

Е.В. ПЕРЕВОЗНИКОВА, В.Т. КАЗАЧЕНКО

## Первая находка природного ванадата редкоземельных элементов в России

*Уэйкфилдит-(Ce), монацит-(Ce), ксенотим-(Y), рабдофан-(Ce), рабдофан-(Y), тенгерит-(Y) и бастнезит-(Ce) обнаружены в яшмах (контактово-метаморфизованных металлоносных осадках) триасовой кремневой формации Сихотэ-Алиня. Уэйкфилдит-(Ce), так же как гетит, лимонит, вернадит, романешит, баритоцелестин, целестин, пироморфит, англезит, плюмбогуммит-гинсдалит и др., выполняет полости экзогенного выщелачивания. Он образовался в результате переотложения в пустотах V и REE, высвобождавшихся в процессе экзогенного разложения ранних V-содержащих минералов и замещения эндогенного монацита рабдофаном и бастнезитом.*

*Ключевые слова:* уэйкфилдит-(Ce), редкоземельная минерализация, экзогенные минералы, контактовый метаморфизм, яшмы, метаморфизованные металлоносные осадки, триас, Сихотэ-Алинь.

**The first find of natural vanadate of REE in Russia.** E.V. PEREVOZNIKOVA, V.T. KAZACHENKO (Far East Geological Institute, FEB RAS, Vladivostok).

*Wakefieldite-(Ce), monazite-(Ce), xenotime-(Y), rhabdophane-(Ce), rhabdophane-(Y), tengerite-(Y) and bastnesite-(Ce) were found in jaspers (contact-metamorphosed metalliferous sediments) of the Triassic chert formation of Sikhote-Alin. Wakefieldite-(Ce), as well as goethite, limonite, vernadite, romaneshite, barytocelestine, celestine, pyromorphite, anglesite, plumbogummite-ginsdalite, etc., fills the cavities of endogenous leaching. It was formed as a result of the re-deposition in the voids of V and REE, which released during the exogenous decomposition of early V-containing minerals and the replacement of endogenous monazite of rhabdophane and bastnesite.*

*Key words:* wakefieldite-(Ce), rare-earth mineralization, exogenous minerals, contact metamorphism, jaspers, metamorphosed metalliferous sediments, Triassic, Sikhote-Alin.

### Введение

Известно единственное природное соединение ванадия и редкоземельных элементов –  $(REE, Y)(VO_4)$  под названием уэйкфилдит. Существует четыре разновидности этого минерала: уэйкфилдит-(La), уэйкфилдит-(Ce), уэйкфилдит-(Nd) и уэйкфилдит-(Y). Уэйкфилдит, чрезвычайно редкий в природе ванадат, обнаружен в яшмах триасовой кремневой формации Сихотэ-Алиня (на Широкопаднинской площади Ольгинского рудного района) вместе с другими минералами редкоземельных элементов. Он встречается в виде редких рассеянных зерен микронной размерности, вследствие чего его диагностика была выполнена оптическим методом и заверена результатами определения химического состава на рентгеноспектральном микроанализаторе. Согласно оптическим свойствам и составу этот минерал представляет собой уэйкфилдит-(Ce). Целью исследований являлось получение новых сведений о химическом составе, ассоциациях и происхождении этого минерала.

---

\*ПЕРЕВОЗНИКОВА Елена Валериевна – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, КАЗАЧЕНКО Валентин Тимофеевич – доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник (Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток). \*E-mail: elenavalper@yandex.ru

Триасовая кремневая формация известна в Сихотэ-Алине в виде крупных блоков в осадочных породах юрского и раннемелового олистостромовых комплексов Самаркинского (и его аналога – Наданьхада-Бикинского) и Таухинского террейнов (рис. 1) соответственно. Она сложена кремнями, кремневыми аргиллитами, аргиллитами и алевроаргиллитами [2]. Нижняя часть формации представлена «глинисто-кремнистой» толщей [6] (оленок–средний анизий), обогащенной прослоями углеродистых разностей кремнистых и кремнисто-глинистых пород и перекрытой «кремневой» толщей светло-серых плитчатых кремней (верхний анизий–норий). На Широкопаднинской площади в основании кремневой толщи присутствуют стратифицированные линзовидные и пластовые тела яшм

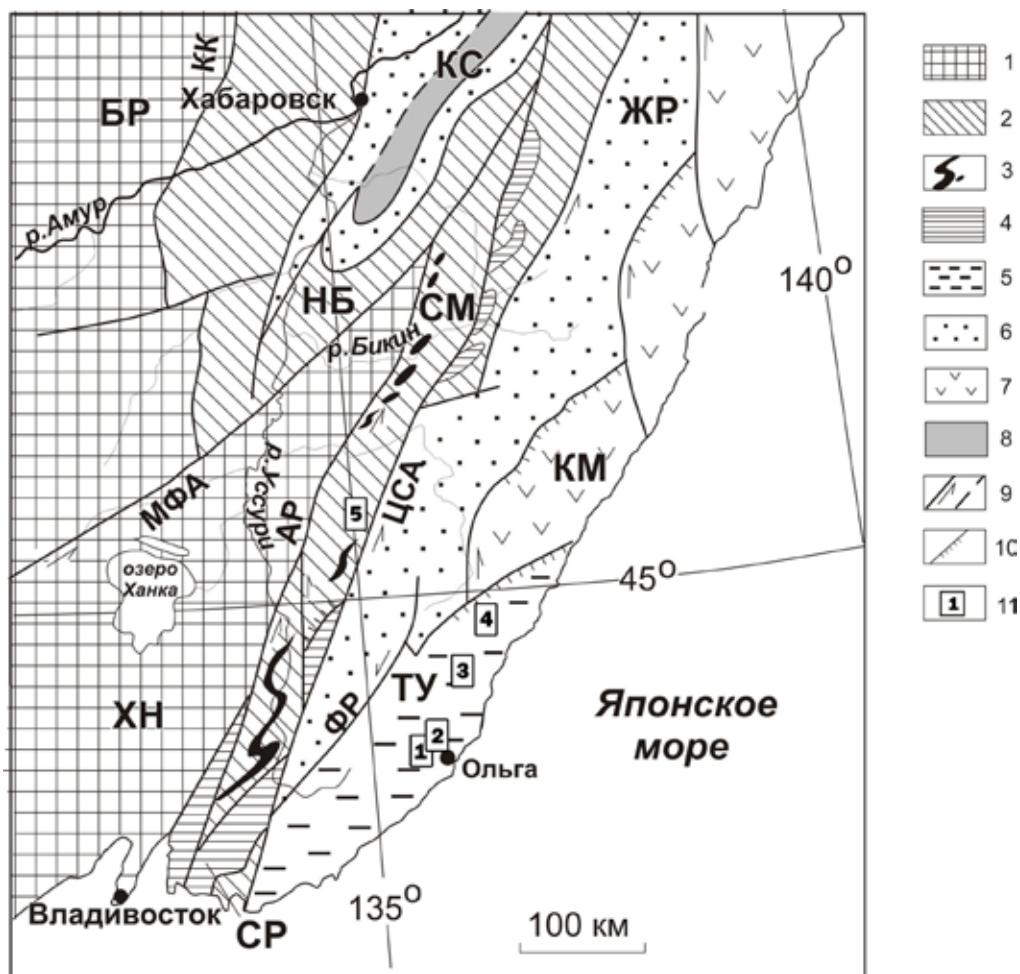


Рис. 1. Положение изученных объектов в Сихотэ-Алине. Тектоническая основа по А.И. Ханчуку [3], с небольшими изменениями: 1 – ХН – Ханкайский массив, БР – Буреинский массив; 2 – юрские террейны (фрагменты аккреционных призм): СМ – Самаркинский, НБ – Наданьхада-Бикинский; 3 – калиновские габброиды (девон?); 4 – Краинско-Сергеевский террейн (СР) и его фрагменты, включенные в структуры юрской аккреционной призм и испытавшие вместе с ними цикл син- и постаккреционных преобразований; 5, 6 – раннемеловые террейны-фрагменты: 5 – неокомовской аккреционной призм (ТУ – Таухинский); 6 – приконтинентального спредингового турбидитового бассейна (ЖР – Журавлевско-Амурский); 7 – баррем-альбской островодужной системы (КМ – Кемский); 8 – альбской аккреционной призм (КС – Киселевско-Маноминский); 9 – левые сдвиги, в том числе: КК – Куканский, АР – Арсеньевский, МФА – Мишань-Фушуньский (Алчанский), ЦСА – Центральный Сихотэ-Алинский, ФР – Фурмановский; 10 – надвиги; 11 – изученные площади с выходами триасовых контактово-метаморфизованных металлоносных осадков: 1 – Широкопаднинская площадь, 2 – Мокрушинская площадь, 3 – Высокогорская площадь, 4 – Садовая площадь, 5 – Горная площадь

(верхний анизий-ладинский ярус) мощностью более 3 м, кремнисто-родохрозитовых, марганцево-силикатных (сложенных силикатами Mn), спессартин-кварцевых и силикатно-магнетитовых пород и руд, представляющих собой контакто-метаморфизованные металлоносные осадки [6]. Эти породы образуют единую рудоносную пачку (рис. 2) или сменяют друг друга по простиранию. На поверхности они маркируют выходы смятого в складки горизонта (рис. 3). Широкопаднинская площадь расположена в пределах контактового ореола Владимирского батолита позднемелового возраста, выступом которого в ее пределах является Широкопаднинский гранитоидный массив (рис. 3).

