

УДК 536.42;538.958;544.015.4

СОСТОЯНИЕ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ Li_2SO_4 , ПРЕДШЕСТВУЮЩЕЕ ФАЗОВОМУ ПЕРЕХОДУ I РОДА

© 2020 г. А. Р. Алиев¹, *, И. Р. Ахмедов¹, М. Г. Какагасанов¹, З. А. Алиев¹

¹Институт физики им. Х.И. Амирханова Дагестанского научного центра Российской академии наук, ул. Ярагского, 94, Махачкала, 367003 Россия

*e-mail: amilaliev@rambler.ru

Поступила в редакцию 25.03.2019 г.

После доработки 22.07.2019 г.

Принята к публикации 06.08.2019 г.

Методами спектроскопии комбинационного рассеяния исследованы процессы молекулярной релаксации в сульфате лития Li_2SO_4 . Установлено, что в кристаллическом сульфате Li_2SO_4 структурный фазовый переход первого рода носит размытый характер. Обнаружено существование предпереходной области в Li_2SO_4 .

Ключевые слова: ионные кристаллы, комбинационное рассеяние, молекулярная спектроскопия, колебательная релаксация, предпереход

DOI: 10.31857/S0002337X20020025

ВВЕДЕНИЕ

Исследованиям структурных фазовых переходов в кристаллах в последние годы уделяется большое внимание [1–3]. Многие из них являются переходами первого рода. Известно, что в области фазового перехода первого рода кристалл–расплав имеют место явления предплавления [4]. Предпереходные явления наблюдаются в жидких кристаллах [5]. Исследованы предпереходные явления в металлических сплавах [6].

Можно предположить, что подобные предпереходные явления могут наблюдаться и при некоторых структурных фазовых переходах первого рода в кристаллах. Наряду с дифракционными методами эти явления могут с успехом изучаться и спектроскопическими методами, чувствительными к локальным взаимодействиям и нарушениям в кристаллической решетке. В последние годы представления о предпереходных явлениях развиты в работах [7, 8].

В качестве метода исследования структурных фазовых переходов в кристаллах удобен метод колебательной спектроскопии, в том числе и метод комбинационного рассеяния (КР) света. В отличие от других методов в колебательной спектроскопии измеряются величины, характеризующие непосредственно отдельные молекулы или ионы изучаемой системы [9–20]. Этими параметрами являются положение максимума (частота ν) и ширина w спектральной полосы. Малейшие изменения в микроскопической структуре и строении изучаемой системы, а также в динамике мо-

лекул и ионов отражаются на спектральных параметрах (ν , w) этой системы [21–23].

Ранее [24, 25] исследована область предплавления в кристаллах с многоатомными ионами методом колебательной спектроскопии. При этом установлено, что область предплавления наиболее четко проявляется в тех кристаллах, где выше симметрия молекулярного иона. В соответствии с этим в настоящей работе в качестве объекта исследования был выбран сульфат лития Li_2SO_4 .

Сульфат лития Li_2SO_4 представляет собой бесцветный кристалл с моноклинной решеткой (пр. гр. $P2_1/c$). Переход в кубическую форму (пр. гр. $I43m$) происходит при температуре $T_s = 848\text{--}859$ К, температура плавления равна $T_m = 1131\text{--}1133$ К [26–28]. Высокотемпературная кристаллическая фаза является суперионной [29]. По нашим данным, $T_s \approx 850$ К, $T_m = 1130$ К [21].

Указанная соль содержит симметричный молекулярный сульфат-ион SO_4^{2-} , имеющий определенный набор нормальных колебаний с хорошо изученным спектром и активных в КР во всех фазовых состояниях [29]. Это позволяет нам надеяться на то, что исследование колебательных спектров вблизи структурного превращения позволит обнаружить предпереходную область. Исследование фазового перехода в сульфатах важно для понимания механизма и молекулярной природы структурных перестроек в твердых телах. В литературе мало данных, посвященных исследованиям именно этого класса ионных соединений,

