

02

## Люминесцентные и термохромные свойства комплексов галогенидов теллура(IV) с рубидием $Rb_2TeHal_6$ (Hal = Cl, Br, I)

© Т.В. Седакова, А.Г. Мирочник<sup>✉</sup>Институт химии Дальневосточного отделения РАН,  
690022 Владивосток, Россия<sup>✉</sup> e-mail: mirochnik@ich.dvo.ru

Поступила в редакцию 20.01.2020 г.

В окончательной редакции 20.01.2020 г.

Принята к публикации 23.06.2020 г.

Изучены спектрально-люминесцентные свойства комплексных соединений состава  $Rb_2TeHal_6$  (Hal = Cl, Br, I). Выявлена зависимость интенсивности люминесценции от геометрического строения координационного полиэдра теллура(IV) типа анионной подрешетки и положения А-полосы в спектрах. При островной октаэдрической координации иона Te(IV) максимальной интенсивностью люминесценции при 77 и 300 К обладает  $Rb_2TeCl_6$ . У  $Rb_2TeCl_6$  и  $Cs_2TeBr_6$  обнаружен обратимый термохромизм, обусловленный температурной зависимостью ян-теллеровского расщепления А-полосы в спектрах поглощения (отражения) иона теллура(IV).

**Ключевые слова:** теллур(IV), комплексы, люминесценция, термохромизм.

DOI: 10.21883/OS.2020.10.50014.8-20

Интенсивно люминесцирующие соединения  $s^2$ -ионов перспективны для получения функциональных оптических материалов [1–7]. Соединения  $s^2$ -ионов ( $Te^{4+}$ ,  $Sb^{3+}$ ,  $Bi^{3+}$  и др.) являются эффективными катодо- и рентгенолюминофорами, а также используются как допанты при производстве люминесцентных ламп [1,4,8–10].

В настоящее время проводятся интенсивные исследования по разработке эффективных полупроводниковых фотоэлектрических модулей на основе галогенидных гибридных органических и неорганических комплексов Ti(IV), Hf(IV), Zr(IV), Pd(IV), Pb(II), Sn(IV), Te(IV), Sb(III) и Bi(III) [11–15]. К подобному классу соединений относятся комплексные соединения теллура(IV) состава  $A_2TeHal_6$  (где А — органический или неорганический катион, Hal = Cl, Br, I).

Следует отметить, что число работ, посвященных люминесцентным свойствам соединений Te(IV), ограничено [3,16–21]. В работах [2,22] показано, что люминесценция комплексных соединений теллура(IV) определяется не чисто электронными  $p \rightarrow s$ -переходами иона Te(IV), важный вклад в люминесцентные процессы вносят атомные  $p$ -орбитали галогенид-ионов. В работах [3,23–30] обнаружены обратимые термохромные свойства комплексных соединений  $s^2$ -ионов ( $Se^{4+}$ ,  $Te^{4+}$ ,  $Sb^{3+}$ ).

Анализ литературных данных показал, что в отличие от галогенидных комплексных соединений сурьмы(III) и висмута(III), для которых обнаружено большое многообразие типов анионных подрешеток [31], для большинства галогенидных соединений теллура(IV) характерно, как правило, островное октаэдрическое строение анионной подрешетки с минимальными искажениями координационного полиэдра иона теллура(IV) [3,24–30,32–34].

Настоящая работа является продолжением наших исследований взаимосвязи строения, спектрально-люминесцентных и термохромных свойств галогенидных комплексов теллура(IV) [3,22,24–26,28,29,35,36]. На примере комплексных гексагалотеллуридов(IV) рубидия состава  $Rb_2TeHal_6$  (Hal = Cl, Br, I) изучена взаимосвязь геометрического строения, спектрально-люминесцентных и термохромных свойств.

### Экспериментальная часть

Исследуемые комплексы теллура(IV) состава  $Rb_2TeHal_6$  (Hal = Cl, Br, I) синтезированы при взаимодействии свежеприготовленных растворов  $TeO_2$  и оксида рубидия  $Rb_2O$  в среде соответствующей концентрированной кислоты  $HHal$  (Hal = Cl, Br, I) при нагревании. Полученные реакционные смеси упаривали на водяной бане, оставляли кристаллизоваться при комнатной температуре. Выпавшие кристаллы состава  $Rb_2TeHal_6$  (Hal = Cl, Br, I) отфильтровывали и сушили на воздухе до постоянного веса.

Элементный анализ полученных соединений на содержание Cl, Br, I проводился согласно [37,38]. Анализ полученных соединений Te(IV) на содержание Rb проводился на атомно-абсорбционном спектрометре Shimadzu 7000. Спектры возбуждения люминесценции и люминесценции при 77 и 300 К регистрировали на спектрофлуориметре RF-5301 Shimadzu. Спектры диффузного отражения измерены при 100 и 300 К на приборе Hitachi U3010, в качестве стандарта использован  $MgO$ , коэффициент отражения которого принимался за 100%.