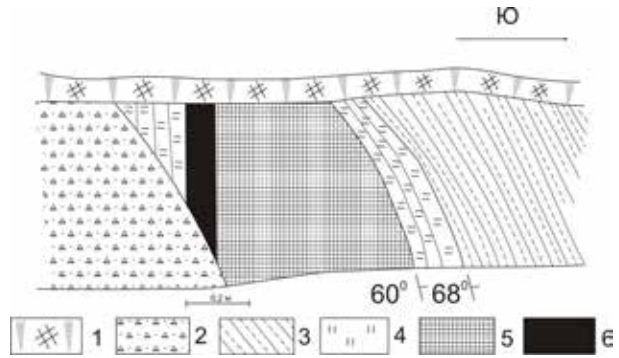


Рис. 2. Характер залегания и строение рудоносной пачки на Широкопаднинской площади Ольгинского района (рудопроявление 19) [4], с дополнениями и изменениями: 1 – почвенно-растительный слой; 2 – делювий; 3 – кремнисто-глинистые породы; 4 – яшмы; 5 – марганцево-силикатные породы; 6 – силикатно-магнетитовые руды

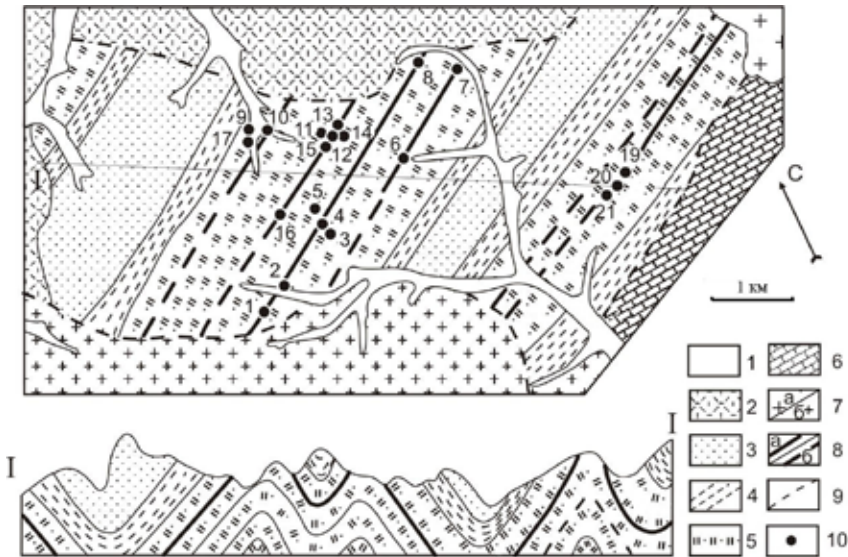


Рис. 3. Схема геологического строения Широкопаднинской площади [6] с изменениями и дополнениями: 1 – четвертичные отложения; 2 – вулканиты Восточно-Сихотэ-Алинского вулканогенного пояса; 3 – песчаниковая толща (K<sub>1</sub>?); 4 – пелит-алевролитовая толща с горизонтами туффигов, кремнистых пород и песчаников (J<sub>2,3</sub>); 5 – глинисто-кремнистые отложения среднего-позднего триаса; 6 – карбон-пермские кремнисто-глинистые отложения и рифовые известняки; 7 – граниты Владимирского (а) и Широкопаднинского (б) массивов (поздний мел-палеоген); 8 – рудоносная пачка (марганцево-силикатные породы, силикатно-магнетитовые руды, яшмы): а – установленное местоположение, б – предполагаемое; 9 – разрывные нарушения; 10 – установленные выходы марганцево-силикатных пород. Цифры на рисунке – номера рудопроявлений [6]

### Методика аналитических исследований

Отбор проб для аналитических исследований производился штучным методом. Определение содержаний второстепенных элементов в яшмах (табл. 1) выполнено

Таблица 1

## Содержание V, Y и REE в ящиках Широкопадинской площади Ольгинского рудного района (Таухинский террейн, Сихотэ-Алинь), г/г

Элемент	Номер образца																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
V	11,03	5,65	20,55	11,82	10,00	34,52	11,22	11,96	15,34	14,16	19,90	9,75	2,26	16,84	11,68	101,89	5,79	10,28	12,95	9,64	14,05	17,54	13,78	18,38
Y	6,92	1,95	4,88	3,13	3,26	3,38	2,72	3,21	3,02	2,79	2,90	4,03	1,60	3,46	8,29	4,96	0,92	1,96	2,37	1,67	3,40	7,41	3,54	1,81
La	6,43	2,54	4,70	4,87	3,57	4,55	4,10	7,16	9,10	3,35	5,54	4,10	0,67	6,24	9,16	13,64	1,48	5,90	4,27	2,67	6,51	10,26	4,58	2,59
Ce	12,90	5,48	15,43	13,23	9,45	12,81	9,59	16,03	12,69	9,30	10,51	16,93	1,20	14,40	17,39	30,57	4,64	8,62	9,98	6,25	14,28	27,82	19,50	6,41
Pr	1,59	0,58	1,14	1,21	1,01	1,17	0,98	1,88	1,87	0,86	1,46	1,14	0,16	1,56	2,40	3,13	0,38	1,21	0,98	0,67	1,68	2,70	1,43	0,69
Nd	6,86	2,37	4,67	4,94	4,19	4,76	3,87	7,49	6,70	3,47	5,77	4,81	0,66	5,96	9,97	11,29	1,49	4,31	3,84	2,65	6,50	10,55	5,65	2,62
Sm	1,41	0,47	0,96	0,96	0,90	0,96	0,74	1,47	1,16	0,70	1,10	1,06	0,17	1,18	2,14	2,00	0,30	0,75	0,73	0,51	1,30	2,20	1,18	0,51
Eu	0,28	0,10	0,21	0,23	0,18	0,21	0,16	0,27	0,21	0,15	0,22	0,26	0,06	0,22	0,46	0,37	0,08	0,14	0,14	0,11	0,24	0,45	0,22	0,08
Gd	1,72	0,56	1,25	1,21	1,09	1,22	0,91	1,57	1,26	0,88	1,18	1,44	0,28	1,37	2,55	2,28	0,36	0,83	0,89	0,61	1,43	2,55	1,65	0,56
Tb	0,19	0,06	0,13	0,12	0,12	0,13	0,10	0,15	0,13	0,10	0,13	0,15	0,04	0,15	0,31	0,23	0,04	0,09	0,09	0,07	0,15	0,28	0,13	0,07
Dy	1,13	0,36	0,85	0,63	0,66	0,71	0,57	0,82	0,71	0,57	0,73	0,83	0,28	0,75	1,68	1,17	0,22	0,44	0,47	0,36	0,79	1,40	0,68	0,38
Ho	0,24	0,07	0,17	0,12	0,13	0,13	0,11	0,15	0,13	0,11	0,13	0,15	0,05	0,14	0,31	0,22	0,04	0,08	0,09	0,07	0,14	0,27	0,12	0,07
Er	0,67	0,21	0,52	0,33	0,34	0,36	0,28	0,39	0,35	0,30	0,36	0,42	0,13	0,37	0,84	0,67	0,12	0,22	0,25	0,19	0,40	0,70	0,34	0,19
Tm	0,09	0,03	0,08	0,05	0,04	0,05	0,03	0,05	0,05	0,04	0,05	0,06	0,02	0,05	0,11	0,10	0,02	0,03	0,03	0,03	0,05	0,09	0,04	0,03
Yb	0,59	0,18	0,50	0,33	0,31	0,32	0,23	0,32	0,32	0,27	0,32	0,36	0,10	0,33	0,64	0,69	0,11	0,20	0,21	0,17	0,34	0,61	0,33	0,16
Lu	0,09	0,03	0,07	0,05	0,04	0,05	0,03	0,04	0,05	0,04	0,05	0,05	0,01	0,05	0,09	0,11	0,02	0,03	0,03	0,02	0,05	0,09	0,05	0,02

Примечание. Анализы выполнены в ХИАЦ ИГиГ методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой на приборе ICP-MS Eilan DRC II Perkin Elmer (США). Аналитики Д.В. Авдеев, Л.С. Бокоренко.