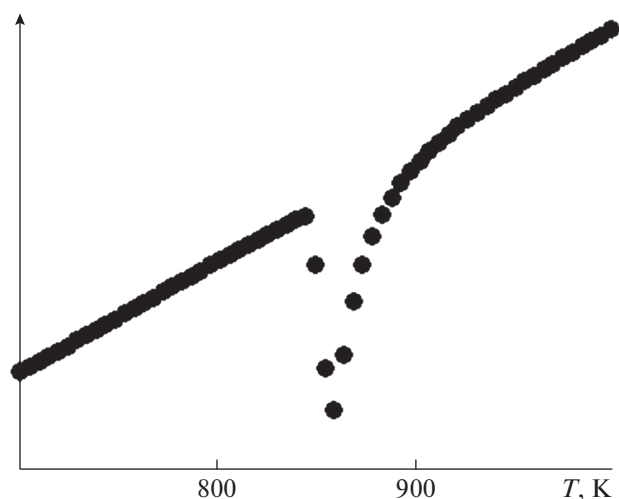


Рис. 1. Кривая ДТА для сульфата лития.

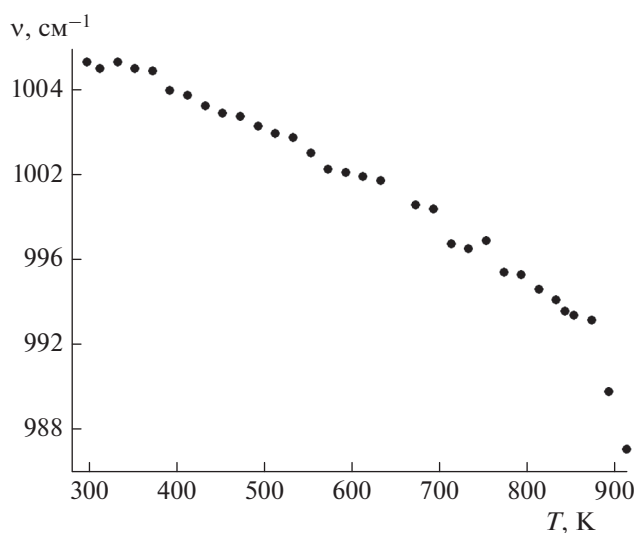


Рис. 2. Температурная зависимость $\nu(T)$ положения максимума спектрального контура $\nu_1(A)$ аниона SO_4^{2-} в кристаллическом сульфате лития.

поэтому исследование реориентационной подвижности и процессов разупорядочения анионов в области полиморфных превращений в сульфатах щелочных металлов методом КР является актуальной задачей.

Цель настоящей работы – исследование спектров КР сульфата лития в окрестности структурного фазового перехода первого рода с целью выявить предпереходную область.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Дифференциальный термический анализ (ДТА) проводился на приборе синхронного терми-

ческого анализа STA 449 F3 Jupiter (NETZSCH) при скорости нагрева 20 К/мин в атмосфере аргона в алундовых тиглях (рис. 1) в Аналитическом центре коллективного пользования Дагестанского научного центра Российской академии наук (АЦКП ДНЦ РАН). Обработка данных и интегрирование пиков проводились с помощью встроенных прикладных программ фирмы NETZSCH.

Для получения информации о динамических межзонных взаимодействиях использовали анализ формы контуров колебаний молекулярных анионов в спектрах КР твердой системы. Непосредственно из фонованого спектра получить подобную информацию не представляется возможным. Спектр малых частот высокотемпературных фаз ионных кристаллов, как правило, регистрируется в виде широкой бесструктурной полосы, обусловленной термическим смещением различных типов (трансляционных, либрационных) внешних колебаний структурных единиц.

В то же время, изменение структуры и динамики твердой системы оказывает влияние на колебательные состояния ее структурных единиц и отражается в спектрах инфракрасного поглощения и КР. Поэтому использование колебательных спектров, соответствующих внутренним модам молекулярных ионов, для получения информации о процессах молекулярной релаксации в ионных кристаллах и расплавах представляется вполне обоснованным.

