

На правах рукописи

МУСЛИМОВ Имомали Шохимардонович

**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЛИТИЯ С АЛЮМИНИЕМ И
РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫМИ МЕТАЛЛАМИ И РАЗРАБОТКА СПЛАВОВ
НА ИХ ОСНОВЕ**

02.00.04 – физическая химия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата химических наук



Душанбе – 2011

Работа выполнена на кафедре «Металлургия цветных металлов» Таджикского технического университета им.акад. М.С.Осими.

Научные руководители: доктор химических наук, профессор
Джураев Тухтасун Джураевич

кандидат технических наук
Ганиева Наргис Изатуллоевна

Официальные оппоненты: Заслуженный деятель науки и техники Республики Таджикистан, доктор химических наук, профессор
Солиев Лутфулло

кандидат технических наук, доцент
Сафаров Ахрор Мирзоевич

Ведущая организация: Государственное научно-экспериментальное и производственное учреждение АН Республики Таджикистан

Защита состоится « 16 » марта 2011 года в 10⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета ДМ 047.003.01 при Институте химии им. В.И. Никитина АН Республики Таджикистан по адресу: 734063, г.Душанбе, ул. Айни, 299/2. E-mail: gulchera@list.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института химии им. В.И. Никитина АН Республики Таджикистан.

Автореферат разослан « 14 » февраля 2011 года.

**Учёный секретарь
диссертационного совета,
кандидат химических наук**

Касымова Г.Ф.



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Создание сверхлёгких материалов с высокой удельной прочностью и повышенной пластичностью является в настоящее время одной из основных задач науки, обусловленной развитием современной техники. В этой связи большой интерес представляют сплавы, легированные литием. Вопрос об использовании лития в качестве легирующего элемента лёгких сплавов давно привлекает внимание металлургов. Дополнительное легирование и модифицирование этого класса сплавов щелочноземельными (стронцием) и редкоземельными металлами (РЗМ) и изучение их взаимодействия позволяет создать на их основе новые сплавы. Кроме того, в Таджикистане имеются месторождения минералов, содержащих алюминий, литий, стронций и РЗМ, и налажено производство этих металлов, что представляется важным для развития экономики и промышленности республики.

Поиск и создание новых сплавов с заранее заданными свойствами не возможен без систематического анализа диаграмм состояния. Изучение характера взаимодействия в системах лития с щелочными (ЩМ), редкоземельными и некоторыми переходными металлами (ПМ) с привлечением статистических критериев, термодинамической оценки и методов физико-химического анализа имеет важное значение, т.к. диаграммы состояния указанных систем до сих пор не изучены или изучены частично.

Исходя из этого, актуальность темы заключается в получении результатов теоретических и практических разработок, направленных на применение расчётных методов по построению двойных и тройных диаграмм состояния на основе лития с другими элементами и определению термодинамических параметров их взаимодействия с помощью заранее составленных программ на ЭВМ с использованием минимального количества экспериментальных данных.

Целью работы явилось построение двойных диаграмм состояния лития с щелочными, редкоземельными и некоторыми переходными металлами, а также разработка сплавов на основе системы Al-Li-Gd с высокими механическими и акустодемпфирующими свойствами.

Для достижения поставленной цели в работе решены следующие основные задачи:

- систематизированы виды взаимодействия лития с элементами периодической системы и выявлены в них общие закономерности фазовых равновесий;
- спрогнозированы типы взаимодействия компонентов в расслаивающихся системах на основе лития с применением статистических и термодинамических критериев;
- построены с применением уравнений двухзонной модели и теории регулярных растворов расчётные диаграммы состояния двойных систем на основе лития;
- определены термодинамические свойства сплавов в двойных и тройных системах с участием лития.

Научная новизна работы состоит в том, что:

- впервые рассчитаны параметры взаимодействия (энергия взаимодействия, энергия связи одноимённых, разноимённых частиц и степень ближнего порядка) лития с элементами периодической системы;
- методами прогноза и расчёта построена 21 диаграмма состояния систем на основе лития;
- в приближении теории регулярных растворов получены уравнения и рассчитаны термодинамические активности компонентов в двойных и тройных системах Li-ЩМ, Al-ЩЗМ, Li-РЗМ, Al-ЩЗМ-ЩМ и Al-Li-РЗМ;
- экспериментально изучен фазовый состав и построены диаграмма состояния квазибинарной системы AlLi-Al₂Gd и поверхность ликвидуса тройной диаграммы состояния системы Al-AlLi-Al₂Gd.

Практическая значимость. Полученные сведения по построенным диаграммам состояния и термодинамическим свойствам сплавов лития способствуют более широкой научно-обоснованной разработке технологии по получению и применению этих сплавов в современных областях науки и техники. Определение термодинамических характеристик сплавов лития с алюминием, щелочноземельными и редкоземельными металлами пополнит банк термодинамических величин новыми данными.

Предложенные оптимальные составы сплавов системы Al-Li-Gd с высокими акустодемпфирующими и механическими свойствами могут быть использованы в авиа-, ракетно- и машиностроении в качестве конструкционных и акустодемпфирующих материалов. Результаты данной работы используются и могут быть применены в научных исследованиях и в учебном процессе в Таджикском национальном университете, Таджикском техническом университете, Институте химии АН и других вузах Республики Таджикистан. Результаты диссертации внедрены в учебный процесс курса «Физическое металловедение», «Металлургия лёгких и редких металлов» и «Моделирование процессов и объектов в металлургии» на кафедре «Металлургия цветных металлов» Таджикского технического университета им.акад.М.С.Осими.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы доложены на Международной научно-практической конференции, посвященной 80-летию со дня рождения одного из основателей ТТУ Сулейманова А.С. (Душанбе, 1998 г.); Юбилейной научно-практической конференции, посвященной 40-летию химического факультета и 65-летию профессора Якубова Х.М. «Проблемы современной химической науки и образования» (Душанбе, 1999 г.); Конференции молодых учёных, посвящённой 80-летию академика АН РТ М.С.Осими «Химия в начале XXI-века» (Душанбе, 2000 г.); Республиканской конференции «Достижения в области химии и химической технологии» (Душанбе, 2001 г.); I-ой Международной научно-технической конференции «Генезис, теория и технология литых материалов» (гг. Владимир-Суздаль, Россия, 2002 г.); Международной научно-практической конференции «16 сессия Шурои Оли РТ (12 созыва) и её историческая значимость в развитии науки и образования» (Душанбе, 2002 г.); Межвузовской научно-практической конференции, посвящённой 80-летию г.Душанбе и Министерству образования РТ «Достижения в области металлургии и машиностроения РТ» (Душанбе, 2004 г.); II-ой и IV-ой Международных научно-практических конференциях «Перспективы развития науки и образования в XXI веке» (Душанбе, 2006, 2010 гг.).

