

Электронная версия доступна на сайте
[www.fmm.ru/Новые данные о минералах](http://www.fmm.ru/Новые_данные_о_минералах)
 Минералогический музей
 имени А.Е. Ферсмана РАН

Новые данные о минералах, том 52, вып. 3 (2018), 78–85

Ванадийсодержащий дравит из Восточного Узбекистана

Гореликова Н.В.¹, Портнов А.М.², Таскаев В.И.¹, Рассулов В.А.³,
 Чижова И.А.¹, Каримова О.В.¹, Балашов Ф.В.¹, Боева Н.М.¹

¹Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН (ИГЕМ РАН), Москва, ngor@igem.ru

²Российский государственный геологоразведочный университет имени С.Орджоникидзе (МГГРУ), Москва, a.m.portnov@mail.ru

³Всероссийский институт минерального сырья им. Н.М. Федоровского (ВИМС), Москва, rassulov@mail.ru

Аннотация

Ванадиевый травяно-зеленый дравит обнаружен в маломощных (до 10 см) кварцевых жилах, пересекающих черные кремнистые сланцы позднего протерозоя, обогащенные ураном и ванадием (до 50 ppm). Содержание V_2O_5 – до 5.34% при низком содержании железа и повышенном магния. По всей вероятности, ванадий занимает в структуре минерала в основном Z-позицию. Получены спектры диффузного отражения в диапазоне 350–2500 нм и люминесценции при возбуждении УФ-излучением N-лазера. Появление ванадия в качестве хромофора и люминофора в метаморфических породах интерпретируется как индикатор древних океанических структур на континентах.

Ключевые слова: ванадиевый дравит, изовалентный изоморфизм, фотолюминесценция, UV-Vis-NIR-спектроскопия, диффузное отражение, черные сланцы, протерозой, индикатор океанических структур, Ауминзатау.

Введение

Ванадийсодержащий дравит относится к надгруппе турмалина (Hawthorne, 1993) и описан в ряде публикаций. Ванадийсодержащие разновидности дравита относительно широко распространены. С.Т. Бадаловым (1951) он обнаружен в кварцитах и в альбандах кварцевых жил Темир-Кабука в Узбекистане, Е.В. Румянцевой (1984) в черносланцевых толщах Карелии, В.Т. Казаченко с соавторами (1993) в метаморфических карбонатных породах Приморья, О.В. Русиновой с соавторами (2008) в золотоносных жилах среди катаклазированных линз углеродистого вещества в пределах Тянь-Шанской складчатой системы. Наиболее детально особенности химического состава и структурные особенности высокованадиевых представителей семейства дравита изучены Л.З. Резницким с соавторами (2001) и Ф. Бози с соавторами (Bosi et al., 2013a, b; 2014) – из кварцевых жил среди осадочно-метаморфических пород Слюдянки (Россия). Некоторые V-дравиты ассоциируют с V-мусковитами и V-Cr-

дравитами. Ф. Бози с соавторами (Bosi et al., 2013a, b; 2014) установили здесь самостоятельные минералы: окси-дравит, окси-ванадиевый дравит и окси-хромовый дравит, которые являются крайними членами семейства V-дравитов, образованных в результате изовалентного изоморфизма надгруппы турмалина в X- и Z-позициях по схеме $V^{3+} \rightarrow Al^{3+}$ и $V^{3+} \rightarrow Cr^{3+}$. Кристаллическая структура и эволюция химического состава ванадийсодержащего окси-дравита из графитизированных кварцитов исследованы в статье (Семпрек et al., 2013). Нами в кварцевых жилах в Ауминзатау (Юго-Восточный Узбекистан) был встречен ванадийсодержащий турмалин с содержанием V_2O_5 до 5.34 вес.%. Краткое описание находки предлагается ниже.

Методы исследования

При изучении турмалина использовались следующие методы: оптическая микроскопия (Olympus

ВХ-51), рентгеноспектральный микроанализ (прибор JXA-8200 фирмы JEOL с волновыми спектрометрами, условия съемки: ускоряющее напряжение 20 кВ, ток зонда 20 нА, диаметр зонда 1 мкм; в качестве стандартов использовались природные минералы: санидин (SiKα AlKα KКα), оливин (FeKα), форстерит (MgKα), спессартин (MnKα), анортит (CaKα), альбит (NaKα), хромит (CrKα), F-флогопит (FKα), ильменит (TiKα), Cl-апатит, (ClKα), касситерит (SnLα), металлический V (VKα). Бор определялся расчетным способом, рентгеновская дифрактометрия (дифрактометр Rigaku 2200, Cu-излучение, в диапазоне углов 2θ: 3–100°), синхронный термический анализ (NETZSCH STA 449 F3 Jupiter®), люминесцентный анализ, ИК-спектроскопия; корреляционный и R-факторный анализы.