Спектры КР возбуждались излучением аргонового лазера ЛГ-106м-1 с длиной волны $\lambda = 488$ нм и регистрировались спектрометром ДФС-52М от 900 до 1100 cm^{-1} в области полносимметричного колебания $\nu_1(A)$ сульфат-иона $\nu_1(\text{SO}_4^{2-}) \approx 986\text{--}1006$ cm^{-1} в температурном интервале 293–913 К. Ширины входной и выходной щелей монохроматора устанавливались одинаковыми и равными 150 мкм. Положения максимумов колебательных полос фиксировались с точностью ± 0.5 cm^{-1} , а их ширины с точностью ± 0.1 cm^{-1} . Температура образцов поддерживалась в процессе регистрации спектров с точностью ± 0.5 К. Методика регистрации и обработки спектров КР подробно описаны в [30–34].

На рис. 2, 3 представлены температурные зависимости частот ν (рис. 2), ширины w и интенсивностей I (рис. 3) контура $\nu_1(A)$ колебания SO_4^{2-} в кристалле Li_2SO_4 .

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Повышение температуры кристаллов от комнатной до температуры фазового перехода приводит к изменению параметров практически всех наблюдаемых в спектре полос. Общим свойством для всех спектров является смещение миниму-

мов в низкочастотную область, уширение спектральных линий и упрощение их формы по мере повышения температуры и при переходе из низкотемпературной в высокотемпературную фазу.

На рис. 1 представлена кривая ДТА для Li_2SO_4 . Из анализа этих данных мы сделали вывод о том, что температура структурного фазового перехода $T_s \approx 850$ К.

На рис. 2 представлена температурная зависимость $\nu(T)$ положения максимума спектральной полосы, соответствующей колебанию $\nu_1(A)$ аниона SO_4^{2-} в Li_2SO_4 . С ростом температуры частота колебания уменьшается. Примерно при $T = 650$ – 700 К на зависимости $\nu(T)$ имеют место определенные особенности. При дальнейшем увеличении температуры частота уменьшается быстрее. В точке структурного фазового перехода первого рода ($T_s \approx 850$ К) частота резко уменьшается. Таким образом, интервал температур от 650 до 850 К соответствует предпереходной области в Li_2SO_4 .

На рис. 3 представлены температурные зависимости ширины и интенсивности спектральной полосы, соответствующей колебанию $\nu_1(A)$ аниона SO_4^{2-} в Li_2SO_4 . С ростом температуры ширина возрастает, а интенсивность уменьшается. Примерно при 650–700 К на температурных зависимостях $w(T)$ и $I(T)$ наблюдаются определенные особенности. Интенсивность резко возрастает при 650 К, а затем постепенно уменьшается. Ширина при $T \approx 650$ К начинает увеличиваться медленнее и резко возрастает в точке структурного фазового перехода первого рода ($T_s \approx 850$ К). Таким образом, интервал температур от 650 до 850 К соответствует предпереходной области в Li_2SO_4 .

В интервале от 650 К до $T_s \approx 850$ К наблюдается отклонение температурных зависимостей частоты (рис. 2), ширины и интенсивности (рис. 3) от линейных, характерных для более низких температур. Эти отклонения появляются при $T = 650$ К и возрастают по мере увеличения температуры и приближения к температуре фазового перехода. Поэтому мы рассматриваем интервал температур от 650 К до $T_s \approx 850$ К как предпереходную область.

С другой стороны, предпереходные явления никак не проявляются в ДТА (рис. 1), который имеет дело с тепловыми макроскопическими величинами.

В противоположность этому, спектральные величины (частота, ширина и интенсивность спектральной полосы) – это микроскопические параметры. Частота ν (положение максимума спектральной полосы) определяется энергией основного внутримолекулярного колебательно-го перехода сульфат-иона. Ширина w спектральной полосы обратно пропорциональна времени τ релаксации колебательно возбужденного состоя-