Химический состав экзотенных редкоземельных и ванадийсодержащих минералов,  
а также эндогенного монацита из грансовых яшм Широкопалнинской глыбиды, масс. %

Номер образца	BaO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	CaO	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	FeO	SrO	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	PbO	La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O <sup>*</sup>	Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Dy <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ThO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub> *	H <sub>2</sub> O <sup>*</sup>	Сумма	Формула
1		9,97			0,94	24,17					9,22	42,28	12,62						99,20	(Ce <sub>0,64</sub> Nd <sub>0,18</sub> La <sub>0,14</sub> Ca <sub>0,04</sub> ) <sub>1,00</sub> (VO) <sub>4,065</sub> (PO) <sub>4,035</sub>
2					0,81	36,27					9,01	42,40	11,94						100,43	(Ce <sub>0,65</sub> Nd <sub>0,18</sub> La <sub>0,14</sub> Ca <sub>0,04</sub> ) <sub>1,00</sub> (VO) <sub>4,099</sub>
3		31,19			0,42						20,50	33,16	12,43			7,66			101,29	(Ce <sub>0,46</sub> Nd <sub>0,17</sub> Pr <sub>0,05</sub> Ca <sub>0,02</sub> /0,99)(PO) <sub>4,1,01</sub>
4		30,10			1,25						10,64	33,10	12,83	2,15					99,57	(Ce <sub>0,48</sub> Nd <sub>0,18</sub> Gd <sub>0,16</sub> Gd <sub>0,05</sub> Sm <sub>0,02</sub> Ca <sub>0,05</sub> Th <sub>0,07</sub> /0,99)(PO) <sub>4,1,01</sub>
5		29,36			0,49		2,41				11,47	26,98	12,55	2,06	6,10		7,20		100,20	(Ce <sub>0,41</sub> Nd <sub>0,19</sub> La <sub>0,18</sub> Gd <sub>0,03</sub> Sm <sub>0,02</sub> Y <sub>0,05</sub> Th <sub>0,06</sub> Ca <sub>0,02</sub> /0,96)(PO) <sub>4,1,04</sub> *H <sub>2</sub> O
6		31,09			8,10						15,38	26,39	9,64				8,06		98,66	(Ce <sub>0,36</sub> Ca <sub>0,32</sub> La <sub>0,21</sub> Nd <sub>0,14</sub> ) <sub>1,03</sub> (PO) <sub>4,097</sub> *H <sub>2</sub> O
7		30,29			2,64						17,13	26,17	12,75		2,70		7,42		99,10	(Ce <sub>0,39</sub> La <sub>0,26</sub> Nd <sub>0,18</sub> Ca <sub>0,11</sub> Th <sub>0,03</sub> /0,97)(PO) <sub>4,003</sub> *H <sub>2</sub> O
8		35,79					40,92							3,42	6,14		8,42		97,22	(Y <sub>0,78</sub> Dy <sub>0,07</sub> Gd <sub>0,04</sub> Yb <sub>0,03</sub> /0,92)(PO) <sub>4,1,08</sub> *H <sub>2</sub> O
9							45,04							2,79	6,98		30,80		99,46	(Y <sub>1,71</sub> Dy <sub>0,16</sub> Gd <sub>0,07</sub> Fe <sub>0,06</sub> /2,00)(CO) <sub>3,3</sub> *3H <sub>2</sub> O
10							40,52			1,94				4,04	6,81		29,70	11,92	99,57	(Y <sub>1,60</sub> Dy <sub>0,16</sub> Gd <sub>0,10</sub> Yb <sub>0,10</sub> Pb <sub>0,04</sub> /2,00)(CO) <sub>3,3</sub> *3H <sub>2</sub> O
11							37,89							6,44	7,40	1,82	30,26	12,37	101,18	(Y <sub>1,46</sub> Dy <sub>0,17</sub> Gd <sub>0,16</sub> Zr <sub>0,18</sub> Th <sub>0,03</sub> /2,00)(CO) <sub>3,3</sub> *3H <sub>2</sub> O
12				41,71				56,14											97,85	Sr <sub>1,02</sub> (SO) <sub>4,098</sub>
13		19,04	25,79	7,34	1,76		1,16	2,07		29,56		0,95						9,48	100,55	(Pb <sub>0,76</sub> Ca <sub>0,17</sub> Sr <sub>0,11</sub> Fe <sub>0,08</sub> Ce <sub>0,05</sub> ) <sub>1,09</sub> (Al <sub>2,69</sub> Si <sub>0,30</sub> PO) <sub>4,1,43</sub> (SO) <sub>4,0,49</sub> (OH) <sub>6</sub>
14		11,41	7,97	9,70			24,74	1,17		34,51								10,06	99,56	(Pb <sub>1,05</sub> Sr <sub>0,07</sub> Y <sub>0,09</sub> Fe <sub>0,02</sub> Al <sub>1,03</sub> ) <sub>3,05</sub> (PO) <sub>4,1,06</sub> (SO) <sub>4,0,80</sub> (OH) <sub>6</sub>
15	56,88			35,89	0,87		6,43												100,07	(Ba <sub>0,80</sub> Ca <sub>0,04</sub> Sr <sub>0,14</sub> /0,98)(SO) <sub>4,1,02</sub>
16		10,54	4,11	9,79			32,69			34,62								8,24	99,99	Pb <sub>1,05</sub> (Fe <sub>0,68</sub> Al <sub>0,53</sub> ) <sub>3,21</sub> (PO) <sub>4,098</sub> (SO) <sub>4,0,80</sub> (OH) <sub>6</sub>

Примечания. В анализе 3, кроме того, 3,59 Pr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 4 – 1,84 Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 5 – 1,58 Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 8 – 2,53 Yb<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 10 – 4,64 Yb<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 11 – 5,00 ZrO<sub>2</sub>, 13 – 3,40 SiO<sub>2</sub>. Минералы: уэйфилдинг-(Ce) (1, 2), монацит-(Ce) (3, 4), рабдофан-(Ce) (5–7), рабдофан-(Y) (8), тенгерит (9–11), 12 – целестин, 13 – гинсдалит-пломбогуммит, 14 – коркит, железо трехвалентное, 15 – баритоцелестин, 16 – коркит, железо трехвалентное. Одна звездочка – нормативные содержания, рассчитанные исходя из числа атомов С и Н в теоретических формулах соответственно.

Таблица 3

## Химический состав эндогенных минералов из триасовых ящ Широконадлинской площади, масс. %

Номер образца	SiO <sub>2</sub>	S	TiO <sub>2</sub>	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MnO	Fe	Co	Ni	Zn	ZrO <sub>2</sub>	Mo	As	SnO	Ag	Sb	HfO <sub>2</sub>	Au	Pb	Σmna	Минерал	Формула
1			50,36	0,94	13,79	33,19*													98,28	Ильменит	(Fe <sub>0,71</sub> Mn <sub>0,30</sub> ) <sub>1,00</sub> (V <sub>0,02</sub> Ti <sub>0,97</sub> ) <sub>0,99</sub> O <sub>3</sub>
2			96,57	1,19															97,76	Рутил	(Ti <sub>0,999</sub> V <sub>0,001</sub> )O <sub>2</sub>
3	35,66								60,93				2,21		1,53				100,33	Циркон	(Zr <sub>0,89</sub> Sn <sub>0,04</sub> Ti <sub>0,01</sub> ) <sub>0,94</sub> Si <sub>1,06</sub> O <sub>3,59</sub>
4																	99,64		99,64	Золото	Au <sub>1,00</sub>
5		27,63												69,82					97,45	Спінніт	Sb <sub>2,00</sub> S <sub>3,00</sub>
6		34,91						64,43											99,34	Сфалерит	Zn <sub>0,95</sub> S <sub>1,05</sub>
7		35,07									63,09								98,16	Молибденит	Mo <sub>1,12</sub> S <sub>1,88</sub>
8		66,18			33,41							2,58							102,17	Пирит	Fe <sub>0,98</sub> (S <sub>1,94</sub> As <sub>0,08</sub> ) <sub>2,02</sub>
9		53,80			43,62		2,86												100,28	Пирит	(Fe <sub>0,98</sub> Ni <sub>0,06</sub> ) <sub>0,99</sub> S <sub>2,01</sub>
10		13,28												87,85					101,13	Сульфид Ag	Ag <sub>1,99</sub> S <sub>1,01</sub>
11		22,23			2,77										33,06			41,08	99,14	Джемсонит	Pb <sub>4,09</sub> (Co <sub>0,03</sub> Fe <sub>1,02</sub> ) <sub>1,05</sub> Sb <sub>5,59</sub> S <sub>14,27</sub>
12		35,00			30,03		35,44												100,47	Бравонит	Fe <sub>0,96</sub> Ni <sub>1,08</sub> S <sub>1,96</sub>
13		7,06			1,67	7,40	24,46					18,29			42,51				101,39	Ульманнит	(Ni <sub>0,72</sub> Co <sub>0,22</sub> Fe <sub>0,06</sub> ) <sub>0,99</sub> (Sb <sub>0,59</sub> As <sub>0,41</sub> ) <sub>1,01</sub> S <sub>0,97</sub>
14		15,13				1,37	28,03					5,39			50,78				100,70	Ульманнит	(Ni <sub>0,97</sub> Co <sub>0,05</sub> ) <sub>1,02</sub> (Sb <sub>0,86</sub> As <sub>0,15</sub> ) <sub>1,01</sub> S <sub>0,97</sub>
15		21,21			3,19	31,16	2,48					40,32							98,36	Кобальтин	(Co <sub>0,87</sub> Ni <sub>0,07</sub> Fe <sub>0,09</sub> ) <sub>1,03</sub> (As <sub>0,88</sub> S <sub>1,09</sub> ) <sub>1,97</sub>
16		18,74			3,16	24,07	9,75					43,32							99,04	Кобальтин	(Co <sub>0,67</sub> Ni <sub>0,28</sub> Fe <sub>0,09</sub> ) <sub>1,04</sub> As <sub>0,98</sub> S <sub>0,98</sub>
17		18,40					37,90					37,10			7,01				100,41	Герсдорфит	Ni <sub>1,09</sub> (As <sub>0,84</sub> Sb <sub>0,10</sub> ) <sub>0,94</sub> S <sub>0,97</sub>
18							43,36					46,29			10,39				100,04	Никелит	Ni <sub>1,02</sub> (As <sub>0,86</sub> Sb <sub>0,12</sub> ) <sub>0,98</sub>
19		1,06				0,60	45,50					51,10			1,88				100,14	Никелит	(Ni <sub>1,02</sub> Co <sub>0,01</sub> ) <sub>1,03</sub> (As <sub>0,91</sub> Sb <sub>0,02</sub> ) <sub>0,97</sub>