Публикации. По результатам исследований опубликовано 3 статьи и 12 тезисов доклада.

Вклад автора в работу, выполненную в соавторстве, состоял в систематизации литературных данных по проблеме тематики с целью выявления закономерностей, проведении расчётов на ЭВМ, получении экспериментальных данных, анализе и обобщении результатов, формулировке основных выводов и положений диссертации.

Объём и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, выводов, списка литературы из 125 наименований библиографических ссылок. Работа изложена на 125 страницах машинописного текста, включая 23 таблицы, 35 рисунков.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, отражены научная и практическая значимость работы.

В первой главе приведён литературный обзор, включающий в себя сведения об особенностях взаимодействия в двойных и тройных системах Al-Li, Al-PЗМ и Al-Li-PЗМ.

Вторая глава посвящена систематизации видов взаимодействия в двойных системах лития с элементами периодической системы, анализу их степени изученности и прогнозу строения их диаграмм состояния с помощью существующих статистических критериев.

В третьей главе приводятся результаты расчётов параметров взаимодействия лития с элементами периодической системы, диаграмм фазового равновесия лития с щелочными, редкоземельными и некоторыми переходными металлами, а также термодинамических характеристик сплавов систем Al-Li, Al-ЩЗМ, Al-Sr-ЩМ и Al-Li-PЗМ.

Четвёртая глава посвящена экспериментальному изучению и построению фазового равновесия сплавов тройной системы Al-Li-Gd в области богатой алюминием и исследованию их механических и акустодемпфирующих свойств с целью разработки оптимальных алюминиево-литиевых составов, легированных гадолинием.

Диссертационная работа завершается общими выводами и списком цитированной литературы.

СИСТЕМАТИЗАЦИЯ И ПРОГНОЗ ВИДОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЛИТИЯ С ЭЛЕМЕНТАМИ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ (ПС)

Систематизация видов взаимодействия лития с другими элементами. Обобщение и систематизация сведений о диаграммах состояния и характере взаимодействия элементов являются весьма полезными в практическом и теоретическом отношении. По двойным системам лития такие обобщения уже проводились, они в определенной мере послужили этапами развития изучения этого металла и его сплавов. Однако в настоящее время требуется более полная систематизация информации, появившейся за последние два десятка лет в периодической литературе. В этом разделе приводятся новые обобщённые нами данные о взаимодействии лития с элементами периодической системы (ПС).

Установлено, что элементы IA группы ПС (H, Na, K, Rb, Cs, Fr) характеризуются несмешиваемостью с литием как в жидком, так и в твёрдом состояниях. Весьма ограниченная взаимная растворимость в жидком и твёрдом состояниях обнаружена только в системе лития с натрием.

Литий с элементами IIА группы ПС (Mg, Ca, Sr, Ba, Ra) образует ограниченные твёрдые растворы, механические смеси и соединения, кроме системы с бериллием, где обнаружена несмешиваемость компонентов как в жидком, так и в твёрдом состояниях.

Данные о взаимодействии лития с элементами IIIА группы ПС (Sc, Y, La, лантаноиды, Ac и актиноиды) почти отсутствуют.

Элементы IVA (Ti, Zr, Hf), VA (V, Nb, Ta), VIA (Cr, Mo, W) и VIIA (Mn, Tc, Re) групп ПС с литием предположительно образуют несмешивающиеся системы. Такой тип взаимодействия установлен в системах лития с титаном, ниобием и марганцем.

Анализ литературных данных показал, что литий с элементами VIIIA (Rh, Ni, Pd и Pt) группы ПС при взаимодействии образует весьма ограниченные твёрдые растворы, механические смеси и соединения, кроме системы лития с никелем, где установлено расслаивание компонентов как в жидком, так и в твёрдом состояниях. Взаимодействие лития с элементами этой же группы, такими как Fe, Ru, Os и Co не изучено.

Диаграммы состояния лития с элементами IB (Cu, Ag, Au), IIB (Zn, Cd, Hg), IIIB (B, Al, Ga, In, Tl), IVB (C, Si, Ge, Sn, Pb), VB (N, P, As, Sb, Bi), VIB (O, S, Se, Te, Po) групп ПС более или менее изучены и построены. Они характеризуются наличием ограниченных областей взаимных твёрдых растворов, механических смесей и соединений. Следует отметить, что диаграммы состояния систем лития с бором, фосфором, мышьяком, сурьмой, кислородом, серой, селеном, теллуром и полонием не построены.

Обобщение диаграмм состояния двойных систем лития показало недостаточный объем изучения взаимодействия лития с другими элементами. В литературе опубликовано сравнительно мало диаграмм состояния систем с участием лития, что составило 35% от их общего количества. В большинстве случаев построенные диаграммы состояния подлежат уточнению с использованием более чистых исходных материалов и современных методов анализа.

Прогноз взаимной растворимости лития с другими элементами в жидком и твёрдом состояниях. Согласно теории металлических сплавов, на тип диаграммы состояния оказывают влияние физико-химические факторы, зависящие от положения элементов в периодической системе: электронное строение элементов, их валентность, атомный радиус, электроотрицательность, ионизационный потенциал, теплота испарения, энтропия, температура плавления и кипения, коэффициент всестороннего сжатия, тип кристаллической решетки, объем элементарной ячейки и другие факторы. Ни одно из этих свойств в отдельности не является достаточным для определения характера взаимодействия элементов. Все они взаимно связаны.