Для измерения спектров диффузного отражения использован портативный спектрометр TerraSpec 4 Hi-Res (ASD Inc. PANAlytical NIR Center, США), работающий в спектральном диапазоне от 350 до 2500 нм. Спектральное разрешение в диапазоне от 350 до 700 нм составляет 3 нм и в диапазоне от 700 до 2500 нм – 6 нм. Диаметр поверхности, для которой измеряется спектр отражения, около 12 мм. Время анализа одного образца около 2 сек, подготовка к измерению – около минуты.

Для калибровки прибора использован эталон из спектралона, аттестованный в Labsphere, Inc. США.

Исследования фотолюминесценции проведены на компьютеризованном комплексе с использованием микроспектрофотометра (МСФУ-312, НПО «ЛОМО» (Россия); N₂-лазера с длиной волны излучения 337,1 нм (3,67 эВ) (АГИ-505, НПО «Плазма», Россия) и системы регистрации в стандарте КАМАК (ФГУП ЭЗАН, Россия) (Рассулов, 2005).

Исследования проведены при комнатной температуре образца. В соответствии с методикой (Рассулов, 2005) кристалл освещают ультрафиолетовым излучением лазера и регистрируют спектры возбуждаемой фотолюминесценции в оптическом диапазоне электромагнитного излучения. Сначала записывают спектр в интегральном по времени режиме в диапазоне 390–850 нм с шагом в 2 нм, а затем, не изменяя положения образца, с временной задержкой 180 мкс после импульса лазера. При времени задержки 180 мкс после импульса лазера регистрируются только полосы с большим временем затухания, что позволяет более точно определять их интенсивности и надежнее идентифицировать центр люминесценции.

Описание турмалина

А.М. Портновым в 1985 г. в черных углистых кварц-серицитовых сланцах верхнего протерозоя (Юго-Восточный Узбекистан), слагавших невысокие горы Ауминзатау в пустыне Кызыл-Кум, были найдены кварцевые прожилки с яркими зелеными игольчатыми кристаллами (рис. 1). Предварительно минерал был диагностирован как принадлежащий

к группе турмалина, что впоследствии было подтверждено инструментальными методами анализа. Рентгеноспектральный микрозондовый анализ в сочетании с методами оптического спектрального анализа показали, что хромофором в зеленом турмалине является ванадий, содержание которого достигает 5.34 мас.% (V₂O₅) и, возможно, хром, концентрации которого составляют 0.2–0.6 мас.% (Cr₂O₃).



Рис. 1. Ванадийсодержащий дравит в кварце из протерозойских черных сланцев Юго-Восточного Узбекистана. Размер образца 4 x 5 см.

Результаты наших исследований показали, что встреченный минерал является ванадийсодержащим дравитом. Кремнистые сланцы протерозоя действительно отличаются от вышележащих черных кварц-серицитовых сланцев бесапанской свиты нижнего палеозоя повышенным содержанием в углистом веществе V и U до 50 ppm. По (Анкинович и др., 1979), содержание V в отдельных прослоях углисто-кремнистых сланцев достигает 0.5–1.5%. По мнению автора, «источником V явилась вода океанического бассейна того времени».

Присутствие ванадийсодержащего дравита в Узбекистане свидетельствует о широком развитии структур верхнепротерозойского океана в Средней Азии. Протерозойские черные сланцы наряду с ванадием отличаются от сходных черных палеозойских сланцев высоким отношением K/Rb = 800, что указывает на их отложение в океане в условиях геохимического влияния базальтов, богатых титаном и ванадием (Портнов и др. 1990, 1992). Вышележащие черные сланцы раннего палеозоя бесапанской свиты содержат до 3–4% K и Na и отличаются более низким K/Rb = 250, что характеризует их как отложения внутриконтинентальных бассейнов. Черносланцевые толщи подвержены интенсивному воздействию герцинского гранитоидного магматизма, проявляющегося в виде выходов пермокарбонатов гранитоидов. Кварцевые жилы мощностью до 10 см и зоны окварцевания мощностью 0.5 см распространены повсеместно в пределах бесапанской свиты*.

*Немаловажным механизмом возникновения таких жил в углеводородо-кремнистых сланцах могут служить процессы гидроразрыва пластов в результате ретроградного метаморфизма и как следствие – появление системы кварцевых жил, по генетической сути являющихся альпийскими жилами и носящими региональный характер (прим. редакции).

Травяно-зеленый турмалин наблюдается в виде оторочек в зальбандах жил, на контакте с вмещающими черными сланцами в высыпках углистых сланцев среди лессов на площади около 5 кв. м. Дравит образует агрегаты зеленых игольчатых кристаллов в тонком сростании с белым кварцем, ориентированных перпендикулярно или под небольшим углом к зальбандам прожижиков.