## Результаты и обсуждение

В таблице представлены результаты исследования спектрально-люминесцентных характеристик комплексных соединений теллура(IV) с рубидием. Для йодидного комплекса  $\text{Rb}_2\text{TeI}_6$  характерно отсутствие люминесценции при 77 и 300 К. Установлено, что максимальной интенсивностью люминесценции при 77 и 300 К обладает  $\text{Rb}_2\text{TeCl}_6$  (таблица). Следует отметить, что при 77 К относительная интенсивность люминесценции хлоридного комплекса в два раза выше по сравнению с бромидным. Спектры люминесценции исследуемых комплексов  $\text{Rb}_2\text{TeHal}_6$  ( $\text{Hal} = \text{Cl}, \text{Br}$ ) представляют собой широкую полосу, соответствующую  $^3P_1 \rightarrow ^1S_0$ -переходу иона теллура(IV) (А-полоса) (рис. 1, 2) [17–22]. При этом положение максимума в спектре люминесценции не зависит от длины волны возбуждающего света в спектральном диапазоне  $^3P_1 \rightarrow ^1S_0$ -перехода иона теллура(IV) (А-полоса).

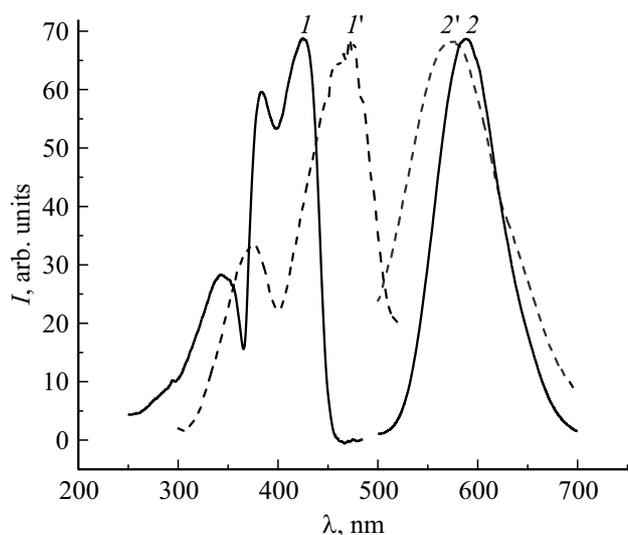
## Интенсивность люминесценции соединений теллура(IV)

На интенсивность люминесценции комплексных соединений  $s^2$ -ионов влияют следующие факторы [3,26,27]:

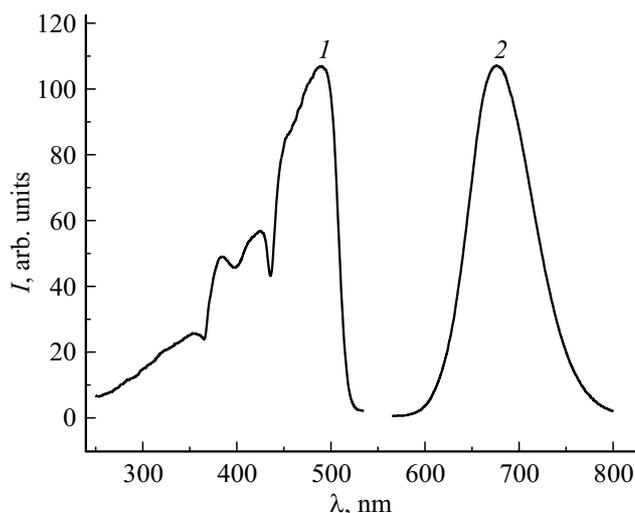
1) геометрическое строение соединений: тип анионной подрешетки, строение координационного полиэдра  $s^2$ -иона;

2) положение А-полосы в спектрах поглощения (отражения), возбуждения люминесценции и люминесценции  $s^2$ -иона.

Рассмотрим каждый фактор более детально.



**Рис. 1.** Спектры возбуждения люминесценции ( $I$ ,  $\lambda_{\text{lum}} = 590 \text{ nm}$ , 77 К), ( $I'$ ,  $\lambda_{\text{lum}} = 570 \text{ nm}$ , 300 К) и люминесценции ( $2$ ,  $\lambda_{\text{ex}} = 425 \text{ nm}$ , 77 К), ( $2'$ ,  $\lambda_{\text{ex}} = 475 \text{ nm}$ , 300 К) комплекса  $\text{Rb}_2\text{TeCl}_6$ .



**Рис. 2.** Спектры возбуждения люминесценции ( $I$ ,  $\lambda_{\text{lum}} = 675 \text{ nm}$ ) и люминесценции ( $2$ ,  $\lambda_{\text{ex}} = 490 \text{ nm}$ ) комплекса  $\text{Rb}_2\text{TeBr}_6$  при 77 К.