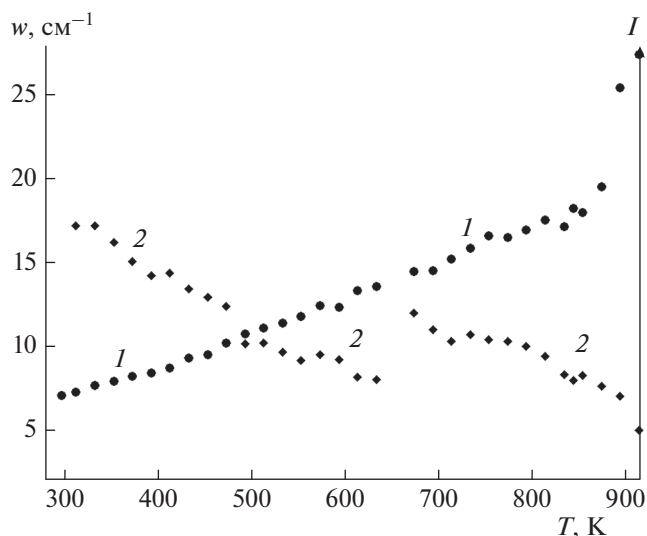


Рис. 3. Температурные зависимости ширины $w(T)$ (1) и интенсивности $I(T)$ (2) спектрального контура $\nu_1(A)$ аниона SO_4^{2-} в кристаллическом сульфате лития.

ния сульфат-иона: $w = (\pi c \tau)^{-1}$, $c = 3 \times 10^{10}$ см/с. Время релаксации имеет порядок $\tau \sim 10^{-12}$ с. Эти параметры ν , w характеризуют отдельные сульфат-ионы. Они также зависят от того, в каком окружении находится отдельный анион SO_4^{2-} . Если окружение сульфат-иона меняется, то меняются также частота, ширина и интенсивность спектральной полосы. Эти микроскопические величины более чувствительны, чем тепловые макроскопические параметры. Микроскопичность спектральных параметров заключается в том, что каждый отдельный сульфат-ион имеет частоту внутреннего колебания и время колебательной релаксации. В эксперименте мы наблюдаем их усредненные значения. В отличие от этого тепловые величины являются макроскопическими, так как отдельный сульфат-ион не обладает тепловыми величинами. Только у совокупности большого числа молекул или ионов появляются тепловые параметры, и в этом смысле они являются макроскопическими.

Из рис. 2 и 3 видно, что при $T > 650$ К наблюдаются изменения на температурных зависимостях частоты, ширины и интенсивности спектральной полосы. Эти изменения тем сильнее, чем ближе к температуре фазового перехода. Такие спектральные изменения связаны со структурными изменениями в окружении сульфат-иона на микроскопическом уровне, которые тем сильнее, чем ближе к температуре фазового перехода. Таким образом, мы приходим к выводу о том, что при $T > 650$ К наблюдаются предпереходные явления и проявляются они тем сильнее, чем бли-

же к температуре фазового перехода. Следовательно, в интервале температур от 650 К до $T_s \approx 850$ К в сульфате лития имеет место предпереходная область.