\*FeO.

в Хабаровском инновационно-аналитическом центре ИТИГ ДВО РАН методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой на спектрометре ICP-MS Elan DRC II PerkinElmer (США). Особенностью методики являлось кислотное разложение проб в микроволновом поле.

Диагностика минералов производилась оптическими методами с использованием поляризационных микроскопов и заверялась определением их химического состава на рентгеноспектральном микроанализаторе. Анализы минералов (в аншлифах) (табл. 2, 3) выполнены в ДВГИ ДВО РАН на микроанализаторе JXA8100 с тремя волновыми спектрометрами и энергодисперсионным спектрометром INCAx-sight. Для обеспечения электропроводимости использовалось графитовое напыление.

## Результаты исследований

Яшмы Широкопаднинской площади представляют собой радиоляриты, или глинисто-кремнистые породы с остатками радиолярий, содержащие альбит, биотит и гидрослюда. Характерным минералом является также калиевый полевой шпат, слагающий мелкие (0.1 мм) гнезда и маломощные прожилковидные зонки и обычно содержащий небольшое (первые масс.%) количество Ва. Яшмы имеют главным образом ярко-красную окраску, обусловленную присутствием многочисленных рассеянных кристаллов обогащенного титаном (иногда кобальтом или ванадием) гематита микронной размерности в кремнистом или глинисто-кремнистом матриксе. В виде мельчайших рассеянных выделений присутствуют акцессорные рутил, титанит, апатит, барит, касситерит, циркон, торанит и таусонит  $\text{SrTiO}_3$ . Рутил, как правило, обогащен V (табл. 3). В барите присутствует примесь Sr, а циркон представлен Sr- и Hf-содержащей разновидностью. В яшмах наблюдаются единичные маломощные прослои, почти не содержащие гематита, но обогащенные биотитом. В таких прослоях иногда встречаются ульманнит, кобальтин, герсдорфит, никелин, бравоит и другие минералы. Минералы Ni и Co слагают отдельные кристаллы или их агрегаты в центральных и (или) периферических частях относительно крупных округлых биотитовых выделений (рис. 4, а, б). Они вместе с биотитом образовались при контактовом метаморфизме протолитов, предположительно за счет обогащенных Ni, Co и Fe глинистых микростяжений. В ульманните присутствует переменное количество Co и As. Встречаются богатые этими элементами разновидности (до 0,36 и 0,42 ф.е. соответственно). Кобальтин обогащен герсдорфитовым миналом (до 28 мол.%). Никелин содержит до 14 мол.% брейтгауптитового минала и незначительную примесь Co и S.

Наиболее распространенными эндогенными минералами редкоземельных элементов в яшмах Широкопаднинской площади являются монацит-(Ce) и ксенотим-(Y). В монаците-(Ce), слагающем мелкие рассеянные в породе зерна или включения в апатите, из других редкоземельных элементов значительные концентрации образуют La, Nd и (иногда) Th (табл. 2). В некоторых случаях в виде небольшой примеси в анализах отмечаются Pr, Gd и Sm. В результате экзогенных процессов монацит и ксенотим иногда полностью или частично замещены рабдофаном-(Ce), рабдофаном-(Y), тенгеритом-(Y) или бастнезитом-(Ce). Рабдофан-(Ce) обогащен легкими REE (табл. 2). В существенном количестве наряду с Ce он содержит La и Nd, иногда Ca, Y или Th. В виде небольшой примеси обычно присутствуют Sm и Gd. Рабдофан-(Y) в проходящем свете прозрачный, спайность не отмечалась. Этот минерал образует шестоватые кристаллы, имеющие в поперечных сечениях шестиугольную форму. Тенгерит-(Y) из триасовых яшм Широкопаднинской площади тоже содержит Dy, Gd и, иногда, Yb, Zr или Pb (табл. 2). Содержания других REE в нем ниже уровня чувствительности рентгеноспектрального микроанализатора и в анализах отсутствуют. Бастнезит  $(\text{Ce}_{0.60}\text{La}_{0.31}\text{Nd}_{0.09})_{1.00}(\text{CO}_3)\text{F}_{0.50}(\text{OH})_{0.50}$  слагает зернистые агрегаты.

Яшмы нередко рассечены системами минерализованных трещин, вдоль которых красная окраска сменяется на зеленовато-светло-серую вследствие неравномерного

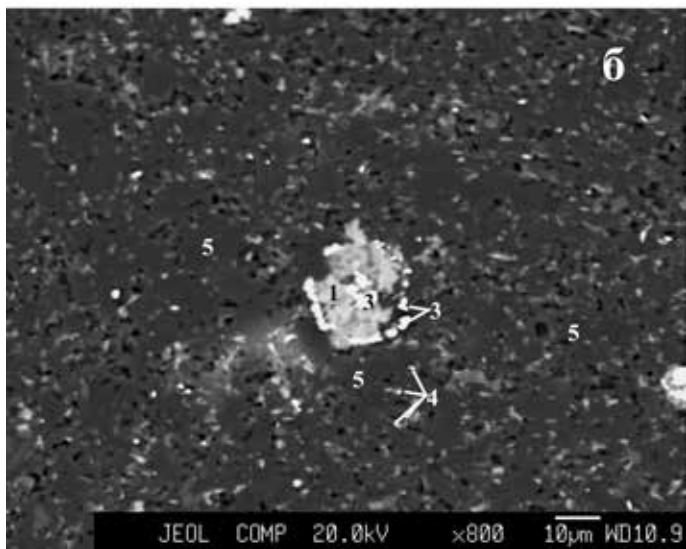
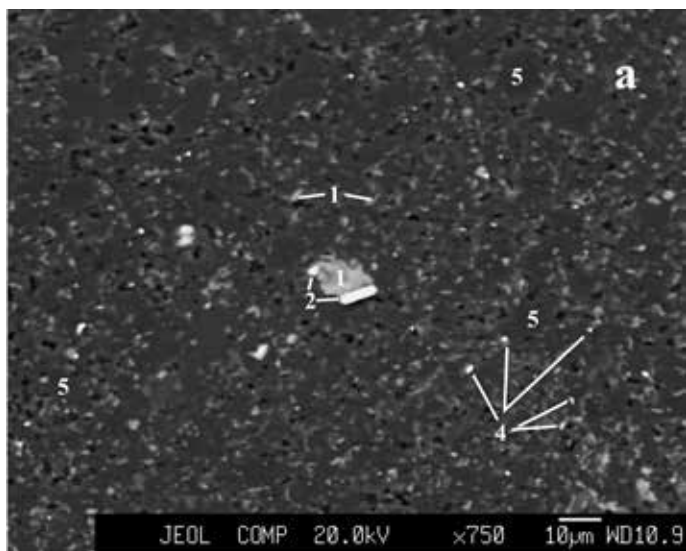