При микроскопическом изучении ванадийсодержащего дравита из Ауминзатау в проходящем свете хорошо виден тонкопризматический, игольчатый характер кристаллов ванадийсодержащего дравита, окрашенных в травяно-зеленый цвет с ярко выраженным плеохроизмом в буро-зеленых тонах; в скрепленных николях наблюдаются характерные для турмалина яркие окраски высоких порядков (рис. 2–4).

Химический состав дравита

Химический состав ванадийсодержащего дравита изучен методами аналитической растровой электронной микроскопии на приборе JXA-8200, JEOL. В кристаллах дравита отмечается тонкая осцилляторная и пятнистая зональность, обусловленная вариациями содержания таких элементов, как Al, V, Ti, Ca, Mg, Mn, Fe. Ширина зон варьирует от 1 до 5–7 мкм (рис. 5, 7).

Для выявления характера изоморфизма в структуре изученного турмалина проведен корреляционный и R-факторный анализы дравита и выявлены положительные и отрицательные корреляционные связи между основными компонентами, входящими в структуру минерала. Наиболее сильная отрицательная корреляционная связь установлена для пар $Al_2O_3 - V_2O_3$ (рис. 6), $Al_2O_3 - CaO$ и $Al_2O_3 - TiO_2$. Наличие отрицательной корреляционной связи $Al_2O_3 - V_2O_3$ свидетельствует о возможном замещении ванадием алюминия в позиции Z, хотя V может занимать и Y-позицию при высоком содержании его в дравите, как это показано Ф. Бози и др. в (Bosi et al., 2013a, b; 2014). Следует отметить, что мы не выявили отрицательных корреляционных связей V с Mg в изученном нами дравите, что, видимо, может указывать на незначительную вероятность вхождения V^{3+} в одну с Mg позицию при невысоком содержании ванадия в дравите (при значительных содержаниях ванадия в дравите он может перераспределяться по двум октаэдрическим позициям, что потребовало бы его структурного уточнения).

Для выявления корреляции между Al, V, Cr и Mg в минерале получен профиль в одном из зональных

кристаллов V-содержащего дравита (рис. 7), который подтверждает наличие обратной корреляционной зависимости между Al и V (рис. 8). Кроме того, в дравите наблюдается отрицательная корреляционная связь V и Cr.

Термическое поведение турмалина при нагревании изучено методом синхронного термического анализа (СТА). Записывались кривые дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) и термогравиметрии (ТГ) на приборе NETZSCH STA 449 F3 Jupiter®. Данные СТА согласуются с результатами микрозондового анализа (табл. 1). По ТГ кривым содержание в образце H_2O^+ составляет 2,63%, адсорбционной H_2O^- – 0,31% (рис. 10).



Рис. 2. Кристаллы дравита. Проходящий свет, при одном николе. Размер поля 5,7 x 4,3 мм.

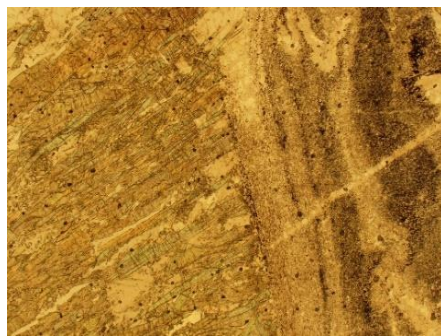


Рис. 3. Контакт кварц-турмалиновой жилы с кварц-серцитовым роговиком с органикой. Проходящий свет, при одном николе. Размер поля 5,7 x 4,28 мм.

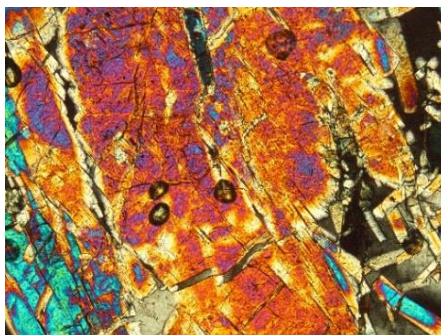


Рис. 4. Кристаллы ванадийсодержащего дравита. Николи X. Размер поля 5,7 x 4,3 мм.