## Геометрическое строение соединений теллура(IV)

Известно, что на искажение координационного полиэдра  $s^2$ -иона влияет расположение неподеленной электронной пары (НЭП) [31,39,40]. При фотовозбуждении  $s^2$ -ион переходит из основного в возбужденное состояние, характеризующееся более высокой симметрией [17–20,23]. Логично предположить, что чем меньше искажено окружение  $s^2$ -иона в основном состоянии, тем меньше энергии электронного возбуждения будет тратиться на реорганизацию структуры при переходе в возбужденное состояние (минимальные безызлучательные потери энергии электронного возбуждения обуславливают высокую интенсивность люминесценции).

Данные рентгеновского спектрального анализа (РСА) показывают, что анионная подрешетка в исследуемых соединениях  $\text{Rb}_2\text{TeHal}_6$  ( $\text{Hal} = \text{Cl}, \text{Br}, \text{I}$ ) построена из изолированных октаэдров [41–43], что, вероятно, исключает диссипацию энергии электронного возбуждения по анионной подрешетке. Величины всех валентных углов  $\text{Hal}-\text{Te}-\text{Hal}$  ( $\text{Hal} = \text{Cl}, \text{Br}, \text{I}$ ) соответствуют идеальному значению  $90^\circ$  [41–43] (таблица). Координационный полиэдр теллура(IV) в исследуемых комплексах  $\text{Rb}_2\text{TeCl}_6$ ,  $\text{Rb}_2\text{TeBr}_6$  представляет собой идеальный октаэдр: с одним кристаллографически независимым типом связей  $\text{Te}-\text{Hal}$  ( $\Delta R = 0 \text{ \AA}$ ) (таблица) [41,42]. В то же время для йодидного комплекса характерно наличие двух кристаллографически независимых типов связей  $\text{Te}-\text{I}$  ( $\Delta R = 0.002 \text{ \AA}$ ) [43]. Согласно [31,39,40], равенство длин связей  $\text{Te}-\text{Hal}$  и углов  $\text{Hal}-\text{Te}-\text{Hal}$  ( $\text{Hal} = \text{Cl}, \text{Br}$ ) указывает на стереохимическую инертность неподеленной электронной пары (НЭП)  $\text{Te}(\text{IV})$ . Таким образом, наличие даже минимального искажения координационного полиэдра  $\text{Te}(\text{IV})$  в йодидном комплексе может

Структурные и спектральные характеристики комплексов  $\text{Rb}_2\text{TeHal}_6$  при 77 и 300 К

| Соединение                 | $R^*$ , Å         | $\Delta R^{**}$ , Å | $\Delta\angle^{***}$ , deg | Край поглощения, nm |       | $\lambda_{\text{ex}}$ , nm |       | Стоксов сдвиг, $\text{cm}^{-1}$ |       | $\lambda_{\text{lum}}$ , nm |       | $I$ , rel. units |       |
|----------------------------|-------------------|---------------------|----------------------------|---------------------|-------|----------------------------|-------|---------------------------------|-------|-----------------------------|-------|------------------|-------|
|                            |                   |                     |                            | 77 К                | 300 К | 77 К                       | 300 К | 77 К                            | 300 К | 77 К                        | 300 К | 77 К             | 300 К |
| $\text{Rb}_2\text{TeCl}_6$ | 2.458 [41]        | 0 [41]              | 0 [41]                     | 480                 | 520   | 425                        | 475   | 6580                            | 3509  | 590                         | 570   | 25               | 1     |
| $\text{Rb}_2\text{TeBr}_6$ | 2.689 [42]        | 0 [42]              | 0 [42]                     | 540                 | 620   | 490                        | —     | 5593                            | —     | 675                         | —     | 12               | —     |
| $\text{Rb}_2\text{TeI}_6$  | 2.931, 2.929 [43] | 0.002 [43]          | 0 [43]                     | 750                 | 850   | —                          | —     | —                               | —     | —                           | —     | —                | —     |

Примечание.  $R^*$  — длина связи  $\text{Te}-\text{Hal}$ ;  $\Delta R^{**}$  — разность между самой длинной и самой короткой связями  $\text{Te}-\text{Hal}$ ;  $\Delta\angle^{***}$  — максимальное отклонение углов от соответствующих идеальных значений.

являться одним из факторов, приводящим к тушению люминесценции даже при 77 К.