Наш вывод о том, что фазовый переход в кристалле Li_2SO_4 является размытым, согласуется с тем, что фазовому переходу в суперионное состояние всегда предшествует широкая предпереходная область, в которой происходит тонкая перестройка структуры кристалла с образованием в ней своеобразных каналов проводимости, по которым могут перемещаться легкие ионы лития [35, 36]. Обращает на себя внимание и то, что скачки в окрестности фазового перехода проявляются только в спектре КР (рис. 2 и 3). В то же время данные ДТА свидетельствуют о достаточно плавном поведении кристалла в предпереходной области (рис. 1), что говорит о наличии в ней низкоэнергетических тонких структурных перестроек, не фиксируемых ДТА.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методами спектроскопии КР исследованы процессы молекулярной релаксации в сульфате лития. Обнаружено, что в кристаллическом Li_2SO_4 структурный фазовый переход первого рода носит размытый характер. Показано существование предпереходной области в исследованном Li_2SO_4 .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Воронько Ю.К., Соболев А.А., Шукшин В.Е., Герасимов Я.В.* Исследование строения и фазовых переходов в пиросиликатах редкоземельных элементов методом спектроскопии комбинационного рассеяния света // Неорган. материалы. 2015. Т. 51. № 10. С. 1120–1127. <https://doi.org/10.7868/S0002337X15090201>
2. *Скутина Л.С., Вылков А.И., Гржегоржевский К.В., Чуйкин А.Ю., Остроушко А.А., Филонова Е.А.* Кристаллическая структура и фазовые переходы в твердых растворах $\text{Sr}_2\text{Ni}_{1-y}\text{Mg}_y\text{MoO}_6$ // Неорган. материалы. 2017. Т. 53. № 12. С. 1325–1330. <https://doi.org/10.7868/S0002337X17120119>
3. *Политова Е.Д., Мосунов А.В., Стребков Д.А., Голубко Н.В., Калева Г.М., Логинов Б.А., Логинов А.Б., Стефанович С.Ю.* Особенности фазообразования и фазовые переходы в нестехиометрических керамиках титаната натрия-висмута // Неорган. материалы. 2018. Т. 54. № 7. С. 785–789. <https://doi.org/10.7868/S0002337X18070205>
4. *Копосов Г.Д., Бардюг Д.Ю.* Анализ предплавления льда во влажосодержащих дисперсных средах // Письма в ЖТФ. 2007. Т. 33. № 14. С. 80–86.
5. *Кизель В.А., Панин С.И.* Предпереходные явления в холестериках с малым шагом спирали // Письма в ЖЭТФ. 1986. Т. 44. № 2. С. 74–77.
6. *Гришков В.Н., Лотков А.И., Дубинин С.Ф., Теплоухов С.Г., Пархоменко В.Д.* Модуляция коротковолновых атомных смещений в сплаве на основе TiNi, предшествующая мартенситному превращению $\text{B2} \rightarrow \text{B19}'$ // ФТТ. 2004. Т. 46. № 8. С. 1348–1355.
7. *Алиев А.Р., Гафуров М.М., Ахмедов И.Р., Какагасанов М.Г., Алиев З.А.* Особенности структурных фазовых переходов в ионно-молекулярных кристаллах перхлоратов // ФТТ. 2018. Т. 60. № 6. С. 1191–1201. <https://doi.org/10.21883/FTT.2018.06.45999.29M>
8. *Максимов В.И., Максимова Е.Н., Суркова Т.П., Вохмянин А.П.* О возможных состояниях кристаллической структуры, предшествующих фазовому переходу в кристаллах $\text{Zn}_{1-x}\text{V}_x\text{Se}$ ($0.01 \leq x \leq 0.10$) // ФТТ. 2019. Т. 61. № 1. С. 42–52. <https://doi.org/10.21883/FTT.2019.01.46892.169>
9. *Горелик В.С., Свербиль П.П.* Комбинационное рассеяние света на продольных и поперечных оптических колебаниях в монокристаллах ниобата лития // Неорган. материалы. 2015. Т. 51. № 11. С. 1190–1197. <https://doi.org/10.7868/S0002337X151100073>
10. *Денисова Л.Т., Иртыго Л.А., Каргин Ю.Ф., Денисов В.М., Белецкий В.В., Шубин А.А.* Высокотемпературная теплоемкость и колебательные спектры $\text{Eu}_2\text{Sn}_2\text{O}_7$ // Неорган. материалы. 2016. Т. 52. № 8. С. 874–877. <https://doi.org/10.7868/S0002337X16080054>
11. *Сидоров Н.В., Теплякова Н.А., Яничев А.А., Палатников М.Н., Макарова О.В., Алешина Л.А., Кадетова А.В.* Особенности структуры и оптические свойства кристаллов $\text{LiNbO}_3:\text{ZnO}$ (3.43–5.84 мол. %) // Неорган. материалы. 2017. Т. 53. № 5. С. 491–497. <https://doi.org/10.7868/S0002337X17050177>
12. *Бузанов О.А., Воронова М.И., Забелина Е.В., Козлова А.П., Козлова Н.С., Скрылева Е.А., Спасский Д.А., Щербачев К.Д.* Оптические свойства, дефекты и состав кристаллов $\text{La}_3\text{Ga}_{5.5}\text{Ta}_{0.5}\text{O}_{14}$ // Неорган. материалы. 2017. Т. 53. № 5. С. 505–512. <https://doi.org/10.7868/S0002337X17050049>
13. *Сидоров Н.В., Палатников М.Н., Бобрева Л.А., Новикова Н.Н.* Проявление структурных особенностей кристаллов $\text{LiNbO}_3:\text{Zn}$ и $\text{LiNbO}_3:\text{Mg}$ в спектре ИК-поглощения в области валентных колебаний OH^- -групп // Неорган. материалы. 2017. Т. 53. № 7. С. 727–731. <https://doi.org/10.7868/S0002337X17070107>
14. *Ильиных Н.И., Ковалёв Л.Е.* Влияние фоновой примеси железа на ИК-поглощение и диэлектрический отклик высокоомных монокристаллов ZnSe // Неорган. материалы. 2018. Т. 54. № 8. С. 799–802. <https://doi.org/10.1134/S0002337X18080080>
15. *Ремпель С.В., Еселевич Д.А., Валева А.А., Ремпель А.А.* Исследование строения нанокompозита $\text{ГАП}/\text{TiO}_2$ методами колебательной спектроскопии // Неорган. материалы. 2018. Т. 54. № 9. С. 949–954. <https://doi.org/10.1134/S0002337X18090130>
16. *Соболев А.А., Шукшин В.Е., Луканин В.И., Моисеева Л.В.* Изучение тройной системы $\text{Li}_2\text{O}-\text{V}_2\text{O}_5-\text{MoO}_3$ методом спектроскопии комбинационного рассеяния света при высоких температурах. I. Сравнение структурных особенностей расплавов молибдатов лития и калия // Неорган. материалы. 2018. Т. 54. № 10. С. 1040–1045. <https://doi.org/10.1134/S0002337X18100160>