Рис. 4. Никель-кобальтовая минерализация в яшмах Широкопаднинской площади:

*а:* 1 – биотит, 2 – ульманнит, 4 – гематит, 5 – кварц;

*б:* 1 – биотит, 3 – кобальтин, 4 – гематит, 5 – кварц

«восстановления» пород. В таких участках гематит и гидрослюда замещены хлоритом или (гораздо реже) хлоритом и биотитом, а вместо рутила или наряду с ним присутствуют ильменит или пирофанит. Встречаются безжелезистый сфалерит, стибнит, галенит, халькопирит, мышьяковистый или Ni-содержащий пирит и другие минералы. Ильменит представлен V-содержащей богатой Mn разновидностью (табл. 3). Обнаружены также самородные золото и серебро, самородный Au-содержащий никель, соединение  $Ni_3Au$  [7], сульфид серебра, молибденит, буланжерит, самородные элементы и интерметаллические соединения, приуроченные к порам и микротрещинкам с органическим веществом. Кроме того, характерны многочисленные кварц-мусковит-хлоритовые прожилки, содержащие, так же как и измененные породы, органическое вещество, самородные элементы, интерметаллические и другие соединения многих, в том числе и благородных металлов. Присутствие



минеральных форм различных предельно восстановленных металлов обусловлено влиянием органического вещества «глинисто-кремнистой» толщи. Оно связано с удалением из углеродистых пород при нагревании наиболее летучих компонентов, в первую очередь плохо связанной воды и углеводородов, и возникновению, таким образом, некоторого объема обогащенного металлами флюида с высоко- и ультравосстановительными способностями, мигрировавшего по трещинам в другие породы. Источником благородных и других металлов являлось органическое вещество «глинисто-кремнистой» толщи [7].

В яшмах встречаются участки повышенной трещиноватости, в пределах которых породы почти нацело сложены кварцем и содержат многочисленные, иногда частично минерализованные каверны, маркирующие положение ранее присутствовавших, но подвергшихся экзогенному замещению или выщелачиванию зерен и кристаллов минералов. Отдельные каверны заполнены гетитом, лимонитом, вернадитом, романешитом,

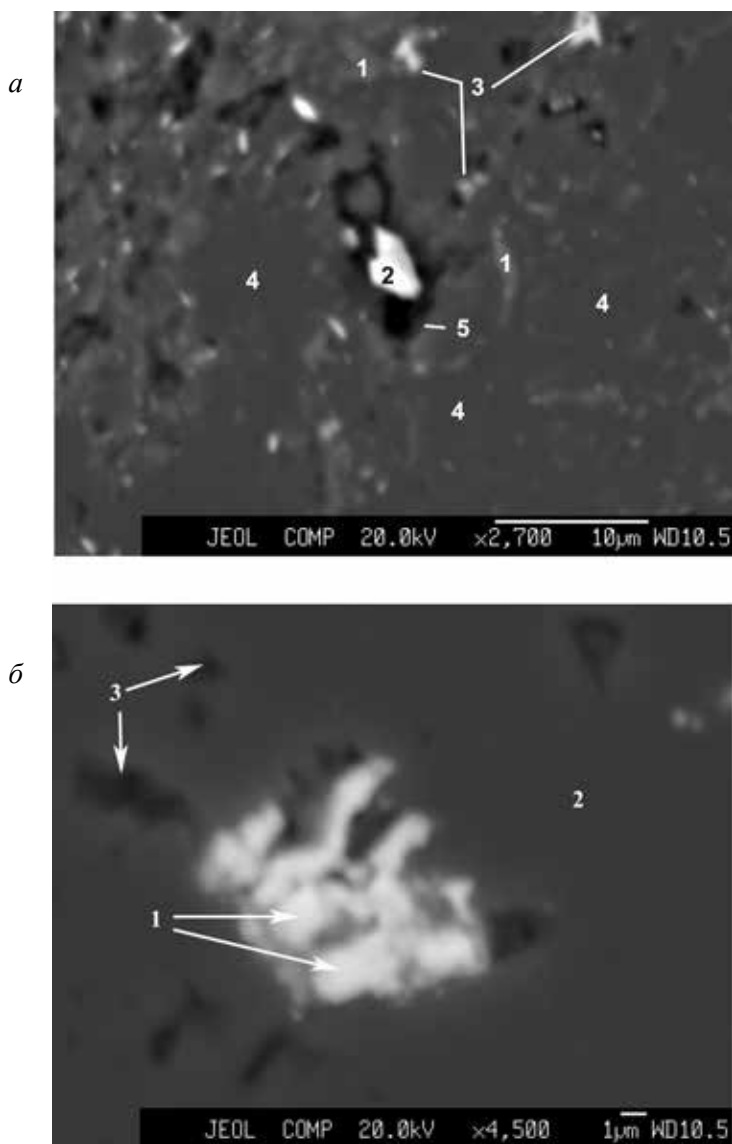


Рис. 5. Полости экзогенного выщелачивания с целестином (а) и уэйкфилдитом (б) в яшмах Широкопаднинской площади. а: 1 – биотит, 2 – целестин, 3 – гематит, 4 – кварц, 5 – каверны; б: 1 – уэйкфилдит, 2 – кварц, 3 – каверны

баритоцелестином, целестином (рис. 5, *a*), пироморфитом, англезитом, плюмбогуммитом-гинсдалитом, стибиконитом или теноритом. Изредка встречаются и другие минералы экзогенного происхождения.

Целестин и баритоцелестин слагают кристаллы и агрегаты из кристаллов в полостях экзогенного выщелачивания (рис. 5, *a*). Баритоцелестин содержит до 6,43 масс.% SrO и незначительную изоморфную примесь кальция. Плюмбогуммит-гинсдалит в виде бесформенных выделений присутствует в полостях экзогенного выщелачивания. Этот минерал представлен очень редкой разновидностью, относящейся к изоморфному ряду  $PbAl_3(PO_4)_2(OH)_6 - PbAl_3(PO_4)(SO_4)(OH)_6$  с практически равными содержаниями плюмбогуммитового и гинсдалитового миналов. Кроме того, в этом минерале в существенном количестве присутствуют крандаллитовый и гоязитовый миналы (вследствие замещения части свинца кальцием и стронцием соответственно), а также незначительная изоморфная примесь Fe и Ce. Коркит в яшмах Широкопаднинской площади относится к редкой разновидности, содержащей до 34 мол.% гинсдалитового и небольшое количество гоязитового миналов.

Ванадат REE встречается в яшмах реже других редкоземельных минералов. Он присутствует в виде мелких бесформенных выделений (рис. 5, *b*) и обычно приурочен к карвернозным участкам, что наводит на мысль об образовании этого минерала в результате частичного переотложения в пустотах ранее выщелоченных при экзогенных процессах V и REE. В проходящем свете этот минерал почти непрозрачен и обладает коричневой окраской. В отраженном свете он характеризуется низкой отражательной способностью и отчетливым плеохроизмом – от бледно-желтого до голубовато-серого, с сильными красными внутренними рефлексами. По результатам изучения химического состава этот ванадат является богатой Ce разновидностью уэйкфилдита – уэйкфилдитом-(Ce). Из других REE в этом минерале рентгеноспектральным микроанализатором фиксируются только Nd и La. Встречается необычная обогащенная P разновидность (табл. 2).

## Обсуждение результатов исследований

Уэйкфилдит – чрезвычайно редкий в природе и слабо изученный минерал. Будучи устойчивым в широком интервале P–T условий – от условий осадконакопления до условий средних ступеней метаморфизма, он является эффективным концентратом REE в окислительных геологических обстановках [28]. В большинстве случаев уэйкфилдит имеет экзогенное или метаморфогенное происхождение. Так, экзогенное происхождение имеет впервые описанный в качестве нового минерала (кусуита) уэйкфилдит-(Ce) из месторождения Кусу, Заир [13], представленный богатой Pb разновидностью. Он был обнаружен в зоне окисления в кремне-известняках вместе с экзогенными ванадинитом, азуритом, брекенбушитом, халькоцитом, хризоколлой, купритом, десклоизитом, диоптазом, гейитом, малахитом, моттрамитом, планчеитом и другими минералами и позднее был переименован в уэйкфилдит-(Ce) [14]. Гипергенное происхождение имеет также уэйкфилдит-(Y), обнаруженный в зонах гипергенеза ванадиеносных углеродисто-кремнисто-глинистых сланцев Западного Каратау вместе с большой группой других экзогенных минералов [1]. Известны находки уэйкфилдита-(Nd), образовавшегося в условиях пренит-пумпеллиитовой фации метаморфизма [23], и уэйкфилдита-(Ce), возникшего в при регрессивном метаморфизме в условиях зеленосланцевой фации [28].