В ряду комплексов  $\text{Rb}_2\text{TeCl}_6$ ,  $\text{Rb}_2\text{TeBr}_6$ ,  $\text{Rb}_2\text{TeI}_6$ , характеризующихся практически идеальным строением координационного полиэдра и отсутствием диссипации энергии электронного возбуждения по анионной подрешетке, при уменьшении электроотрицательности галогенид-иона растет длина связей  $\text{Te}-\text{Hal}$ , увеличивается размер координационного полиэдра  $\text{TeHal}_6^{2-}$  (таблица). Увеличение пространства, доступного иону  $\text{Te(IV)}$ , способствует, как следует из анализа конфигурационно-координатной диаграммы, большему по величине смещению  $s^2$ -иона в возбужденном состоянии, уширению полос люминесценции и сильной релаксации энергии электронного возбуждения [10,44,45]. Этими факторами можно объяснить уменьшение интенсивности люминесценции при 77 К в ряду исследуемых комплексов  $\text{Rb}_2\text{TeCl}_6$ ,  $\text{Rb}_2\text{TeBr}_6$ ,  $\text{Rb}_2\text{TeI}_6$ , максимальную интенсивность люминесценции хлоридного комплекса и отсутствие люминесценции в йодидном комплексе (таблица).

### Положение А-полосы в спектрах поглощения (отражения), возбуждения люминесценции и люминесценции теллура(IV)

Еще одним фактором, определяющим интенсивность люминесценции, является положение А-полосы в спектрах люминесценции, возбуждения люминесценции и поглощения (отражения) иона теллура(IV) [26,27]. Анализ спектров диффузного отражения при 300 К показал значительное bathochromное смещение нижнего края поглощения при переходе от  $\text{Rb}_2\text{TeCl}_6$  к  $\text{Rb}_2\text{TeBr}_6$  и  $\text{Rb}_2\text{TeI}_6$  (100 и 230 nm соответственно, рис. 3).

Как известно, положение максимумов полос в спектрах поглощения и люминесценции, а также интенсивность люминесценции  $s^2$ -ионов зависят от свойств и строения его окружения [46]. Уменьшение электроотрицательности окружающих  $s^2$ -ион лигандов приводит к смещению полос в спектрах поглощения (отражения) и возбуждения в область низких энергий в результате эффекта ковалентности [45]. Увеличение ковалентности связей между  $s^2$ -ионом и лигандами приводит к увеличению взаимодействия  $s^2$ -иона с лигандами и увели-

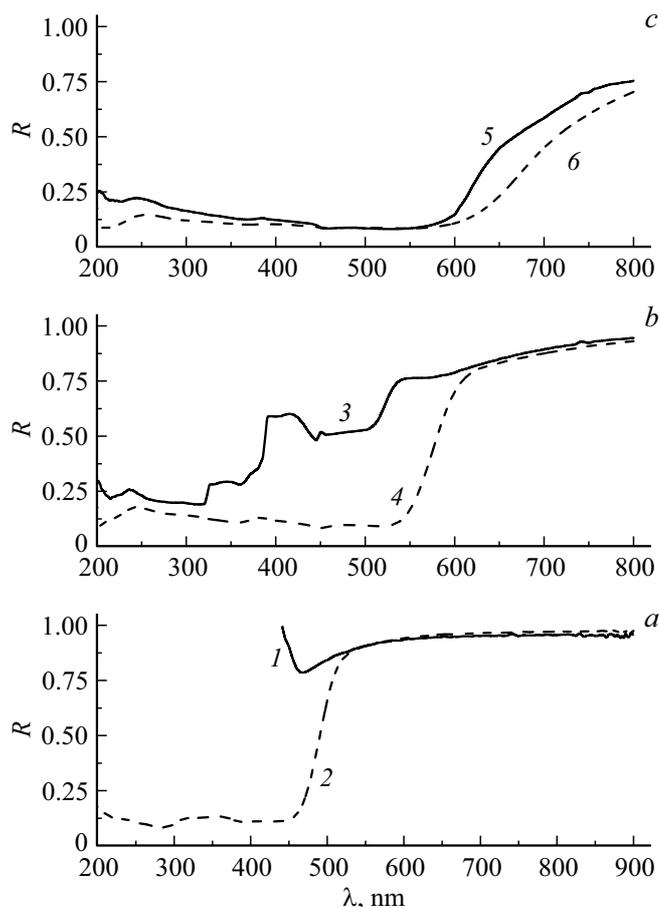


Рис. 3. Спектры отражения комплексов  $\text{Rb}_2\text{TeHal}_6$  при 77 и 300 К: а —  $\text{Rb}_2\text{TeCl}_6$  при 77 (1) и 300 К (2); б —  $\text{Rb}_2\text{TeBr}_6$  при 77 (3) и 300 К (4); в —  $\text{Rb}_2\text{TeCl}_6$  при 77 (5) и 300 К (6).

чению доли безызлучательных переходов и, как следствие, уменьшению квантового выхода люминесценции  $s^2$ -иона [46,47].