В данной работе рассматриваются критерии, определяющие характер физико-химического взаимодействия в каждом конкретном случае:

- 1) смешиваемость или расслаивание в жидком состоянии;
- 2) взаимная растворимость металлов в твердом состоянии;
- 3) образование металлических соединений;

4) образование невариантных превращений и невариантных точек и возможность предсказания на их основе типа диаграмм состояния.

Для оценки случая (1) применили критерий Гильдебранда, Мотта и Воздвиженского; для случая (2) – графические методы Юм-Розери, Даркена-Гурри и Воздвиженского; для случаев (3) и (4) -

графические методы Воздвиженского, где учитывались структурный, размерный, электрохимический и температурный факторы с учётом поверхностного натяжения и ионизационных потенциалов компонентов.

Анализ взаимодействия показал, что по фактору Гильдебранда из 83 элементов при нормальной температуре с Li полностью должны смешиваться всего 28 элементов: Mg, P, S, Zn, Ga, As, Se, Cd, In, Sn, Sb, Te, La и лантаноиды, Tl, Pb, Bi и Ac. Остальные элементы в системах с литием не смешиваются. Количество элементов, смешивающихся в жидком состоянии при температуре плавления Li, увеличивается до 35, в число которых входят: Ge, Sr, Y, Eu, Yb, Hg и Th.

Вероятность прогноза по числу Мотта увеличивается в 2-2.5 раза, т.е. теперь должны смешиваться 52 элемента при комнатной температуре, а при температуре плавления лития - 56. Однако расчёты показали, что число Мотта, вычисленное при температуре плавления металла-основы (Li), приводит к незначительному увеличению точности прогноза по сравнению с расчётом при комнатной температуре.

Для более точного прогноза взаимодействия лития с другими элементами в жидком состоянии, используя совместный учёт температурного (n_T) и объединённого (поверхностного натяжения и ионизационного потенциала) ($n_{\sigma,u}$) факторов, нами установлено, что смешиваемость в жидком состоянии сплавов на основе Li должна наблюдаться в системах с 33 элементами IA (Na, Fr), IIA (Be, Mg, Ca, Ba, Ra), IIIA (Eu, Yb, U, Np, Pu), VIIIA (Pd), IIB (Zn, Cd, Hg), IIIB (Al, Ga, In, Tl), IVB (C, Si, Ge, Sn, Pb), VB (P, As, Sb, Bi) и VIB (S, Se, Te, Po) групп периодической системы. К расслаивающимся системам в жидком состоянии относятся системы лития с 47 элементами IA (K, Rb, Cs), IIA (Sr), IIIA (Sc, Y, La, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Lu, Ac, Pa, Am), IVA (Ti, Zr, Hf), VA (V, Nb, Ta), VIA (Cr, Mo, W), VIIA (Mn, Tc, Re), VIIIA (Fe, Ru, Os, Co, Rh, Ir, Ni, Pt), IB (Cu, Ag, Au), IIIB (B), VB (N) групп ПС.

Прогноз растворимости компонентов друг в друге в твёрдом состоянии анализировался построением статистических графиков Даркена-Гурри («эллипсы растворимости») по следующей методике. Относительно рассматриваемого элемента строятся два эллипса, оси которых соответствуют условиям образования неограниченных, широких, и весьма ограниченных областей твёрдых растворов с

большими осями эллипса размерами (с разницей в атомных радиусах) $\pm 15\%$ и ± 0.4 единиц электроотрицательности и малыми - $\pm 8\%$ и ± 0.2 единиц электроотрицательности. Изоморфные элементы, расположенные внутри малого эллипса, должны обладать неограниченной растворимостью в рассматриваемом элементе. Ширина областей гомогенности твёрдых растворов с элементами, находящимися внутри большого и малого эллипсов, должна превышать 5%. Растворимость остальных элементов незначительна. В случае полиморфных металлов подобные графики строятся для каждой модификации с соответствующим просчётом атомного радиуса.

Таким образом, построение графика Даркена-Гурри показало, что в благоприятной зоне образования диаграмм состояния с неограниченной областью твёрдых растворов в двойных системах Li не имеется ни одного элемента. В зоне между малым и большим эллипсами находятся три элемента – Mg, Nd и Pu, растворимость которых в литии должна превышать 5%. Находящиеся за пределами эллипсов растворимости элементы должны образовывать ограниченные твёрдые растворы и химические соединения с литием. Учёт влияния электроотрицательностей элементов показал, что с увеличением её разности наблюдается уменьшение области твёрдых растворов и увеличение возможностей образования химических соединений в системах лития с элементами IA-VIIIA и IB-VIB.

На основе перечисленных положений теории образования металлических сплавов и анализа известных диаграмм состояния можно отметить, что литий, взаимодействуя с элементами IIIA группы, образует простые диаграммы состояния с наличием несмешиваемости в жидком состоянии и ограниченной растворимости в твёрдом состоянии.

Для редкоземельных металлов по мере возрастания порядкового номера уменьшается значение размерного фактора, а также уменьшаются различия электрохимических свойств в ряду

электроотрицательности. Отсюда можно ожидать, что весьма ограниченная растворимость Li с редкоземельными элементами в твёрдом состоянии по мере возрастания порядкового номера редкоземельного элемента должна увеличиваться, что связано с явлением лантаноидного сжатия.

Используя методику Воздвиженского нами построен график зависимости температурного и объёмного факторов для Li, согласно которого непрерывные жидкие и твёрдые растворы должны образовываться в системах Li с 16 элементами IIA (Mg), IIIA (Pu, Np), VA (Ta), IIB (Zn, Cd, Hg), IIIB (Al, Ga, In), IVB (Sn, Pb), VB (Sb, Bi), VIB (Se, Te) ПС. Однако для них не выполняется условие изоструктурности, и поэтому ставится под сомнение образование непрерывных твёрдых растворов в системах лития с вышеуказанными элементами.