Значительная доля находок уэйкфилдита связана с осадочными в разной степени метаморфизованными обогащенными V марганцевыми, железомарганцевыми и железными рудами, а также с ванадиеносными и ураноносными сланцами, присутствующими, в частности, в составе кремневых и черносланцевых формаций. Примерами являются железомарганцевое месторождение Glucksstern, Gottlob hill, Friedrichroda, Thuringia, Germany [30], железомарганцевое месторождение Arase, Kochi Prefecture, Japan [23], марганцевое

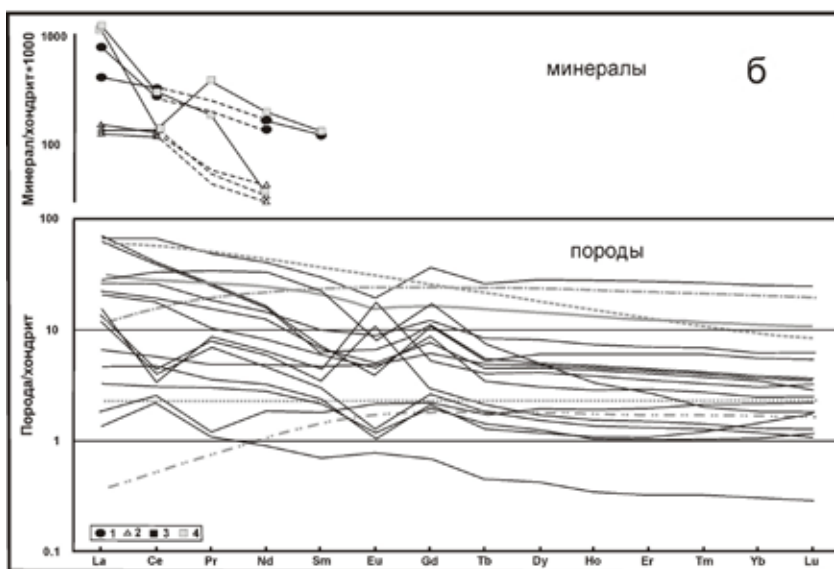
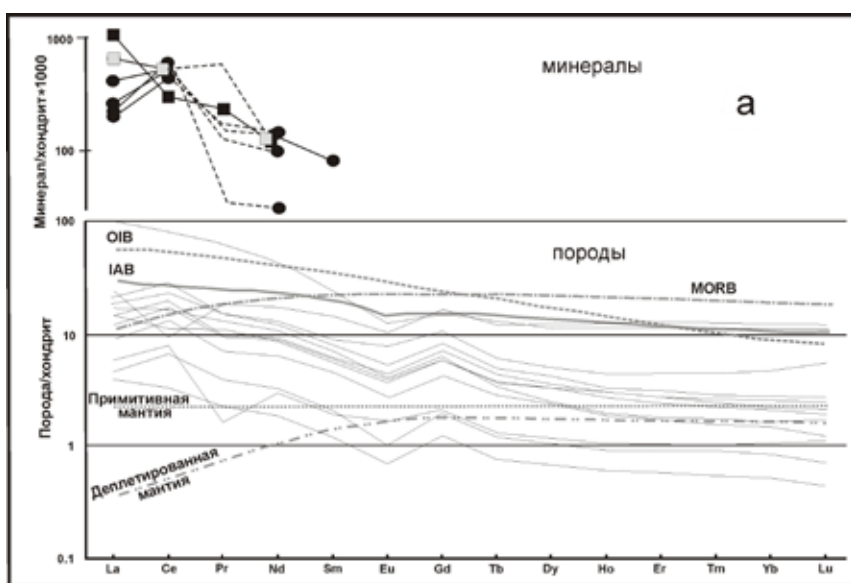


Рис. 6. REE спектры марганцево-силикатных пород и некоторых минералов Горной (а) и Широкопадинской (б) площадей. 1 – монацит, 2 – алланит, 3 – торнебеemit, 4 – бастнезит.

Спектры марганцево-силикатных пород и исходные данные для спектров минералов, кроме бастнезита-(La) (неопубликованные данные), заимствованы из более ранней работы авторов [5].

Здесь и ниже для построения эталонных спектров использованы геохимические данные [26] (для OIB и MORB); [21] (для IAB); [22] и [31] (для примитивной мантии); [24] (для деплетированной мантии). Для нормирования содержаний REE в марганцево-силикатных породах и минералах по хондритам использованы данные Н. Эвенсена [15]

месторождение Pfeld, Harz [16], марганцевое месторождение Praborна (Aosta Valley, Western Italian Alps) [28], ванадиеносные углеродисто-кремнисто-глинистые сланцы Западного Каратау [1] и др. Уэйкфилдит-(Ce) известен также в цеолитсодержащих жилах, присутствующих в порфириновых трахитах, Osoyoos Mining Division, Yellow Lake, British Columbia (Канада) [17], в восстановленных участках песчаников Gamrie Bay, Banffshire,

Шотландия [29], пегматитах Kobokobo, Sud-Kivu (Демократическая республика Конго) [13,14], мраморах площади Tulul Al Hamman [18] (Иордания), диопсид-титанитовых прожилках Arkaroola, Flinders Range, South Australia [11] и в других местах.

По геологической позиции уэйкфилдит из яшм Широкопаднинской площади, тесно ассоциирующих с марганцево-силикатными породами, силикатно-магнетитовыми рудами и углеродистыми кремнистыми и глинисто-кремнистыми породами и содержащих от 2,26 до 101,89 г/т V (табл. 1), наиболее близок к этому минералу из осадочных в разной степени метаморфизованных марганцевых, железомарганцевых и железных руд и углеродистых сланцев кремневых и черносланцевых формаций. Уэйкфилдит-(Ce) в яшмах Широкопаднинской площади встречается вместе с целестином, романешитом, пироморфитом, лимонитом и другими экзогенными минералами, выполняющими полости экзогенного выщелачивания. Он имеет экзогенную природу и образовался в результате переотложения в пустотах V и REE, высвобождавшихся при экзогенном разложении монацита, ксенотима, а также V-содержащих гематита, рутила и ильменита. Богатая фосфором разновидность этого минерала Широкопаднинской площади по присутствию этого элемента (9,97 масс.%  $P_2O_5$ ) обнаруживает сходство с уэйкфилдитом-(Nd) и уэйкфилдитом-(Y) (до 5,7 масс.%  $P_2O_5$  и до 15,34 масс.%  $As_2O_3$ ) из высококремнистых риолитовых туфов Joe Lott, Utah, USA [10], но отличается отсутствием As.

Для REE-спектров яшм триасовой кремневой формации Сихотэ-Алиня характерно обогащение легкими REE относительно тяжелых, наличие европиевого минимума, который обычно связывают с окислительно-восстановительными условиями [12] или с присутствием плагиоклаза в источнике расплавов [25], и гадолиниевого максимума. Последний обусловлен сочетанием европиевого минимума и так называемого «Gd-разрыва» [20] – одного из проявлений тетрадного эффекта. Его наличие в спектрах магматических пород обычно связывают с воздействием на расплав высокотемпературных водных флюидов и гидротермальных растворов [19, 27 и др.]. Для многих спектров яшм характерна Ce-аномалия – положительная или отрицательная, появление которой связывают в основном с процессами осадконакопления в морских условиях [9] или с метасоматическими изменениями пород [8]. REE-спектры яшм аналогичны спектрам тесно ассоциирующих с ними контактово-метаморфизованных металлоносных осадков триасовой кремневой формации Сихотэ-Алиня – марганцево-силикатных пород и силикатно-магнетитовых руд, для которых также характерно обогащение в большей мере легкими REE, чем тяжелыми, наличие европиевого минимума и гадолиниевого максимума. Как и в случае яшм, для некоторых спектров метаморфизованных металлоносных осадков характерна Ce-аномалия – положительная или отрицательная. Эта практически полная идентичность REE-спектров яшм и метаморфизованных металлоносных осадков триасовой кремневой формации Сихотэ-Алиня связана с накоплением их протолитов (осадков) в общем водном бассейне практически в одно и то же время, что подразумевает, очевидно, наличие общего источника редкоземельных элементов. Другим фактором, обусловившим сходство REE-спектров, явилась общая, в силу тесной пространственной ассоциации, последующая геологическая история этих образований, включающая периоды проявления контактового метаморфизма и гипергенеза.