В случае комплексов  $\text{Rb}_2\text{TeCl}_6$ ,  $\text{Rb}_2\text{TeBr}_6$  и  $\text{Rb}_2\text{TeI}_6$  существенный bathochromный сдвиг в спектрах отражения А-полосы теллура(IV) (рис. 3) способствует пересечению возбужденного  $^3P_1$ - с основным  $^1S_0$ -уровнем, увеличению релаксации энергии электронного возбуждения, что обуславливает отсутствие люминесценции

в соединениях  $\text{Rb}_2\text{TeBr}_6$  и  $\text{Rb}_2\text{TeI}_6$  при 300 К. В то же время при понижении температуры наблюдается заметный гипсохромный сдвиг  $A$ -полосы в хлоридном ( $\sim 40$  nm) и бромидном ( $\sim 80$  nm) комплексах (рис. 3), что способствует появлению люминесценции в бромидном комплексе и разгоранию эмиссии в 25 раз в хлоридном комплексе (таблица). В отличие от этих комплексов понижение температуры от 300 до 77 К практически не влияет на спектр отражения йодидного комплекса и положение края поглощения: для данного комплекса люминесценция полностью отсутствует при 300 и 77 К. В спектре отражения  $\text{Rb}_2\text{TeCl}_6$  при 77 К не приведен спектральный диапазон 200–450 nm из-за наличия интенсивной люминесценции, искажающей спектр.

Положение спектральной  $A$ -полосы также можно определить из спектров возбуждения люминесценции при 77 и 300 К (рис. 1, 2). Согласно [48], длинноволновая полоса в спектрах возбуждения люминесценции комплексов  $\text{Rb}_2\text{TeHal}_6$  ( $\text{Hal} = \text{Cl}, \text{Br}$ ) соответствует  $^3P_1 \rightarrow ^1S_0$ -переходу иона теллура(IV) в спектре поглощения ( $A$ -полоса) и представляет собой дублет, обусловленный динамическим эффектом Яна–Теллера. Соответственно коротковолновые полосы в спектрах возбуждения комплексов соответствуют  $^3P_2 \rightarrow ^1S_0$ -переходу иона теллура(IV) ( $B$ -полоса) [48]. Анализ экспериментальных данных показал (рис. 1, 2, таблица), что при переходе от хлоридного к бромидному комплексу при 77 К наблюдается bathochromный сдвиг  $A$ -полосы ( $\sim 85$  nm) (аналогично спектрам диффузного отражения, рис. 3).

Помимо спектров диффузного отражения и возбуждения люминесценции положение  $A$ -полосы можно определить из спектров люминесценции (рис. 1, 2, таблица). Повышение энергии люминесцентного перехода при переходе от бромидного к хлоридному комплексу (гипсохромный сдвиг полосы люминесценции на 85 nm), вероятно, объясняет двукратный рост интенсивности люминесценции у  $\text{Rb}_2\text{TeCl}_6$  при 77 К.

Следует отметить, что увеличение энергии люминесцентного перехода не всегда приводит к росту интенсивности люминесценции в исследуемых комплексах теллура(IV). Действительно, несмотря на гипсохромный сдвиг  $A$ -полосы в хлоридном комплексе  $\text{Rb}_2\text{TeCl}_6$  (около 20 nm), при повышении температуры от 77 до 300 К интенсивность люминесценции уменьшается в 25 раз (таблица). При повышении температуры наблюдается существенное (в 1.5 раза) уширение полосы люминесценции (рис. 1), свидетельствующее об увеличении электронно-колебательного взаимодействия  $^3P_1$ -уровня  $\text{Te(IV)}$  с фононами решетки [22]. Таким образом, резкое усиление электронно-колебательного взаимодействия люминесцентного  $^3P_1$ -уровня обуславливает заметное температурное тушение люминесценции (таблица).

## Стоксов сдвиг

Величина стокова сдвига рассчитана как разность энергий между максимумами длинноволновой компоненты  $A$ -полосы возбуждения и люминесценции (таблица). Небольшой стоков сдвиг при 77 К в комплексах соединений теллура(IV)  $\text{Rb}_2\text{TeCl}_6$  и  $\text{Rb}_2\text{TeBr}_6$  обусловлен стереохимической инертностью НЭП теллура(IV) [22,30,32,49] и незначительным смещением  $s^2$ -иона из положения равновесия при возбуждении [27,30,32,49]. Действительно, данные РСА показывают, что координационный полиэдр атома теллура(IV) в исследуемых комплексах  $\text{Rb}_2\text{TeHal}_6$  ( $\text{Hal} = \text{Cl}, \text{Br}$ ) представляет собой идеальный октаэдр (таблица). Для люминесцирующего при 300 К  $\text{Rb}_2\text{TeCl}_6$  также характерно небольшое значение стокова сдвига ( $3510 \text{ cm}^{-1}$ ) (таблица).

В соответствии с теоремой Яна–Теллера для нелинейных симметричных конфигураций имеется запрет на наличие единственного минимума на потенциальной поверхности возбужденного уровня [50]. В результате появляется второй минимум, расположенный энергетически существенно ниже первого и приводящий к заметному стоковому сдвигу в спектрах соединений  $s^2$ -ионов. Как видно из анализа экспериментальных данных, для хлоридного комплекса  $\text{Rb}_2\text{TeCl}_6$  характерно почти двукратное уменьшение стокова сдвига при 300 К (таблица).