Образование металлических соединений в системах лития с другими элементами определяется рядом условий, главными из которых являются объёмный фактор, разность электроотрицательностей, а также различие химических свойств взаимодействующих компонентов.

С учётом данных факторов установлено, что образование промежуточных фаз с различными типами структур для систем лития возможно с 10 элементами IVA (Ti, Zr), VA (V), VIIA (Mn), VIIIA (Fe), IIB (Cd, Hg), IIIB (In, Tl), VIB (Po) групп периодической системы. Для лития с элементами I-IIIА групп характерен монотектический тип взаимодействия, где интерметаллические соединения не образуются или взаимодействие между компонентами вовсе отсутствует.

Образование невариантных превращений и невариантных точек в системах лития с другими элементами периодической системы можно предугадывать по значениям температур плавления и объёмного фактора взаимодействующих компонентов.

Установлено, что для систем на основе Li наблюдается большее влияние температурного фактора по сравнению с объёмным фактором. По изменению величины температурного фактора можно проследить гносеологическое развитие вида диаграмм состояния на основе Li. С элементами IIA, IIB-VIIIB групп литий образует сложные диаграммы состояния с эвтектическими и перитектическими реакциями с образованием химических соединений.

Фазовые равновесия, соответствующие перитектическому и эвтектическому значениям (простые системы), образуются в системах лития с 39 элементами IIA (Mg), IIIA (Sc, Y, Ce, Pm, Nd, Sm, Cd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Lu, Th, Pa, U, Np, Pu), IVA (Ti, Zr), VA (V, Ta), VIA (Cr), VIIIA (Rh, Pd, Pt), IB (Ag, Au), IIB (Zn, Cd, Hg), IIIB (Al, Ga), IVB (Ge, Sn), VB (As, Sb), VI (Te) групп ПС.

Системы с инконгруэнтно плавящимися интерметаллидами и перитектическими превращениями образуются между литием с 16 элементами IA (Na, K, Rb, Cs, Fr), IIA (Be, Ca, Sr, Ba, Ra), IIIA (Eu, Yb), IIIB (In) и VIB (S, Se, Po) групп ПС, а с конгруэнтно плавящимися соединениями и эвтектическими превращениями – с 8 элементами IIIA (La, Ac), VIIIA (Fe, Co, Ni), IB (Cu), IVB (Pb), VIIIB (Br) групп ПС.

Следует отметить, что на основании полученных прогнозов с использованием вышеуказанных критериев не возможно однозначно классифицировать системы лития с элементами ПС по типу фазового равновесия. По-видимому, это связано со сложностью их электронного строения, в связи с чем наблюдается малое влияние вышеуказанных критериев на вид взаимодействия в изучаемых системах лития. Например, экспериментально в системах лития с благородными металлами установлено образование интерметаллидов, что, вопреки прогнозу, говорит о полной смешиваемости в жидком состоянии. При учёте же совместного влияния трёх факторов - температурного, объёмного и энтропийного – для систем лития с 9 элементами IA (Na, K, Rb, Cs, Fr) и IIIA (Ho, Er, Tm, Lu) групп ПС установлено полное отсутствие взаимодействия и монотектический тип взаимодействия с перитектическим превращением со стороны легкоплавкого компонента, соответственно, что подтверждает имеющиеся эксперименты.

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЛИТИЯ С ЭЛЕМЕНТАМИ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ЕГО АКТИВНОСТЬ И РАСТВОРИМОСТЬ В ЖИДКОМ АЛЮМИНИИ

Расчёт параметров взаимодействия в системах лития с другими элементами и построение их диаграмм состояния. Оценка взаимодействия лития с другими элементами показывает, что существующие статистические критерии не позволяют провести чёткое разделение диаграмм фазовых равновесий с расслаиванием на системы с монотектическим типом взаимодействия и на системы, где компоненты кристаллизуются из собственных расплавов (они практически не растворимы друг в друге в твёрдом состоянии), что можно оценить с помощью термодинамических представлений.

На основании расчёта и анализа значений энергии взаимообмена (Q_{12} , кДж/г-ат.) установлено, что все системы лития с другими элементами делятся на два различных класса: 1) с энергией взаимообмена $Q_{12} < 0$; 2) с энергией взаимообмена $Q_{12} > 0$.

В соответствии с квазихимической теорией при $Q_{12} < 0$ сплав между компонентами 1-2 может существовать. Вид диаграммы фазового равновесия таких систем характеризуется образованием жидких и твёрдых растворов и наличием промежуточных фаз. К ним относятся системы лития с элементами IIА, I-VIB и VIIA (Mg, Sc, Ti, Mn, Fe, Co, Ni, Mo, Tc, Ru, Rh, Pd, Re, Os, Zr, Pt) и (Cu, Zn, Ga, Ge, As, Se, Ag, Cd, Zn, Sn, Sb, Te, Au, Hg, Pb, Bi) подгрупп периодической системы Д.И. Менделеева.

В случае $Q_{12} > 0$ компоненты 1-2 в системе (литий-элемент) не смешиваются в жидком состоянии. К ним относятся системы лития с элементами: I-IIА (Na, K, Rb, Cs, Be, Ca, Sr, Ba, Ra) и I-VI В (Y, Zr, Nb, La, Ce, Pr, Eu, Yb, Hf, Ta, W, Th, Pa, U, Np, Pu) групп ПС.

Можно показать характерное $Q_{12} > 0$, которое для всего набора видов диаграмм состояния с расслаиванием является недостаточным критерием и носит качественный характер. Для этого в работе нами была использована в качестве дополнительного критерия - степень ближнего порядка (σ_{12}).