Таблица 1. Химический состав зонального ванадийсодержащего драгита (мас. %)

SiO ₂	37.15	37.18	37.77	37.51	37.41	37.71	37.37	37.40	37.55	38.10	38.16
B ₂ O ₃	10.74	10.86	10.94	10.88	10.81	10.98	10.80	10.87	10.87	11.01	11.00
Al ₂ O ₃	30.56	30.74	32.43	31.27	30.26	31.83	31.49	31.69	32.15	33.13	33.37
V ₂ O ₃	3.55	4.27	3.65	3.68	5.34	3.92	4.17	4.40	3.29	1.94	1.80
MgO	10.94	11.12	10.36	10.94	10.51	10.81	10.15	10.25	10.39	10.86	10.62
TiO ₂	0.38	0.33	0.08	0.28	0.28	0.24	0.26	0.25	0.31	0.12	0.15
FeO	0.04	0.03	0.01	0.00	0.01	0.04	0.03	0.02	0.00	0.04	0.02
MnO	0.03	0.03	0.00	0.02	0.00	0.04	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00
Na ₂ O	1.88	1.84	1.66	1.94	2.00	2.02	1.97	1.96	1.90	1.91	1.93
K ₂ O	0.03	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.02	0.01	0.01
CaO	1.54	1.55	0.53	1.34	1.15	0.99	1.14	1.14	1.23	0.62	0.73
SnO ₂	0.01	0.04	0.01	0.02	0.00	0.00	0.05	0.00	0.03	0.00	0.04
F	0.22	0.42	0.00	0.10	0.19	0.12	0.09	0.13	0.18	0.00	0.06
H ₂ O	2.63	2.63	2.63	2.63	2.63	2.63	2.63	2.63	2.63	2.63	2.63
-O=2F	0.09	0.18	0.00	0.04	0.08	0.05	0.04	0.06	0.08	0.00	0.03
Сумма	99.61	100.89	100.08	100.58	100.52	101.30	100.14	100.72	100.45	100.37	100.49
	Количество атомов в формуле (арфу)										
Si	6.013	5.949	5.999	5.994	6.018	5.971	6.013	5.983	6.003	6.015	6.030
B	2.972	3.000	3.000	3.000	2.972	3.000	2.968	3.000	2.970	2.986	2.980
Al	5.830	5.797	6.071	5.889	5.737	5.940	5.972	5.975	6.058	6.164	6.215
V	0.461	0.548	0.465	0.471	0.689	0.498	0.538	0.564	0.422	0.246	0.228
Mg	2.640	2.653	2.453	2.606	2.521	2.552	2.435	2.444	2.476	2.556	2.502
Ti	0.046	0.040	0.010	0.034	0.034	0.029	0.031	0.030	0.037	0.014	0.018
Fe	0.005	0.004	0.001	0.000	0.001	0.005	0.004	0.003	0.000	0.005	0.003
Mn	0.004	0.004	0.000	0.003	0.000	0.005	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000
Na	0.590	0.571	0.511	0.601	0.624	0.620	0.615	0.608	0.589	0.585	0.591
K	0.006	0.004	0.002	0.004	0.004	0.004	0.004	0.006	0.004	0.002	0.002
Ca	0.267	0.266	0.090	0.229	0.198	0.168	0.197	0.195	0.211	0.105	0.124
Sn	0.001	0.005	0.001	0.002	0.000	0.000	0.006	0.000	0.004	0.000	0.005
F	0.113	0.213	0.000	0.051	0.097	0.060	0.046	0.066	0.066	0.000	0.030
OH	2.839	2.807	2.786	2.803	2.822	2.778	2.823	2.806	2.805	2.770	2.772
Vac	0.137	0.159	0.397	0.165	0.174	0.208	0.185	0.191	0.196	0.308	0.283

Примечание. H₂O определена методом синхронного термического анализа (СТА). Количество ионов рассчитано на основании 15 катионов, В определялся расчетным методом.

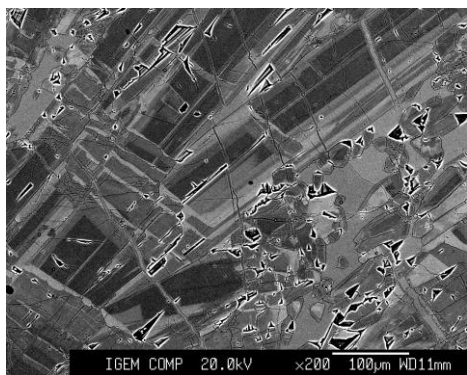


Рис. 5. V-содержащий дравит с осцилляционной зональностью, изображение в режиме обратно-отраженных электронов.

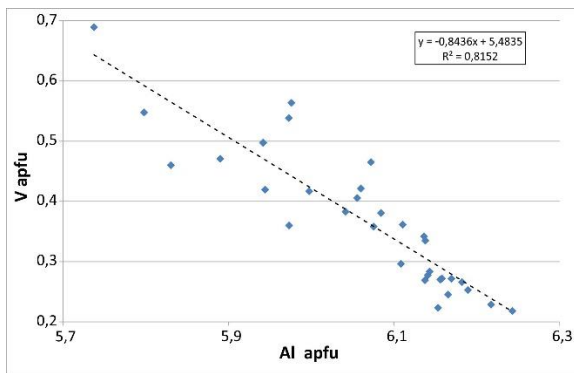


Рис. 6. График зависимости ванадия и алюминия по данным рентгеноспектрального микроанализа.