## Термохромные свойства комплексных соединений теллура(IV)

При октаэдрической координации  $s^2$ -иона профиль поверхности потенциальной энергии возбужденного  $^3P_1$ -уровня зависит от соотношения между эффектом Яна–Теллера и спин-орбитальным взаимодействием [51,52]. Если преобладает влияние эффекта Яна–Теллера, то при фотовозбуждении оптические электроны  $s^2$ -иона взаимодействуют с  $E_g$ - и  $T_{2g}$ -колебаниями кристаллической решетки кубической симметрии, колебания не полностью симметричны, а спин-орбитальное и другие взаимодействия рассматриваются как возмущения. Сильное взаимодействие люминесцентного  $^3P_1$ -уровня с колебательными модами  $E_g$  и  $T_{2g}$  приводит к одновременному сосуществованию тетрагонального и тригонального искажений поверхности потенциальной энергии возбужденного  $^3P_1$ -уровня  $s^2$ -иона [51,52].

При исследовании оптических свойств комплексных соединений теллура(IV) обнаружено, что при переходе от 300 к 100 К происходит плавное обратимое изменение окраски (обратимый линейный термохромизм): у хлорида — от желтой до светло-желтой, бромид — от красно-оранжевой до желтой, йодида — от красно-фиолетовой до винно-красной (таблица, рис. 3). Сравнительный анализ спектров диффузного отражения

показал, что наиболее заметные температурные изменения оптических характеристик наблюдаются у  $\text{Rb}_2\text{TeCl}_6$  в спектральной области 450–530 nm, у  $\text{Rb}_2\text{TeBr}_6$  — 300–620 nm. Согласно [23], причиной наблюдаемого термохромного эффекта может являться зависимость ян-теллеровского расщепления  $\Delta E$  полосы A в спектре поглощения комплексов от температуры:  $\Delta E \sim \sqrt{T}$ . Уменьшение асимметрии полосы A при понижении температуры и происходящее при этом уменьшение интенсивности длинноволновой компоненты полосы A в электронных спектрах поглощения приводит к изменению окраски комплексов Te(IV) [23,48].

Как видно из рис. 3, в отличие от хлоридного и бромидного комплексов заметных температурных изменений в спектрах диффузного отражения йодидного комплекса не наблюдается. По-видимому, отсутствие заметного термохромного эффекта у комплекса  $\text{Rb}_2\text{TeI}_6$  с более тяжелым галогенид-ионом связано с существенным уменьшением параметров тепловых колебаний атомов [53] (по сравнению с хлорид- и бромид-ионами) и резким ослаблением электронно-колебательного взаимодействия.

## Выводы

Проведено сравнительное исследование люминесцентных свойств галогенидных комплексов теллура(IV) с рубидием состава  $\text{Rb}_2\text{TeHal}_6$  (Hal = Cl, Br, I) при 77 и 300 K. Выявлена зависимость интенсивности люминесценции от геометрического строения координационного полиэдра теллура(IV) типа анионной подрешетки и спектрального положения A-полосы иона теллура(IV). Максимальная интенсивность люминесценции наблюдается у хлоридного комплекса при 77 и 300 K.

У  $\text{Rb}_2\text{TeCl}_6$  и  $\text{Cs}_2\text{TeBr}_6$  обнаружен эффективный обратимый термохромизм, обусловленный температурной зависимостью ян-теллеровского расщепления A-полосы в спектрах поглощения (отражения) иона теллура(IV). В отличие от них у йодидного комплекса  $\text{Rb}_2\text{TeI}_6$  заметных температурных изменений в спектрах диффузного отражения не наблюдается.

## Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки, номер государственного задания 0265-2020-0001.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] Wang Z.-P., Wang J.-Y., Li J.-R., Feng M.-L., Zou G.-D., Huang X.-Y. // Chem. Commun. 2015. N 15. P. 3094. doi 10.1039/C4CC08825E
- [2] Vovna V.I., Dotsenko A.A., Korochentsev V.V., Shcheka O.L., Os'mushko I.S., Mirochnik A.G., Sedakova T.V., Sergienko V.I. // J. Molec. Struct. 2015. V. 1091. P. 138. doi 10.1016/j.molstruc.2015.02.068
- [3] Седакова Т.В., Мирочник А.Г. // Опт. спектр. 2015. V. 119. № 1. С. 57; Sedakova T.V., Mirochnik A.G. // Opt. Spectrosc. 2015. V. 119. N 1. P. 54. doi 10.1134/S0030400X15070267
- [4] He J., Zeller M., Hunter A.D., Xu Zt. // J. Am. Chem. Soc. 2012. V. 134. N 3. P. 1553. doi 10.1021/ja2073559
- [5] Strasser A., Vogler A. // J. Photochem. Photobiol. A. 2004. V. 165. N 1-3. P. 115. doi 10.1016/j.jphotochem.2004.03.007
- [6] Strasser A., Vogler A. // Inorg. Chem. Commun. 2004. V. 7. N 4. P. 528. doi 10.1016/j.inoche.2003.12.039
- [7] Degen J., Diehl M., Schmidtke H.H. // Mol. Phys. 1993. V. 78. N 1. P. 103. doi 10.1080/00268979300100101
- [8] Nagpal J.S., Godbole S.V., Varadharajan G., Page A.G. // Radiat. Prot. Dosim. 1998. V. 80. N 4. P. 417. doi 10.1093/oxfordjournals.rpd.a032562
- [9] Blasse G. // Chem. Phys. Lett. 1984. V. 104. N 2-3. P. 160. doi 10.1016/0009-2614(84)80188-8
- [10] Blasse G. // Rev. Inorg. Chem. 1983. V. 5. N 4. P. 319.
- [11] Maughan A.E., Ganose A.M., Bordelon M.M., Miller E.M., Scanlon D.O., Neilson J.R. // J. Am. Chem. Soc. 2016. V. 138. P. 8453. doi 10.1021/jacs.6b03207
- [12] Liu M., Johnston M.B., Snaith H.J. // Nature. 2013. V. 501. P. 395. doi 10.1038/nature12509
- [13] Benin B.M., Dirin D.N., Morad V., Wörle M., Yakunin S., Raino G., Nazarenko O., Fischer M., Infante I., Kovalenko M.V. // Angew. Chem., Int. Ed. 2018. V. 57. P. 11329. doi 10.1002/anie.201806452
- [14] Hoefler S.F., Trimmel G., Rath T. // Monatsh. Chem. 2017. V. 148. P. 795. doi 10.1007/s00706-017-1933-9
- [15] Cai Y., Xie W., Ding H., Chen Y., Thirumal K., Wong L.H., Mathews N., Mhaisalkar S.G., Sherburne M., Asta M. // Chem. Mater. 2017. V. 29. P. 7740. doi 10.1021/acs.chemmater.7b02013
- [16] Nikol H., Vogler A. // Inorg. Chem. 1993. V. 32. N 7. P. 1072. doi 10.1021/ic00059a006
- [17] Wernicke R., Kupka H., Ensslin W., Schmidtke H.H. // Chem. Phys. 1980. V. 47. N 2. P. 235. doi 10.1016/0301-0104(80)85009-9
- [18] Schmidtke H.H., Diehl M., Degen J. // J. Phys. Chem. 1992. V. 96. N 9. P. 3605. doi 10.1021/j100188a011
- [19] Kinkely H., Vogler A. // Inorg. Chem. Commun. 2008. V. 11. N 1. P. 36. doi 10.1016/j.inoche.2007.10.010
- [20] Drummen P.J.H., Donker H., Smit W.M.A., Blasse G. // Chem. Phys. Lett. 1988. V. 144. N 5,6. P. 460. doi 10.1016/0009-2614(88)87296-8
- [21] Blasse G., Dirksen G.J., Abriel W. // Chem. Phys. Lett. 1987. V. 136. N 5. P. 460. doi 10.1016/0009-2614(87)80287-7
- [22] Dotsenko A.A., Vovna V.I., Korochentsev V.V., Mirochnik A.G., Shcheka O.L., Sedakova T.V., Sergienko V.I. // Inorg. Chem. 2019. V. 58. N 10. P. 6796. doi 10.1021/acs.inorgchem.9b00250
- [23] Stufkens D.J. // Rec. Trav. Chim. 1970. V. 89. N 11. P. 1185.
- [24] Буквецкий Б.В., Седакова Т.В., Мирочник А.Г. // Координац. химия. 2010. Т. 36. № 9. С. 658; Bukvetskii B.V., Sedakova T.V., Mirochnik A.G. // Rus. J. Coord. Chem. 2010. V. 36. N 9. P. 651. doi 10.1134/S1070328410090034
- [25] Bukvetskii B.V., Sedakova T.V., Mirochnik A.G. // Rus. J. Inorg. Chem. 2011. V. 56. N 2. P. 213. doi 10.1134/S0036023611020045