Таким образом, на примере систем, включающих литий, было показано, что полному расслаиванию соответствуют значения $Q_{12} > 0$ и $\sigma_{12} \approx -1$ ($\sigma_{12} \neq 0$), а монотектическому равновесию - $Q_{12} > 0$ и $\sigma = 1$.

Используя данный критерий, установлено, что к системам лития, имеющим $Q_{12} > 0$ и $\sigma_{12} = 1$, относятся системы Li с Be, Na, Ca, Sr, Y, Zr, Ba, La, Ce, Pr, Eu, Yb, Hf, Ta, W, Pa, U, Np и Pu (табл.1). Они характеризуются расслаиванием компонентов в жидком состоянии и образованием ограниченных растворов в твёрдом состоянии, т.е. в них проявляется неинвариантное монотектическое равновесие.

К системам лития с другими элементами, имеющим $Q_{12} > 0$ и $\sigma \approx -1$ относятся системы лития с K, Rb, Nb, Cs и Th (табл.1). Это указывает на преобладающее образование обособленных группировок одноименных атомов. В этих системах при охлаждении расплава происходит последовательная кристаллизация каждого из компонентов в зависимости от их температур плавления.

Таблица 1

Значения энергии взаимообмена (Q_{12} , кДж/г-ат.) и степени ближнего порядка (σ_{12} при $T = 1273$ К) для систем литий-элемент, имеющих $Q_{12} > 0$

Система	Q_{12}	σ_{12}	Система	Q_{12}	σ_{12}	Система	Q_{12}	σ_{12}
Li – Be	90.1	0.90	Li – Ce	4.20	0.99	Li – U	74.8	0.99
Li – Na	29.1	0.59	Li – Pr	1.97	0.98	Li – Np	69.3	0.98
Li – Ca	16.0	0.88	Li – Eu	16.2	0.77	Li – Pu	41.6	0.98
Li – Sr	38.4	0.80	Li – Ho	13.9	0.88	Li – K	113	-0.23
Li – Y	2.30	0.99	Li – Hf	143	0.99	Li – Rb	157	-0.66
Li – Zr	13.1	0.65	Li – Ta	24.3	0.86	Li – Nb	91.7	-0.05
Li – Ba	41.3	0.70	Li – W	155	0.97	Li – Cs	207	-0.89
Li – La	6.59	0.99	Li – Pa	56.3	0.99	Li – Th	10.9	-0.99

Сделанные предсказания согласуются с выводами и имеющимися расчётными и экспериментальными данными.

Расчёт взаимной растворимости компонентов в системах Al-РЗМ, Li-РЗМ и построение диаграмм состояния двойных систем с расслаиванием на основе лития. Отсутствие экспериментальных данных по растворимости в системах Al-РЗМ для ряда редкоземельных элементов (имеются сведения лишь для систем алюминия со скандием, самарием, гадолинием, диспрозием, эрбием) побудило нас, используя расчётные методы, восполнить этот пробел. С этой целью были использованы уравнения двухзонной модели твёрдых растворов и получены с помощью ЭВМ значения предельной растворимости компонентов друг в друге как в жидком, так и в твёрдом состояниях для систем Al-РЗМ и Li-РЗМ, которые дают возможность использовать их при изучении трёхкомпонентных систем Al-Li-РЗМ. В системах Li-РЗМ расчёт температур превращений производился по методу Шредера-Ван-Лаара с учётом образования твёрдых и жидких растворов, а координат критического распада в этих системах – по методу Б.П. Бурьлёва.

На основании этих расчётов нами были впервые построены диаграммы состояния лития с редкоземельными металлами, которые представляют собой системы монотектического типа с наличием областей гомогенности.

Во всех системах лития с РЗМ (кроме систем лития с гольмием, эрбием, тулием и лютецием, где образуются перитектические равновесия) со стороны ординаты легкоплавкого компонента наблюдаются эвтектические превращения.

В приближении теории регулярных растворов нами были также рассчитаны и построены диаграммы состояния систем лития с другими щелочными (K, Rb, Cs и Fr) и некоторыми переходными (Nb и Th) металлами. Они характеризуются полной несмешиваемостью компонентов, как в жидком, так и в твёрдом состояниях.

Термодинамическая активность компонентов в двойных и тройных системах Li-РЗМ и Al-Sr-ЩМ. В приближении теории регулярных растворов нами получены уравнения концентрационной зависимости коэффициента активности компонентов в системах литий-РЗМ и показано, что в системах наблюдаются большие положительные отклонения от закона Рауля, а в области низких концентраций обоих компонентов эти отклонения являются небольшими.

В работе получено уравнение зависимости избыточной энергии Гиббса от концентрации в системах Li-РЗМ и показано, что согласно теории сплавообразования сплавление лития с РЗМ происходит со значительным поглощением тепла. Эти данные хорошо согласуются с характером фазового равновесия систем литий-РЗМ. Поэтому их можно рекомендовать для оценки термодинамических свойств сплавов систем литий-РЗМ, для которых отсутствуют результаты экспериментов, а для существующих опытных данных могут служить теоретическим подтверждением.

Для оценки легирующей способности щелочных металлов (ЩМ) в сплавах алюминия со стронцием (эффективным модификатором алюминиевых сплавов) были получены уравнения, которые указывают на сильное химическое взаимодействие между компонентами. Зная энергию смешения компонентов для бинарных систем, составляющих трёхкомпонентную, можно рассчитать влияние третьего компонента на активность двух других.

В результате анализа двойных диаграмм состояния, составляющих тройную систему Al-Sr-ЩМ, получены выражения для расчёта коэффициента активности стронция в тройных сплавах Al-Sr-ЩМ (см.табл.2) при 1273К.