17. Сидоров Н.В., Бобрева Л.А., Теплякова Н.А., Палатников М.Н. Комплексные дефекты и оптические свойства кристаллов ниобата лития двойного легирования // Неорган. материалы. 2018. Т. 54. № 10. С. 1066–1070.
<https://doi.org/10.1134/S0002337X18100159>
18. Горелик В.С., Палатников М.Н., Пятых А.Ю., Сидоров Н.В., Скрабатун А.В. Оптические свойства кристаллов ниобата лития, легированных ионами меди // Неорган. материалы. 2018. Т. 54. № 10. С. 1071–1078.
<https://doi.org/10.1134/S0002337X1810007X>
19. Петьков В.И., Шипилов А.С., Боровикова Е.Ю., Ковальский А.М., Стенина И.А., Ярославцев А.Б. Синтез, структурные, ИК-спектроскопические и ионопроводящие характеристики $Mg_{0.5}Zr_2(AsO_4)_x(PO_4)_{3-x}$ // Неорган. материалы. 2018. Т. 54. № 10. С. 1079–1084.
<https://doi.org/10.1134/S0002337X18100135>
20. Моисеенко В.Н., Брынза Н.П., Сал Б. Абу, Holze Rudolf, Горелик В.С., Свербиль П.П. Комбинационное рассеяние света в нанокompозитах на основе синтетических опалов и нанокристаллической фазы Bi_2TeO_5 // Неорган. материалы. 2018. Т. 54. № 12. С. 1320–1326.
<https://doi.org/10.1134/S0002337X18120114>
21. Алиев А.Р., Ахмедов И.Р., Какагасанов М.Г., Алиев З.А., Гафуров М.М., Амиров А.М. Молекулярная релаксация в твердых бинарных системах $LiNO_3-LiClO_4$ и $Li_2CO_3-Li_2SO_4$ // Изв. вузов. Физика. 2018. Т. 61. № 2. С. 80–86.
22. Алиев А.Р., Ахмедов И.Р., Какагасанов М.Г., Алиев З.А., Гафуров М.М., Рабаданов К.Ш., Амиров А.М. Колебательная релаксация в твердых бинарных системах $NaNO_3-NaClO_4$, $NaNO_3-NaNO_2$, $Na_2CO_3-Na_2SO_4$ // Неорган. материалы. 2018. Т. 54. № 3. С. 274–280.
<https://doi.org/10.7868/S0002337X18030089>
23. Алиев А.Р., Ахмедов И.Р., Какагасанов М.Г., Алиев З.А., Гафуров М.М., Рабаданов К.Ш., Амиров А.М. Процессы молекулярной релаксации в бинарных кристаллических системах KNO_3-KClO_4 , KNO_3-KNO_2 , $K_2CO_3-K_2SO_4$ // Журн. физ. химии. 2018. Т. 92. № 3. С. 403–408.
<https://doi.org/10.7868/S0044453718030020>
24. Gafurov M.M., Aliev A.R., Akhmedov I.R. Raman and Infrared Study of the Crystals with Molecular Anions in the Region of the Solid–Liquid Phase Transition // Spectrochim. Acta. Part A. 2002. V. 58. № 12. P. 2683–2692.
[https://doi.org/10.1016/S1386-1425\(02\)00014-8](https://doi.org/10.1016/S1386-1425(02)00014-8)
25. Gafurov M.M., Aliev A.R. Molecular Relaxation Processes in the Salt Systems Containing Anions of Various Configurations // Spectrochim. Acta. Part A. 2004. V. 60. № 7. P. 1549–1555.
<https://doi.org/10.1016/j.saa.2003.06.004>