Обогащение легкими REE относительно тяжелых, наличие европиевого минимума и гадолиниевого максимума являются особенностями почти всех REE-спектров триасовых яшм, марганцево-силикатных пород и силикатно-магнетитовых руд Сихотэ-Алиня, что позволяет связать их с особенностями состава протолитов в отношении редкоземельных элементов. Цериевая аномалия, характерная лишь для отдельных спектров всех этих образований, не связана с соотношением содержаний REE в протолитах, а обусловлена, как можно полагать, влиянием последующих метаморфических, метасоматических или экзогенных процессов. Исключение составляют лишь стратифицированные марганцево-силикатные породы триасовой кремневой формации Дальнереченского рудного района (Самаркинский террейн), практически все REE-спектры которых характеризуются

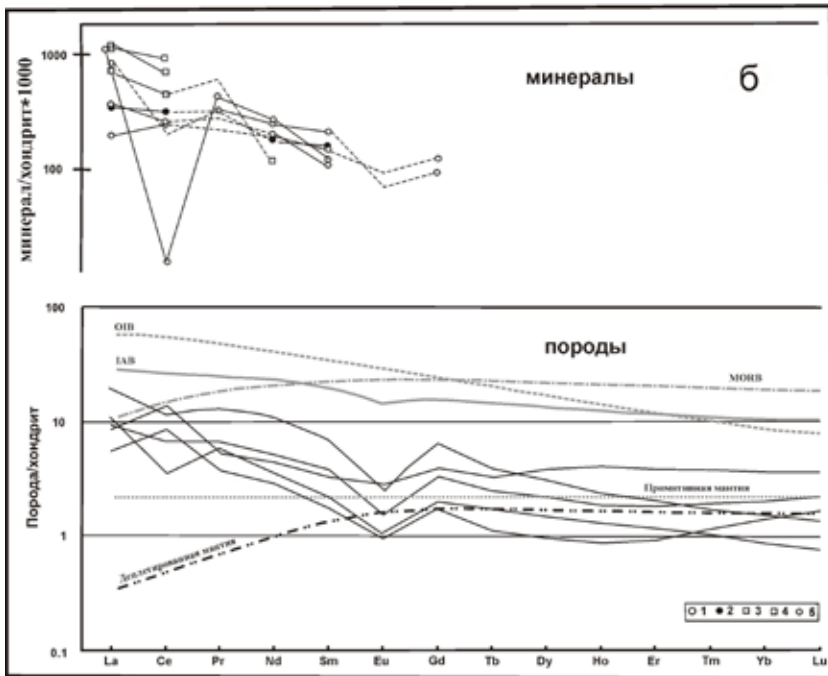
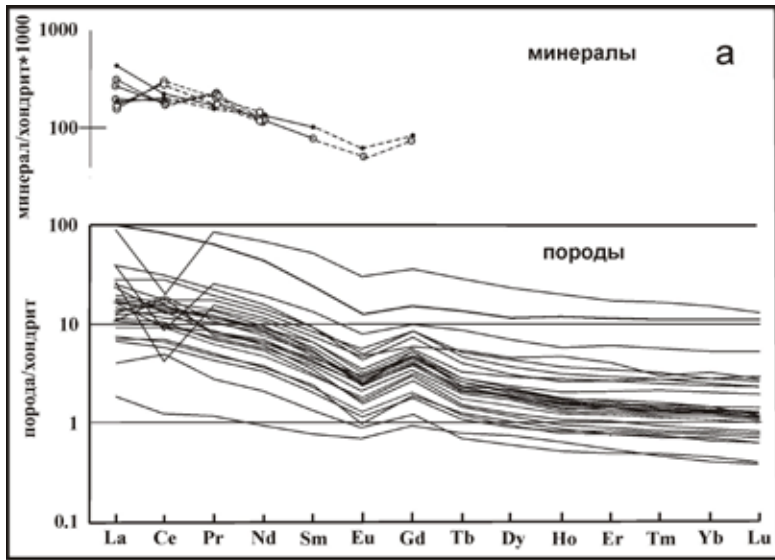


Рис. 7. REE-спектры яшм (а), силикатно-магнетитовых руд (б) и некоторых присутствующих в них минералов (а, б) Широкопаднинской площади. 1 – уэйкфилдит, 2 – монацит, 3 – бастнезит, 4 – гидроксид REE, 5 – рабдофан.

Спектры силикатно-магнетитовых руд и исходные данные для спектров присутствующих в них минералов заимствованы из более ранней работы авторов [7]. Исходные данные для построения спектров яшм и присутствующих в них минералов REE приведены в табл. 1 и 2. Для нормирования содержаний REE в яшмах, силикатно-магнетитовых рудах и минералах по хондритам использованы данные Н. Эвенсена [15]

положительной цериевой аномалией примерно одинаковой амплитуды (рис. 6, *a*). Ее присутствие обусловлено особенностями фациальных условий осадконакопления, определявшимися более близким положением относительно окраины Ханкайского массива [5]. Минералы редкоземельных элементов в этих породах представлены монацитом-(Ce), торнебемитом-(Ce), бастнезитом-(Ce) и гидроксидом-(Ce) [5]. Наличие положительной цериевой аномалии почти во всех спектрах марганцево-силикатных пород Дальнереченского рудного района определяется составом монацита-(Ce), также обладающего положительной цериевой аномалией (рис. 6, *a*). Замещение монацита-(Ce) бастнезитом-(Ce) и гидроксидом-(Ce) в результате экзогенных процессов, судя по форме REE-спектров двух последних минералов (рис. 6, *a*), сопровождалось понижением концентрации Ce относительно концентраций La или, вероятно, La и Pr в марганцево-силикатных породах (из-за большей степени его выноса), вплоть до образования отрицательной цериевой аномалии в их REE-спектрах.

Минералы редкоземельных элементов в марганцево-силикатных породах Широкопаднинской площади представлены монацитом-(Ce), алланитом-(Ce), гидроксидом-(Ce), бастнезитом-(Ce) [5] и бастнезитом-(La) (неопубликованные данные). Форма части REE-спектров марганцево-силикатных пород, характеризующихся отсутствием цериевой аномалии, определялась, вероятно, составами монацита и алланита, для REE-спектров которых подобная аномалия тоже не характерна (рис. 6, *b*). Замещение этих минералов при экзогенных процессах бастнезитом или гидроксидом REE, REE-спектры которых обладают отрицательной цериевой аномалией, как и в предыдущем случае, приводило к появлению отрицательной цериевой аномалии в некоторых REE-спектрах марганцево-силикатных пород Широкопаднинской площади.

Минералы редкоземельных элементов в силикатно-магнетитовых рудах Широкопаднинской площади представлены главным образом монацитом-(Ce), бастнезитом-(Ce), гидроксидом-(Ce) [5], рабдофаном-(Ce) и рабдофаном-(La) (неопубликованные данные). Как и в случае марганцево-силикатных пород этой площади, форма REE-спектров силикатно-магнетитовых руд с незначительной цериевой аномалией или без нее, характерная для наименее измененных экзогенными процессами образцов, определялась составами монацита, для спектров которого подобная аномалия тоже не характерна (рис. 7, *b*). Замещение в результате экзогенных процессов монацита бастнезитом, гидроксидом REE или рабдофаном, REE-спектрам которых свойственна отрицательная цериевая аномалия, приводило, как и в случае марганцево-силикатных пород, к появлению аналогичной аномалии и в некоторых спектрах силикатно-магнетитовых руд (рис. 7).

В случае яшм форма части REE-спектров, не содержащих цериевой аномалии, определялась составом монацита, для спектров которого подобная аномалия тоже не характерна (рис. 7, *a*). Замещение монацита бастнезитом или рабдофаном в результате экзогенных процессов приводило, как и во всех рассмотренных выше случаях, к появлению в REE-спектрах этих пород отрицательной цериевой аномалии (рис. 7, *a*). REE-спектрам уэйкфилдита-(Ce), обладающим, в отличие от REE-спектров бастнезита, рабдофана и гидроксида, REE положительной цериевой аномалией, соответствуют REE-спектры яшм с такой же аномалией (рис. 7, *a*). В связи с этим, а также с учетом приуроченности этого минерала к кавернозным участкам, можно предположить, что появление положительной цериевой аномалии в некоторых спектрах триасовых яшм, марганцево-силикатных пород и силикатно-магнетитовых руд обусловлено перетолжением в благоприятных условиях вынесенных при замещении монацита и алланита редкоземельных элементов в виде минералов с положительной цериевой аномалией в REE-спектрах, таких как уэйкфилдит-(Ce) и, вероятно, некоторые другие.

## Заключение

Уэйкфилдит, чрезвычайно редкий в природе ванадат, обнаружен в яшмах триасовой кремневой формации Сихотэ-Алиня (на Широкопаднинской площади Ольгинского рудного района) вместе с другими минералами REE и V, такими как монацит-(Ce), ксенотим-(Y), рабдофан-(Ce), рабдофан-(Y), тенгерит-(Y), бастнезит-(Ce), V-содержащие гематит, рутил, титаномагнетит и ильменит. Согласно оптическим свойствам и составу этот минерал представляет собой уэйкфилдит-(Ce), иногда представленный обогащенной фосфором разновидностью.