Таблица 2

К расчёту термодинамических свойств в тройных сплавах Sr-Al-ЩМ

Система Sr-Al-ЩМ	Q ₁₃	Q ₂₃	Уравнения
	кДж/г-ат.		
Sr-Al-Li	37.6	-71.4	$\lg a_{Sr} = \lg x_{Sr} + 3.61x_{Li} - 4.19x_{Li}^2$
Sr-Al-Na	-12.7	24.4	$\lg a_{Sr} = \lg x_{Sr} + 3.09x_{Na} - 1.40x_{Na}^2$
Sr-Al-K	8.40	253	$\lg a_{Sr} = \lg x_{Sr} + 15.1x_K - 14.2x_K^2$
Sr-Al-Rb	22.7	383	$\lg a_{Sr} = \lg x_{Sr} + 21.6x_{Rb} - 22.6x_{Rb}^2$
Sr-Al-Cs	26.5	512	$\lg a_{Sr} = \lg x_{Sr} + 28.5x_{Cs} - 29.4x_{Cs}^2$

Результаты анализа и расчётов по полученным уравнениям с учётом $a = f \cdot x$ для 1273К показали, что при добавке ЩМ, кроме лития, наблюдается небольшое влияние их на активность

стронция в алюминиевом расплаве. Однако, при добавке лития в расплав наблюдается резкое увеличение активности стронция.

Влияние редкоземельных металлов на коэффициент активности и растворимость лития в жидком алюминии. В приближении теории регулярных растворов получены уравнения и рассчитаны зависимости коэффициента активности лития от концентрации третьего (легирующего) компонента в тройном расплаве алюминия при температуре эвтектики 875К. При этом показано, что активность Li в Al в присутствии РЗМ повышается, т.к. РЗМ имеют большее сродство к алюминию нежели к литию.

На основе проведенной оценки термодинамических свойств сплавов лития, стронция и алюминия с ЦМ и РЗМ следуют очень важные практические выводы:

1) при использовании ЦМ - только Li и РЗМ (кроме европия и иттербия) имеют значение в качестве легирующих компонентов лёгких литейных алюминиевых сплавов, содержащих ЦЗМ;

2) для легирования, модифицирования и раскисления литейных алюминиевых сплавов использование комплексных тройных лигатур Al-Sr-Li и Al-Li-РЗМ должны показать лучшие результаты, чем использование двойных лигатур из сплавов Al-Sr и Al-Li, так как активность стронция и лития в расплавах тройных систем выше, чем в двойных, соответственно.

Влияние редкоземельных металлов на растворимость лития в жидком алюминии. Получены уравнения, позволяющие рассчитывать кривые равновесия жидкого алюминия с литием в трёхкомпонентных системах Al-Li-РЗМ.

Полученные зависимости показывают, что редкоземельные металлы (кроме европия и иттербия) понижают его растворимость в алюминии. Эти металлы при взаимодействии с литием образуют диаграммы состояния с разрывом растворимости в жидком состоянии, а элементы европий и иттербий, являющиеся кристаллохимическими аналогами ЦЗМ, повышают растворимость лития в жидком алюминии. Имеющиеся в литературе экспериментальные данные подтверждают сделанные нами выводы.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИАГРАММЫ СОСТОЯНИЯ, МЕХАНИЧЕСКИХ И АКУСТОДЕМПФИРУЮЩИХ СВОЙСТВ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ Al-Li-Gd

Исходные материалы. Методика приготовления сплавов. Сплавы для исследования получали прямым сплавлением компонентов в среде инертного газа (гелия) под давлением 0.5 МПа на установке марки ВДТА-8М конструкции Института металлофизики АН Республики Украина с использованием корундовых тиглей.

Преимуществом данного метода является то, что он позволяет получать сплавы в одну стадию и, главное, до проведения дифференциального термического анализа (ДТА), исключается какой-либо их контакт с воздухом. Синтез сплавов на установке ВДТА даёт возможность следить за термическим процессом, который происходит при взаимодействии чистых компонентов между собой.

Взвешивание шихты (весом 10 г) производили на лабораторных весах марки ВЛК-500 с точностью до 0.05 г по результатам расчёта. Сплавы исследуемой системы были приготовлены из металлов следующей чистоты: алюминий – 99.995%, А995; литий – 98.0%, Л-1; гадолиний – 99.7%, ГаМ-2.

Полученные таким образом сплавы подвергались микроструктурному, дифференциально-термическому и рентгенофазовому анализам.

Для изучения механических и демпфирующих свойств алюминиево-литиевые (6 % лития) сплавы, легированные гадолинием, получали в шахтных лабораторных печах сопротивления типа СШОЛ в интервале температур 700-900°С из

алюминия марки А8 с добавлением алюминиево-литиевой лигатуры (6 % лития) и гадолиния чистотой 99.7 % (по массе). Лигатура предварительно синтезировалась в вакуумной печи сопротивления типа СНВ.

Далее из полученных сплавов отливали в графитовую изложницу образцы с круглым сечением диаметром 10 мм и длиной 40 мм (для механических испытаний) и образцы в виде

пластинки прямоугольной формы размером 50×50×5 мм (для испытания акустодемпфирующих свойств). Полученные таким образом образцы подвергались механической обработке резанием и доводились до размера: диаметр рабочей части $d_0 = 6$ мм и длина рабочей части $L_0 = 10 \times d_0$ по ГОСТ 1497-84.

Методика исследования микроструктуры, дифференциально-термического анализа и демпфирующей способности сплавов. Микроструктуры сплавов системы Al-Li-Gd исследовались на металлографическом микроскопе «Neophot-21» при 100-400 кратном увеличении.

Для выявления структуры образцы подвергались травлению различными травителями в зависимости от состава сплавов. Образцы с большим содержанием алюминия травились смесью трёх кислот: фтористо-водородной (5 мл), соляной (2 мл) и азотной (4 мл) на 100 мл дистиллированной воды.

С целью выявления фазовых переходов и построения поверхности ликвидуса проводили дифференциально-термический анализ сплавов. ДТА проводили на установке ВДТА-8М с использованием корундовых тиглей в среде гелия марки ВЧ с содержанием основного газа 99.985 об. % и кислорода не более 0.002 об. %.

В качестве датчика температуры использовали вольфрам-вольфрам-ренийевые (W/W+20%Re) термодпары. Термограммы записывались в координатах «температура образца» – «разность температур образца и эталона».