- [26] Седякова Т.В., Мирочник А.Г., Карасев В.Е. // Опт. спектр. 2011. Т. 110. № 5. С. 806; Sedakova T.V., Mirochnik A.G., Karasev V.E. // Opt. Spectrosc. 2011. V. 110. N 5. P. 755. doi 10.1134/S0030400X11030192
- [27] Седякова Т.В., Мирочник А.Г., Карасев В.Е. // Опт. спектр. 2008. Т. 105. № 4. С. 584; Sedakova T.V., Mirochnik A.G., Karasev V.E. // Opt. Spectrosc. 2008. V. 105. N 4. P. 517. doi 10.1134/S0030400X08100056
- [28] Буквецкий Б.В., Седякова Т.В., Мирочник А.Г. // Журн. структур. химии. 2012. Т. 53. № 1. С. 320; Bukvetskii B.V., Sedakova T.V., Mirochnik A.G. // J. Struct. Chem. 2012. V. 53. N 2. P. 306. doi 10.1134/S002247661202014X
- [29] Буквецкий Б.В., Седякова Т.В., Мирочник А.Г. // Координац. химия. 2012. Т. 38. № 2. С. 112; Bukvetskii B.V., Sedakova T.V., Mirochnik A.G. // Rus. J. Coord. Chem. 2012. V. 38. N 2. P. 106. doi 10.1134/S1070328412020017
- [30] Мирочник А.Г., Буквецкий Б.В., Сторожук Т.В., Карасев В.Е. // Журн. неорган. химии. 2003. Т. 48. № 4. С. 582; Mirochnik A.G., Bukvetskii B.V., Storozhuk T.V., Karasev V.E. // Rus. J. Inorg. Chem. 2003. V. 48. N 4. P. 501.
- [31] Sobczyk L., Jakubas R., Zaleski J. // Polish. J. Chem. 1997. V. 71. N 3. P. 265.
- [32] Waskowska A., Janczak J., Czaplak Z. // J. Alloys Comp. 1993. V. 196. N 1-2. P. 255. doi 10.1016/0925-8388(93)90605-M
- [33] Das A.K., Brown I.D. // Can. J. Chem. 1966. V. 44. P. 939.
- [34] Engel G. // Z. Kristallogr. 1977. V. 144. P. 341.
- [35] Dotsenko A.A., Shcheka O.L., Vovna V.I., Korochentsev V.V., Mirochnik A.G., Sedakova T.V. // J. Molec. Struct. 2016. V. 1109. P. 13. doi 10.1016/j.molstruc.2015.12.067
- [36] Dotsenko A.A., Vovna V.I., Korochentsev V.V., Os'mushko I.S., Mirochnik A.G., Shcheka O.L., Sedakova T.V. // Rus. Chem. Bullet. 2015. V. 65. N 10. P. 2393. doi 10.1007/s11172-015-1168-z
- [37] Карякин Ю.В., Ангелов И.И. Чистые вещества. М.: Химия, 1974. 408 с.
- [38] Бабко А.К., Пятницкий И.В. Количественный анализ. М.: Государственное научно-техническое издательство химической литературы, 1956. 618 с.
- [39] Волкова Л.М., Удовенко А.А. Проблемы кристаллохимии. М.: Наука, 1988. С. 46 - 80.
- [40] Abriel W. // Acta Cryst. B. 1986. V. 42. P. 449. doi 10.1107/S0108768186097896
- [41] Webster M., Collins P.H. // J. Chem. Soc., Dalton Trans. 1973. P. 588. doi 10.1039/DT9730000588
- [42] Abriel W., Ihringer J. // J. Solid State Chem. 1984. V. 52. P. 274. doi 10.1016/0022-4596(84)90010-0
- [43] Abriel W. // Mater. Res. Bull. 1982. V. 17. N 10. P. 1341. doi 10.1016/0025-5408(82)90171-4
- [44] Timmermans C.W.M., Blasse G. // J. Sol. State Chem. 1984. V. 52. N 3. P. 222. doi 10.1016/0022-4596(84)90005-7
- [45] Blasse G., Brill A. // J. Chem. Phys. 1968. V. 48. N 1. P. 217.
- [46] Reisfeld R. // Struct. Bonding. 1976. V. 30. P. 65.
- [47] Reisfeld R., Boehm L. // J. Non-Crystalline Solids. 1974. V. 16. P. 832.
- [48] Stufkens D.J., Schenk A. // Rec. Trav. Chim. 1971. V. 89. P. 190.
- [49] Сторожук Т.В., Буквецкий Б.В., Мирочник А.Г., Карасев В.Е. // Журн. структур. химии. 2003. Т. 44. № 5. С. 968; Storozhuk T.V., Bukvetskii B.V., Mirochnik A.G., Karasev V.E. // J. Struct. Chem. 2003. V. 44. N 3. P. 880. doi 10.1023/B:JORY.0000029830.73340.3b
- [50] Ranfagni A., Mugnai D., Bacci M., Viliani G., Fontana M.P. // Adv. Physics. 1983. V. 32. N 6. P. 823. doi 10.1080/00018738300101621
- [51] Bersuker I.B. // Chem. Rev. 2001. V. 101. N 4. P. 1067. doi 10.1021/cr0004411
- [52] Берсукер И.Б. Эффект Яна-Теллера и вибронные взаимодействия в современной химии. М.: Наука, 1987. 344 с.
- [53] Буквецкий Б.В., Мирочник А.Г. // Журн. структур. химии. 2005. Т. 4. № 4. С. 694; Bukvetskii B.V., Mirochnik A.G. // J. Struct. Chem. 2005. V. 46. N 4. P. 672. doi 10.1007/s10947-006-0186-y