По геологической позиции уэйкфилдит из яшм Широкопаднинской площади, тесно ассоциирующих с марганцево-силикатными породами, силикатно-магнетитовыми рудами и углеродистыми кремнистыми и глинисто-кремнистыми породами, наиболее близок к этому минералу из осадочных в разной степени метаморфизованных марганцевых, железомарганцевых и железных руд и углеродистых сланцев кремневых и черносланцевых формаций. Уэйкфилдит-(Ce) в яшмах Широкопаднинской площади встречается вместе с гетитом, лимонитом, вернадитом, романешитом, баритоцелестином, целестином, пироморфитом, англезитом, плюмбогуммитом-гинсдалитом, стибииконитом, теноритом и другими минералами экзогенного происхождения, выполняющими полости выщелачивания. Он имеет экзогенную природу и образовался в результате переотложения в пустотах V и REE, высвобождавшихся при экзогенном разложении монацита, ксенотима, а также V-содержащих гематита, рутила, титаномагнетита и ильменита.

Появление отрицательной цериевой аномалии в яшмах, марганцево-силикатных породах и силикатно-магнетитовых рудах триасовой кремневой формации Сихотэ-Алиня связано главным образом с преимущественным выносом Ce при экзогенных и, в некоторых случаях, возможно, гидротермальных процессах замещения монацита и алланиита рабдофаном, бастнезитом и гидроксидом REE. Появление положительной цериевой аномалии в марганцево-силикатных породах, силикатно-магнетитовых рудах и яшмах Широкопаднинской площади Таухинского террейна обусловлено переотложением вынесенных при замещении монацита и алланиита редкоземельных элементов с цериевой аномалией в REE-спектрах в виде уэйкфилдита-(Ce) и, возможно, некоторых других минералов REE.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Бекенова Г.К., Алыбаев Ж.А., Левин В.Л., Бошкаева Л.Т., Джуманкулова С.К. Микро- и наноразмерные минералы ванаденисных углеродисто-кремнистых сланцев Северо-Западного Каратау // Изв. Нац. акад. наук Респ. Казахстан. Серия геологии и техн. наук. 2016. № 3. С. 40–54.
2. Волохин Ю.Г., Михайлик Е.В., Бурый Г.И. Триасовая кремневая формация Сихотэ-Алиня. Владивосток: Дальнаука, 2003. 252 с.
3. Геодинамика, магматизм и металлогения Востока России / под ред. А.И. Ханчука. Владивосток: Дальнаука, 2006. Кн. 1. 572 с.
4. Казаченко В.Т., Сапин В.И. Минералогия и генезис железомарганцевого оруденения Прибрежной зоны Приморья. Владивосток: ДВО АН СССР, 1990. 248 с.
5. Казаченко В.Т., Перевозникова Е.В. Особенности процессов накопления и метаморфизма триасовых металллоносных осадков в Таухинском и Самаркинском террейнах Сихотэ-Алиня (по результатам изучения геохимии и минералогии Th, U и REE // Вестн. ВГУ. Серия: Геология. 2018. № 2. С. 72–83.
6. Казаченко В.Т. Петрология и минералогия гидротермальных марганцевых пород Востока России. Владивосток: Дальнаука, 2002. 250 с.
7. Казаченко В.Т., Перевозникова Е.В. Au-Ag-Pd-Pt минерализация в осадочных породах, ассоциированных с триасовыми углеродистыми силикатами Сихотэ-Алиня // Литосфера. 2018. Т. 6. С. 892–913.
8. Перетяжко И.С., Савина Е.А. Тетрад-эффекты в спектрах распределения редкоземельных элементов гранитоидных пород как индикатор процессов фторидно-силикатной жидкостной несмесимости в магматических системах // Петрология. 2010. Т. 18, № 5. С. 536–566.
9. Скублов С.Г. Геохимия редкоземельных элементов в породообразующих метаморфических минералах. СПб.: Наука, 2005. 147 с.

10. Bagiński B., Macdonald R., Belkin H.E., Kotowski J., Jokubauskas P., Marciniak-Maliszewska B. The occurrence of wakefieldite, a rare earth element vanadate, in the rhyolitic Joe Lott Tuff, Utah, USA // *Mineralogical Magazine*. 2020. Vol. 84, N 1. P. 109–116.
11. Bakker R.J., Elburg M.A. A magmatic-hydrothermal transition in Arkaroola (northern Flinders Ranges, South Australia): from diopside-titanite pegmatites to hematite-quartz growth // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 2006. N 152. P. 541–569.
12. Bau M. Rare-earth element mobility during hydrothermal and metamorphic fluid-rock interaction and the significance of the oxidation state of europium // *Chem. Geol.* 1991. Vol. 93. P. 219–230.
13. Deliens M., Piret P. La kusuïte (Ce<sup>3+</sup>, Pb<sup>2+</sup>, Pb<sup>4+</sup>)VO<sub>4</sub>, nouveau mineral // *Bulletin de la Société Française de Minéralogie et de Cristallographie*. 1977. N 100. P. 39–41.
14. Deliens M., Piret P. La kusuïte devient la wakefieldite-(Ce) plombifère // *Bulletin de Minéralogie*. 1986. N 109. P. 305–305.
15. Evensen N.M., Hamilton P.J., O’Nions R.K. Rare earth abundances in chondritic meteorites // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1978. Vol. 42. P. 1199–1212.
16. Gröbner J., Kolitsch U., Wesiger J. New finds of vanadate and rare-earth minerals from the manganese mine Ilfeld, Harz // *Mineral-Welt*. 2011. Vol. 22. N 1. P. 41–49. (In German).
17. Howard D.G., Tschernich R.W., Klein G.L. Occurrence of wakefieldite-(Ce) with zeolites at Yellow Lake, British Columbia, Canada // *Neues Jahrbuch für Mineralogie Monatshefte*. 1995. N 3. P. 127–132.
18. Khoury H.N., Sokol E.V., Clark I.D. Calcium uranium oxide minerals from central Jordan: assemblages, chemistry, and alteration products // *The Canadian Mineralogist*. 2015. N 53. P. 61–82.
19. Lee S.G., Masuda A., Kim H.S. An early Proterozoic leuco-granitic gneiss with the REE tetrad phenomenon // *Chem. Geol.* 1994. Vol. 114. P. 59–67.
20. Lottermoser B.G. Rare earth elements and hydrothermal ore formation processes // *Ore Geol. Rev.* 1992. Vol. 7. P. 25–41.
21. McCulloch M.T., Gamble J.A. Geochemical and geodynamic constraints on subduction zone magmatism // *Earth Planet. Sci. Lett.* 1991. Vol. 102. P. 358–374.
22. McDonough W.F., Sun S., Ringwood A.E., Jagoutz E., Hofmann A.W. K, Rb and Cs in the earth and moon and the evolution of the earth’s mantle // *Geochem. Cosmochim. Acta*. 1992. N 56. P. 1001–1012.
23. Moriyama T., Miyawaki R., Yokoyama K., Matsubara S., Hirano H., Murakami H., Watanabe Y. Wakefieldite-(Nd), a new neodymium vanadate mineral in the Arase stratiform ferromanganese deposit, Kochi Prefecture, Japan // *Resource Geology*. 2010. N 61. P. 101–110.
24. Palme H., O’Neill H.St.C. Cosmochemical estimates of mantle composition / In *Mantle and Core // Treatise on Geochemistry*. 2003. Vol. 2. P. 1–38.
25. Rollinson H. *Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation*. New York, 1993. 345 p.
26. Sun S.S., McDonough W.F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes // *Geological Society Special Publication*, London. 1989. Vol. 42. P. 313–345.
27. Tang H.F., Liu C.Q. Trace element geochemistry during metamorphic dehydration: A case study from the Xingzi Group of Lushan, southeast China // *Geochem. J.* 2002. Vol. 36. P. 545–561.
28. Tumiati S., Merlini M., Godard G., Hanfland M. Orthovanadate wakefieldite-(Ce) in symplectites replacing vanadium-bearing omphacite in the ultra-oxidized manganese deposit of Praborna (Aosta Valley, Western Italian Alps) // *American Mineralogist*. 2020. N 105. P. 1242–1253.
29. Van Panhuys-Sigler M., Trewin N.H., Still J. Roscoelite associated with reduction spots in Devonian red beds, Gamrie Bay, Banffshire // *Scot. J. Geol.* 2018. N 32. P. 127–132.
30. Witzke T., Kolitsch U., Warnsloh J.M., Göske J. Wakefieldite-(La), LaVO<sub>4</sub>, a new mineral species from the Glücksstern Mine, Friedrichroda, Thuringia, Germany // *Eur. J. Mineralogy*. 2008. N 20. P. 1135–1139.
31. Wood D.A., Joron J.L., Treuil M., Norry M., Tarney J. Elemental and Sr isotope variations in basalt from Iceland and surrounding ocean floor // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1979. Vol. 70. P. 319–339.