В качестве регистрирующего прибора использовали двухкоординатный самопишущий потенциометр типа ПДС-021М. Линейное повышение и понижение температуры печи установки осуществляли электронным программным устройством Р-133.

Скорость нагрева и охлаждения в зависимости от состава сплава варьировали в пределах от 20 до 40 град. в мин., давление инертного газа в камере - $(0.02-3.03) \cdot 10^5$ Па.

При рентгенофазовом анализе отожжённые образцы исследовали методом порошка. Дифрактограммы снимали на рентгеновском дифрактометре ДРОН-1.5 с использованием медного К- α излучения. Порошок сплава для исследования изготавливали в агатовой ступке под вакуумным маслом ВМ-1. После приготовления каждого образца для удаления пыли и жира промывали ступку ацетоном, а затем спиртом. При анализе дифрактограмм учитывали относительную интенсивность линий.

Для определения акустодемпфирующих свойств исследуемых сплавов использовалась установка ТТУ-1 - прототип установки МИСиС-2, разработанная профессором Хакдоковым М.М.

Надёжность экспериментальных данных обеспечивалась постоянством формы и размеров образцов. Толщина пластины должна быть не менее чем в пять раз меньше других размеров. Применявшиеся образцы отвечали этому условию. Звукоизлучение возбуждённого образца фиксировалось микрофонным капсулом МК-102, расположенным под центром образца на расстоянии 100 мм, что обусловлено допустимым соотношением между прямыми и отражёнными сигналами, которые должны равняться 10:1.

Исследование фазового равновесия системы Al-Li-Gd. Для установления фазового равновесия в системе Al-Li-Gd (рис. а) нами предварительно рассматривалось строение квазибинарной системы $Al_2Gd-AlLi$. При этом использовали как расчётные, так и экспериментальные методы исследования.

Для расчёта положения эвтектической точки и линии ликвидуса использовалось уравнение Шредера-Ван-Лаара. В целях применения данного уравнения нами экспериментально были определены выборочно температуры превращений в тройной системе. Сплавы для исследования получали из чистых металлов. Химический состав расположения экспериментальных точек приведён в табл. 3.

Процесс взаимодействия компонентов между собой начинался при 580°C и продолжался до 1300°C (для составов $Al_{62,5}Li_{12,5}Gd_{25}$). С увеличением количества лития в составе сплавов наблюдалось сужение температурного интервала взаимодействия от 720°C до 100°C. По-видимому, это связано с химической активностью этих металлов.

Химический состав некоторых сплавов системы
алюминий-литий-гадолиний

Содержание компонентов в сплаве							
мол.%		ат.%			% (по массе)		
Al ₂ Gd	AlLi	Al	Li	Gd	Al	Li	Gd
75	25	62.5	12.5	25.0	54.3	42.3	3.4
50	50	58.3	25.0	16.7	37.0	61.2	1.8
25	75	54.2	37.5	8.30	27.0	72.2	0.8
15	85	52.5	42.5	5.00	24.1	75.4	0.5
10	90	51.7	45.0	3.30	22.8	76.8	0.4
5,0	95	50.8	47.5	1.70	21.6	78.1	0.3
1,0	99	50.2	49.5	0.30	20.8	79.1	0.1

По расчётным данным эвтектика сплава содержит 99.4 моль.% AlLi и 0.6 моль.% Al₂Gd. Результаты термического анализа сплавов системы AlLi-Al₂Gd подтверждаются данными их металлографического исследования.

Полная диаграмма состояния сплавов системы Al-Li-Gd не построена. По результатам рентгенофазового анализа составов сплавов в части диаграммы состояния богатой алюминием, которые приведены в табл.4, установлено, что в системе с алюминиевым твёрдым раствором в равновесии находятся интерметаллические соединения Al₃Gd, Al₂Gd и AlLi.

В результате дифференциального и микроструктурного анализов изучен и построен политермический разрез Al₂Gd-AlLi (рис. б). Это позволило нам построить проекцию поверхности ликвидуса системы Al-Al₂Gd-AlLi (рис. в). Координаты неинвариантных равновесий системы Al-Al₂Gd-AlLi приведены в табл. 5.

Таблица 4

Химический и фазовый составы сплавов системы Al-Al₂Gd-AlLi

№/№ п/п	Химический состав						Фазовый состав
	ат.%			% (по массе)			
	Al	Li	Gd	Al	Li	Gd	
1	75.0	10.0	15.0	64.6	33.2	2.2	αAl + Al ₃ Gd + AlLi
2	65.0	10.0	25.0	60.3	35.7	4.0	Al ₃ Gd + AlLi
3	61.0	10.0	29.0	58.3	36.9	4.8	Al ₃ Gd + Al ₂ Gd + AlLi
4	56.7	10.0	33.3	56.1	38.2	5.7	Al ₂ Gd + AlLi

Исследование влияния гадолиния на механические и акустодемпфирующие свойства алюминиево-литиевых сплавов. Испытание образцов алюминиево-литиевых сплавов, легированных гадолинием, производили на разрывной машине типа Р-5 в пределах измерения 1000-10000 кгс. Машина Р-5 предназначена для испытания образцов из металлов на растяжение по ГОСТ 1497-81, а также на сжатие и изгиб по требованиям ГОСТ 7855-84.

Характеристики невариантных равновесий
в системе Al- Al₂Gd-AlLi

Нонвариантные точки	Равновесие	Концентрация компонентов, ат.%			Температура, °С
		Al	Li	Gd	
e ₁	Ж ↔ Al + Al ₂ Gd	98.0	-	2.00	650
e ₂	Ж ↔ Al + AlLi	73.7	26.3	-	596
e ₃	Ж ↔ AlLi + Al ₂ Gd	50.2	49.64	0.16	695
E ₁	Ж ↔ Al + AlLi + Al ₂ Gd	70.0	28.5	1.50	590
P ₁	Ж + Al ₂ Gd ↔ AlLi + Al ₃ Gd	60.0	37.5	2.50	640

Конструкция машины выполнена по принципу разрывных машин с электромеханическим приводом активного захвата и рычагомаятниковым силоизмерителем. Данные, полученные при испытании механических свойств сплавов, приведены в табл. 6, из которой видно, что добавка 6% (по массе) лития резко повышает механические свойства алюминия.