26. Химическая энциклопедия. Т. 2. М.: Сов. энциклопедия, 1990. С. 608.
27. Bale C.W., Pelton A.D. Coupled Phase Diagram and Thermodynamic Analysis of the 18 Binary Systems Formed Among Li_2CO_3 , K_2CO_3 , Na_2CO_3 , $LiOH$, KOH , $NaOH$, Li_2SO_4 , K_2SO_4 and Na_2SO_4 // CALPHAD. 1982. V. 6. № 4. P. 255–278.
28. Dessureault Y., Sangster J., Pelton A.D. Coupled Phase Diagram / Thermodynamic Analysis of the Nine Common-Ion Binary Systems Involving the Carbonates and Sulfates of Lithium, Sodium, and Potassium // J. Electrochem. Soc. 1990. V. 137. № 9. P. 2941–2950.
29. Алиев А.Р., Ахмедов И.Р., Какагасанов М.Г., Гафуров М.М., Рабаданов К.Ш., Атаев М.Б. Суперионная проводимость и спектры комбинационного рассеяния кристаллического сульфата лития в высокотемпературной фазе // Фазовые переходы, межфазные границы и наноматериалы. Электронный журн. Кабардино-Балкарского государственного университета. 2015. № 2. С. 40–45. URL: <http://pti-nt.ru/ru/issue/publication/102-superionnaya-provodimost-i-spektry-kombinacionnogo-rasseyaniya-kristallicheskogo-sulfata-litiya-v-vysokotemperaturnoy-faze>
30. Aliev A.R., Gafurov M.M., Akhmedov I.R. Raman Spectra of Lithium Sulfate Crystals in Strong Electric Fields // Chem. Phys. Lett. 2002. V. 353. № 3–4. P. 270–274.
[https://doi.org/10.1016/S0009-2614\(02\)00036-2](https://doi.org/10.1016/S0009-2614(02)00036-2)
31. Aliev A.R., Gafurov M.M., Akhmedov I.R. Intermolecular Phonon Decay Mechanism of Vibrational Relaxation in Binary Salt Systems // Chem. Phys. Lett. 2002. V. 359. № 3–4. P. 262–266.
[https://doi.org/10.1016/S0009-2614\(02\)00685-1](https://doi.org/10.1016/S0009-2614(02)00685-1)
32. Aliev A.R., Gafurov M.M., Akhmedov I.R. Molecular Relaxation in Molten Nitrate / Platinum Electrode Interfacial Region // Mol. Phys. 2002. V. 100. № 21. P. 3385–3388.
<https://doi.org/10.1080/00268970210153781>
33. Aliev A.R., Gadzhiev A.Z. Raman Spectra and Vibrational Relaxation in Molten Thiocyanates // J. Mol. Liquids. 2003. V. 107. № 1–3. P. 59–67.
[https://doi.org/10.1016/S0167-7322\(03\)00140-5](https://doi.org/10.1016/S0167-7322(03)00140-5)
34. Aliev A.R., Gafurov M.M., Akhmedov I.R. Raman Study of Aqueous Sodium Nitrate, Activated by the High-Voltage Pulsed Electric Discharge // Chem. Phys. Lett. 2003. V. 378. № 1–2. P. 155–160.
[https://doi.org/10.1016/S0009-2614\(03\)01263-6](https://doi.org/10.1016/S0009-2614(03)01263-6)
35. Вест А. Химия твердого тела. Ч. 2. М.: Мир, 1988. 336 с.
36. Бокштейн Б.С., Ярославцев А.Б. Диффузия атомов и ионов в твердых телах. М.: МИСИС, 2005. 362 с.