Рис. 7. Фрагмент зонального кристалла V-содержащего дравита; показан профиль АБ (длина 140 микрон), вариации по которому приведены на рис. 8, изображение в режиме обратно-отраженных электронов.

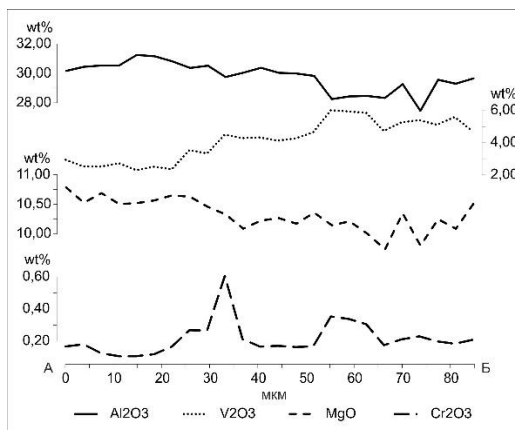


Рис. 8. Распределение алюминия, ванадия, магния и хрома по профилю АБ (рис. 7) в зональном кристалле V-содержащего дравита.

Согласно последним структурным и номенклатурным работам, посвященным надгруппе турмалина (Hawthorne et al., 1999, 2001; Ottolini et al., 1999; Bosi et al., 2013a, b, 2014; и мн. др.) общая формула минералов надгруппы следующая: $XY_3Z_6[TeO_{18}][BO_3]_3V_3W$, где X = Na, Ca, K, Vac (вакансия); Y = Li, Mg, Fe²⁺, Mn²⁺, Ni, Al, Cr³⁺, V³⁺, Fe³⁺, (Ti⁴⁺); Z = Mg Al Fe³⁺ V³⁺ Cr³⁺; T = Si Al (B); B = B, Vac; V = OH, O; W = OH, F, O.

В соответствии с этим и данными микрозондового анализа усредненную формулу изученного ванадийсодержащего дравита можно записать как: $(Na_{0,591}Ca_{0,186}K_{0,004}\square_{0,218})(Mg_{2,531}Fe_{0,003}Mn_{0,002}Al_{0,435}Ti_{0,029})_3(Al_{5,534}V_{0,466})_6(Si_{5,999}O_{18})(BO_3)_3[(OH)_{2,801}O_{0,797}F_{0,067}]^*$

* Согласно современной номенклатуре надгруппы турмалина полученный состав может быть отнесен к окси-дравиту. Точная диагностика его, однако, требует структурной расшифровки минерала (прим. ред.).

Физические свойства. Рентгеновские данные

Исследование минерала методом рентгеновской порошковой дифрактометрии показало, что его

рентгенограмма идентична эталонному образцу ванадиевого дравита (Powder Diffraction File, № 86-1572) (табл. 2).

Цвет окрашенных ванадием минералов (Платонов, 1976) связан со сложными октаэдрическими анионными комплексами, образующимися в результате ассоциации с катионными вакансиями и структурными неоднородностями, возникающими в процессе кристаллизации и последующего термического воздействия. В спектрах поглощения окрашенных ванадием минералов (ванадиевый изумруд, гидденит и др.) в видимой области наблюдаются две широкие полосы поглощения в интервале 410–430 нм и 620–660 нм, характерные для большинства октаэдрических комплексов V³⁺. В спектрах диффузного отражения изученного образца ванадийсодержащего дравита (рис. 10), кроме указанных полос, наблюдаются интенсивные полосы поглощения, связанные с двухвалентным железом ($\lambda_{\max} \approx 1100$ нм), гидроксидом ($\lambda_{\max} \approx 1428$ нм), водой в каналах структуры ($\lambda_{\max} \approx 1970$ нм) и катионными группировками AlOH ($\lambda_{\max} \approx 2208$ нм), FeOH ($\lambda_{\max} \approx 2245$ нм) и MgOH ($\lambda_{\max} \approx 2353$ нм),

