.2—11.87	11.50
K	3.21—3.33	3.27	2.87—3.38	3.20
V	0.02—0.07	0.05	0.24—0.59	0.46
Cs	0.07—0.11	0.10	0.00—0.05	0.01
S	13.45—13.50	13.48	12.30—13.50	12.90
Cl	2.83—2.99	2.92	2.85—2.99	2.92
O	28.80—29.1	(31.26)	28.80—29.1	(30.26)
С у м м а		100.00		100.00

Т а б л и ц а 4 (продолжение)

Элемент	Окислы	Набокоит		Атласовит	
		1	2	1	2
Cu	CuO	45.25	46.74	38.15	37.73
Zn	ZnO	1.26		1.02	
Pb	PbO <sub>2</sub>	0.28		2.35	
Te	TeO <sub>2</sub>	13.78	13.40	1.29	
Fe	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.03		6.26	6.31
Bi	Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.49		12.82	18.42
K	K <sub>2</sub> O	3.94	3.95	3.85	3.72
V	V <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.07		0.68	
Cs	Cs <sub>2</sub> O	0.11		0.01	
S	SO <sub>3</sub>	33.66	33.60	32.21	31.65
Cl	Cl	2.92	2.98	2.92	2.80
O	—O=Cl	—0.66	—0.67	—0.66	—0.63
С у м м а		101.19	100.00	100.90	100.00

Примечание. 1 — эмпирические данные, 2 — рассчитанные для идеальных формул.

=25): набокоит — (Cu<sub>6,74</sub>Zn<sub>0,18</sub>)<sub>6,92</sub>(Te<sub>1,02</sub>Bi<sub>0,02</sub>Pb<sub>0,01</sub>Fe<sub>0,01</sub>V<sub>0,01</sub>)<sub>1,07</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>4,98</sub>·O<sub>4,10</sub>·(K<sub>0,99</sub>Cs<sub>0,01</sub>)<sub>1,00</sub>Cl<sub>0,98</sub>; атласовит — (Cu<sub>5,90</sub>Zn<sub>0,15</sub>)<sub>6,05</sub>(Fe<sub>0,97</sub>V<sub>0,11</sub>)<sub>1,08</sub>·(Bi<sub>0,68</sub>Pb<sub>0,12</sub>Te<sub>0,10</sub>)<sub>0,90</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>4,95</sub>O<sub>4,19</sub>·K<sub>1,01</sub>Cl<sub>1,01</sub>.

Идеальные формулы —  $\text{Cu}_7\text{TeO}_4(\text{SO}_4)_5 \cdot \text{KCl}$  (набокоит) и  $\text{Cu}_6\text{Fe}^3+\text{Bi}^3+\text{O}_4 \cdot (\text{SO}_4)_5 \cdot \text{KCl}$  (атласовит).

Набокоит и атласовит являются крайними членами единого изоморфного ряда с общей формулой  $\text{Cu}_{7-x}\text{Te}_{1-x}(\text{Fe}, \text{Bi})_{2x}\text{O}_4(\text{SO}_4)_5 \cdot \text{KCl}$ , где  $0 \leq x \leq 1$

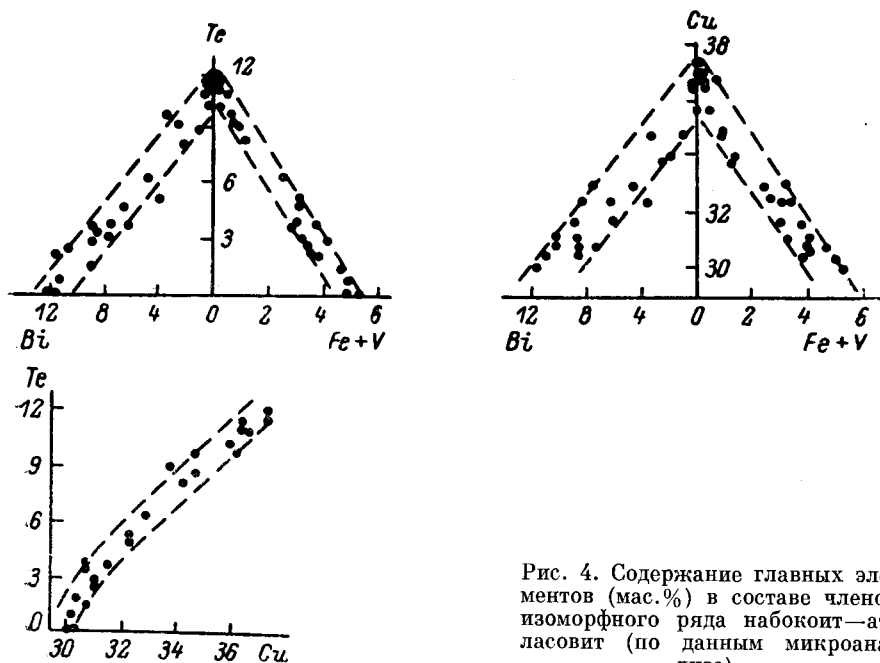


Рис. 4. Содержание главных элементов (мас.%) в составе членов изоморфного ряда набокоит—атласовит (по данным микроанализа).

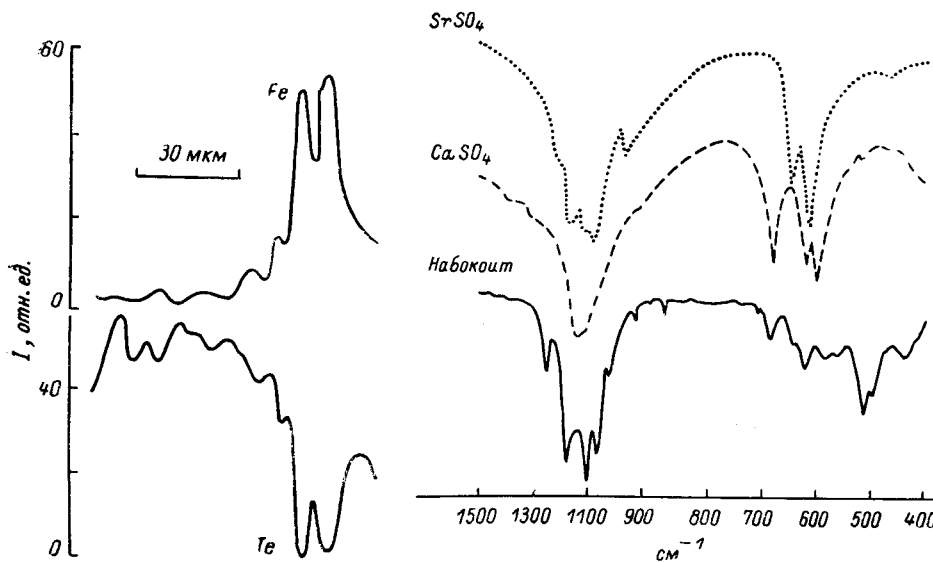


Рис. 5. Характер распределения содержания железа и теллура (отн. ед.) по профилю в контрастно-зональном зерне с зонами набокоита и атласовита. MS-46 «Камека».

Рис. 6. ИК спектр набокоита и безводных сульфатов. UR-20, таблетки с KBr, аналитики Г. А. Нардов, Г. А. Тарарина (ДВГИ).

(рис. 4). Промежуточные по составу зоны имеют различные оттенки цвета от буроватого до коричневого. Коэффициенты парной корреляции  $r_b$  составили: 0.98 (Te—Cu),  $-0.97$  (Te—Bi),  $-0.99$  (Te—Fe, V),  $-0.98$  (Cu—Fe, V) с вероятностью 0.95.