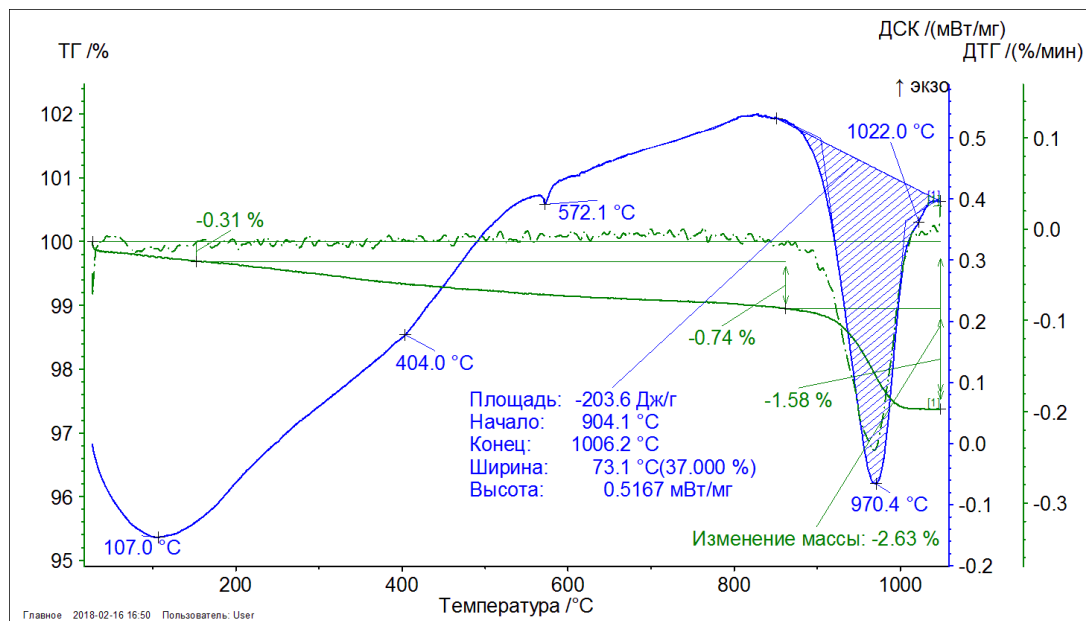


Рис. 9. Термограмма V-содержащего турмалина (СТА).

являющимися идентификационными для турмалина. Спектры измерены на порошке при комнатной температуре образца.

Известна большая группа кислородсодержащих минералов сложного состава, чья люминесценция не связана с примесями (Тарашан, 1978). К представителям этой группы относятся вольфраматы, молибдаты, хроматы и ванадаты, люминесценцию которых связывают с тетраэдрическими комплексами переходных элементов W, Mo, Cr и V. Данные центры обладают широкими полосами возбуждения и люминесценции. Относительная интенсивность полос люминесценции значительно варьируется для разных зерен одного минерала, при этом наибольшей интенсивностью обладают образцы, не содержащие примесей, способных замещать катион в группе MO₄. Для этих центров характерен большой стоксов сдвиг между полосой возбуждения и люминесценцией, а также значительное превышение их для полос, характерных для активаторных центров. Связь электронных переходов с колебаниями решетки влияет не только на ширину полос люминесценции, но и на зависимость интенсивности от температуры. Так, люминесценция шеелита и повеллита наблюдается при комнатной температуре, а интенсивность свечения хроматов и ванадатов резко возрастает при охлаждении.

На рисунке 11 представлен спектр люминесценции ванадийсодержащего дравита. В спектре без задержки регистрации после импульса лазера отмечается полоса, характерная для многих кислородсодержащих минералов и связанная с кислородными возбуждениями (Тарашан, 1978).

Таблица 2. Данные рентгеновской порошковой дифракции

Дравит (г. Ауминзатау, Юго-Восточный Узбекистан)			Дравит ванадиевый (PDF № 861572)	
d _{obs} (Å)	I _{obs} %	h k l	d _{calc} (Å)	I _{calc} %
6.374	18	1 0 1	6.344	33
4.978	10	0 2 1	4.962	23
4.596	18	3 0 0	4.590	23
3.976	100	2 2 0	3.975	71
3.477	44	0 1 2	3.469	51
2.963	51	1 2 2	2.955	70
2.892	8	3 2 1	2.895	9
2.627	3	3 1 2	2.618	7
2.574	90	0 5 1	2.575	100
2.443	23	2 4 1	2.451	9
2.038	31	1 5 2	2.040	39
1.915	21	3 4 2	1.918	26
1.815	23	6 1 2	1.815	14
1.639	15	2 7 1	1.642	9
1.591	23	5 5 0	1.594	12
1.507	15	8 2 0	1.506	7
1.453	13	7 1 3	1.453	9
1.412	5	4 3 4	1.409	11
1.354	8	10 0 1	1.356	6
1.328	10	7 0 4	1.328	6
1.308	10	2 3 5	1.308	2
1.277	10	9 3 0	1.277	4
1.180	8	11 1 1	1.181	2

Примечание. Аналитик к.г.-м.н. О.В. Каримова. ИГЕМ РАН.

Широкая полоса с максимумом около 712 нм связана с V³⁺, и от полос люминесценции Fe³⁺ и Cr³⁺, расположенных в этой же области спектра, ее отличает малое время затухания. Так, через 180 мкс по-

сле импульса лазера (на спектре обозначен Z) интенсивности полос Fe^{3+} и Cr^{3+} , связанные с запрещенными переходами и в результате этого имеющей значительную длительность послесвечения (Гарашан, 1978), не проявлены.

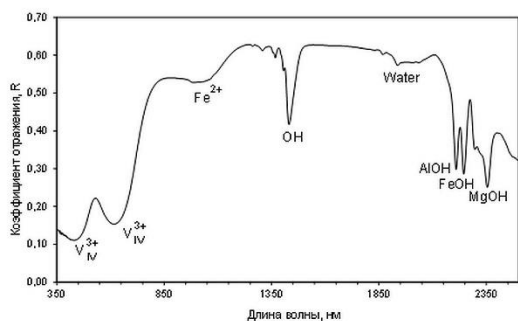


Рис. 10. Спектр диффузного отражения ванадиевого турмалина.

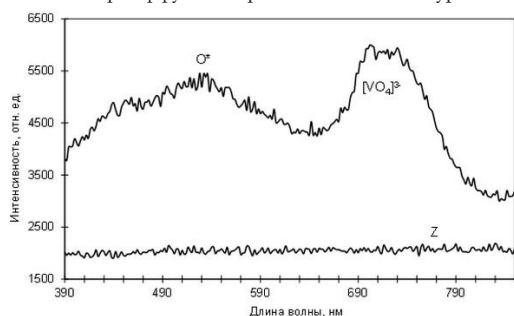


Рис. 11. Спектр люминесценции ванадиевого турмалина.

Обсуждение и выводы

Изученный ванадийсодержащий турмалин дравит можно отнести к семейству ванадиевых дравитов с очень низким содержанием железа, титана, марганца (Резницкий и др., 2001). Для кристаллов изученного дравита характерна тонкая осцилляторная и пятнистая зональность. Проявление осцилляторной зональности в минералах возможно при диффузионном подтоке материала к растущим граням и при достаточно высоких скоростях роста, т.е. в обстановке, когда вблизи растущих кристаллов образуются кристаллизационные дворики в растущих кристаллах (Аполонов, 1999). Ритмичная зональность возникает в отсутствие конвективного перемешивания питающей среды. Ширина кристаллизационного дворика зависит от частоты ритмов кристаллизации.

Результаты проведенного корреляционного анализа ванадийсодержащего дравита и наличие сильной отрицательной корреляции V_2O_3 и Al_2O_3 свидетельствуют об изовалентном изоморфизме в структуре минерала по схеме: $V^{+3} \rightarrow Al^{+3}$ и о структурном

положении ванадия, занимающем предпочтительно октаэдрическую Z-позицию в изученном дравите, в отличие от ванадодравита из Слюдянки с высоким содержанием ванадия, в котором ванадий располагается как в Z-позиции, так и Y-позиции (Bosi et al., 2013).

Рассмотренный материал показывает, что ванадийсодержащий дравит Восточного Узбекистана типоморфен для метаморфизованных и гранитизированных протерозойских черных сланцев, сформированных в условиях океанического базальтоидного магматизма, где источником ванадия являются титановые магматические минералы базальтов – ильменит и титаномагнетит; ванадий также накопился в древней органике, был преобразован в патронит VS_4 в углистых сланцах позднего протерозоя и снова был активизирован борсодержащими флюидами герцинских гранитов. При гальмиролизе (подводном выветривании базальтов) $^{60}V^{3+}$ (0.640 Å) накапливается в черных глинистых илах, послуживших основой для формирования метаморфизованных черносланцевых толщ докембрия и раннего палеозоя Узбекистана. Ванадий замещает $^{60}Al^{3+}$ (0.535 Å) и является «региональным» хромофором минералов черносланцевых толщ, в частности, как V-содержащих турмалинов Узбекистана, так и окрашенных ванадием изумрудов Колумбии (Clements, 1941). Появление ванадия в качестве хромофора и люминофора в метаморфических толщах можно интерпретировать так, что V является индикатором древних океанических структур на континентах.

В связи с этими процессами нельзя не вспомнить слова А.Е. Ферсмана: «Минералы являются только временными продуктами химических реакций Земли» (Ферсман, 1977).

* Немаловажным концентратором ванадия в океанических осадках могут быть организмы, в которых он накапливался еще при их жизни (например, ванабин у асцидий) (трим. ред.).

Благодарности

Авторы выражают искреннюю благодарность сотруднику Минералогического музея им. А.Е. Ферсмана РАН кандидату геолого-минералогических наук В.Ю. Карпенко за тщательный просмотр работы и ценные замечания, которые значительно улучшили статью, а также доктору Фуату Явузу из Стамбульского технического университета за любезно предоставленную программу для расчета формулы турмалина.

Источник финансирования

Работа выполнена в рамках госзадания по теме 0136-2018-0025.

Список литературы:

- Анкинович С.Г., Анкинович Е.А., Альжанов Т.М., Калинин С.К. (1979) Металлоносность углеродисто-кремнистой ванадиеносной формации Южного Казахстана // Сб. Металлогения и рудообразование. Алма-Ата: Наука. С. 132–141.
- Аполлонов В.Н. (1999) Механизм и условия роста ритмично построенных кристаллов // Геохимия. Т. 364. С. 94–96.
- Бадалов С.Т. (1951) Новая разновидность турмалина // Зап. Узбекстанского отделения Всесоюзного Минералогического общества. В. 2. С. 84–89.
- Платонов А.Н. (1976) Природа окраски минералов. Киев: Наукова думка. 264 с.
- Портнов А., Федоткин А.Ф., Мозилевский В.Е. (1990) Закономерности размещения оруденения в черносланцевых толщах Центральных Кызыл-Кумов // Известия ВУЗов. №9. С. 67–75.
- Портнов А.М. (1992) Золото черных сланцев // Природа. № 3. С. 33–39.
- Рассулов В.А. (2005) Локальная лазерная с учетом кинетики затухания люминесцентная спектроскопия минералов (на примере циркона) / Методические рекомендации № 156. М.: ВИМС. С. 4–7.
- Резницкий Л.З., Скляр Е., Ушаковская З.В., Нартова Н.И., Кацаев А.А., Карманов Н.С., Канакин С.В., Смолин А.С., Некрасова Е.А. (2001) Ванадиодравит, $\text{NaMg}_3\text{V}_6[\text{Si}_6\text{O}_{18}][\text{BO}_3]_3(\text{OH})_4$ - новый минерал турмалиновой группы // Записки ВМО. 130. С. 59–72.
- Румянцева Е.В. (1983) Хромдравит – новый минерал из Карелии // Зап. Всесоюз. Минералогического общества. Ч. СХП. Вып. 2. N 112. С. 222–226.
- Русинова О.В., Кряжев С.Г., Кряжев В.С., Щегольков Ю.В. (2008) «Чуждые» элементы в золоторудных полях Средней Азии // Материалы научной конф. Москва: ИГЕМ РАН. С. 334–337.
- Таращан А.Н. (1978) Люминесценция минералов. Киев: Наукова думка. 296 с.
- Ферсман А.Е. (1977) Очерки по минералогии и геохимии. М.: Наука. 192 с.
- Bosi F., L.Z. Reznitskii, and E.V. Sklyarov. (2013a) Oxyvanadium-dravite, $\text{NaV}_3(\text{V}_4\text{Mg}_2)(\text{Si}_6\text{O}_{18})(\text{BO}_3)_3(\text{OH})_3\text{O}$: Crystal structure and redefinition of the “vanadium-dravite” tourmaline // American Mineralogist. V. 98. P. 501–505.
- Bosi F., Skogby H., Reznitskii L., and Hälenius U. (2013b) Vanadio-oxy-dravite, IMA 2012-074 // CNMNC Newsletter No. 15. February, page 8; Mineralogical Magazine. 77. 112. 1286.
- Bosi F., Reznitskii L., Skogby H., & Hälenius U. (2014) Vanadio-oxy-chromium-dravite, $\text{NaV}_3(\text{Cr}_4\text{Mg}_2)(\text{Si}_6\text{O}_{18})(\text{BO}_3)_3(\text{OH})_3\text{O}$, a new mineral species of the tourmaline supergroup // American Mineralogist. 99 (5–6). 1155–1162.
- Cempírek Jan, Stanislav Houzar, Milan Novák, Lee a. Groat1, Julie B. Selway. (2013) Crystal structure and compositional evolution of vanadium-rich oxy-dravite from graphite quartzite at Bitoványky, Czech Republic // Journal of Geosciences. V. 58, P. 149–162.
- Clements T. (1941) The Emerald Mines of Muzo, Colombia, South America // Gems and Gemmology. V. III. N 9. P. 130–138.
- Darrell J., Henry D.J., Novák M., Hawthorne F.C., Ert A., Dutrow B.L., Uher P., Pezzotta F. (2011) Nomenclature of the tourmaline-super group minerals // American Mineralogist. 96. 895–913.
- Hawthorne F. and Henry D. (1999) Classification of the minerals of the tourmaline group // European Journal of Mineralogy. 11. 201–215.
- Kazachenko V.T., Butsik L.A., Sapin V.I., Kitaev I.V., Barinov N.N., Namov G.A. (1993) Vanadian-chromian tourmaline and vanadian muscovite in contact-metamorphosed carbonaceous rocks, Primorye, Russia // Canadian Mineralogist. V. 31. P. 347–356.
- Ottolini L., and F.C. Hawthorne (1999) An investigation of SIMS matrix effects on H, Li and Bionization in tourmaline // Eur. J. Mineral. V. 11. P. 679–690.