Отмечен рост прочности. Относительное удлинение при этом уменьшилось. Твёрдость сплава увеличилась, т.к. этот показатель изменяется прямопропорционально величине прочности.

Таблица 6

Механические и акустодемпфирующие свойства алюминиево-литиевых [6 % (по массе) Li] сплавов, легированных гадолинием

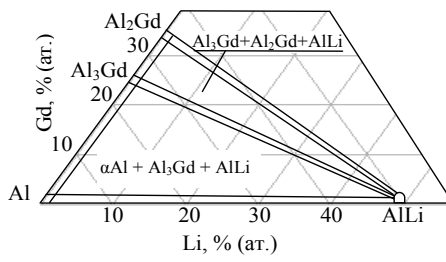
Содержание гадолия, % (по массе)	σ _B , МПа	δ, %	НВ	Скорость затухания звука, дБ/мс
100% Al	48.1	49.0	15-17	-
Al + 6%Li	52.5	45.0	22.0	5.97
0.005 Gd	55.4	43.0	28.0	6.36
0.025 Gd	67.1	31.6	42.8	7.38
0.050 Gd	76.3	23.8	52.0	7.85
0.075 Gd	70.0	25.5	51.5	7.35
0.100 Gd	62.0	31.5	46.5	6.60

Микродобавки гадолия до 0.05% (по массе) положительно влияют на механические свойства алюминиево-литиевых сплавов, а дальнейшие концентрации снижают отдельные показатели свойств.

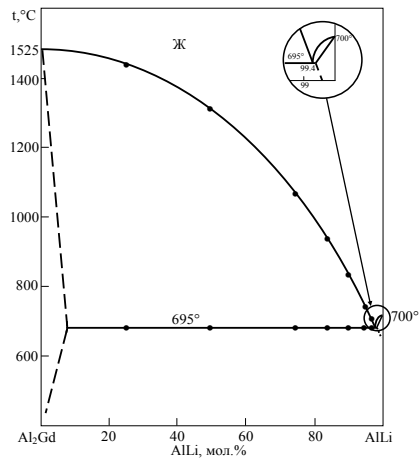
В качестве характеристики демпфирующей способности алюминиево-литиевых сплавов, легированных гадолинием, измеряли скорость затухания звука, пропорциональную коэффициенту потерь при ударном возбуждении образца. Результаты исследования приведены в табл. 6.

Проведён анализ зависимости акустодемпфирующих и механических свойств от содержания гадолия в алюминиево-литиевых сплавах. В результате установлено, что сплавы с максимальными значениями механических и акустодемпфирующих свойств приходятся на оптимальный состав: 6 % (по массе) Li; 0.050 % (по массе) Gd; остальное – Al.

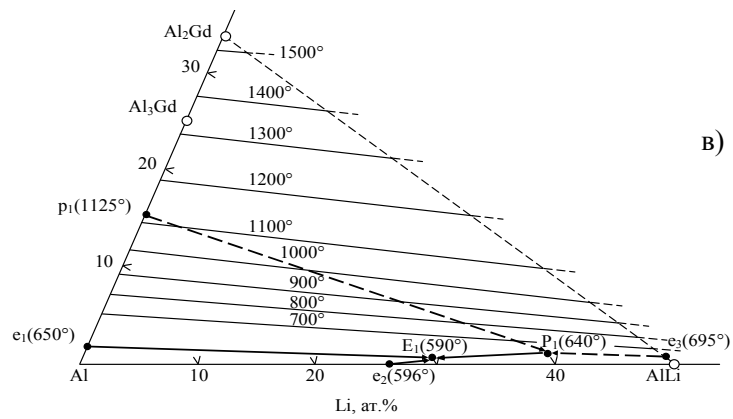
Таким образом, получены оптимальные составы сплавов системы Al-Li-Gd с высокими акустодемпфирующими и механическими свойствами. Они составили: для лития - 6 % (по массе); для гадолия 0.025-0.050 % (по массе) и для алюминия – 93.975-93.95 % (по массе).



а)



б)



в)

Рис. Фазовое равновесие в системе Al-Li-Gd при 400°C (а), политермическое сечение сплавов системы Al₂Gd-AlLi (б) и проекция поверхности ликвидуса сплавов системы Al-AliLi-Al₂Gd (в)

ВЫВОДЫ

1. Составлена систематическая таблица по методу Корнилова И.И., в которой приведены сведения о взаимодействии лития с 91-им элементом периодической системы. Установлено, что полностью построено 33 диаграммы состояния на основе лития, что составляет всего 35 % от их общего количества.
2. Выявлены общие закономерности взаимодействия лития с элементами ПС и установлено, что литий не образует диаграмм состояния с неограниченной растворимостью ни с одним элементом; с элементами I, IV-VIIA групп, а также Be и Ni наблюдается полное отсутствие взаимодействия; с элементами IIA, VIIA и I-VIB групп литий образует ограниченные твёрдые растворы, механические смеси и химические соединения.
3. Впервые рассчитаны параметры взаимодействия (энергия взаимообмена, энергия связи одноимённых и разноимённых частиц, а также степень ближнего порядка) лития с элементами периодической системы.
4. Впервые построена 21 расчётная диаграмма состояния двойных систем на основе лития с применением уравнений двухзонной модели и теории регулярных растворов.
5. Получены уравнения и рассчитаны термодинамическая активность и растворимость компонентов в двойных и тройных системах Li-ЩМ, Al-ЩМ, Li-PЗМ, Al-ЩМ-ЩМ и Al-Li-PЗМ в приближении теории регулярных растворов.
6. Экспериментально изучено фазовое равновесие в системе Al-AlLi-Al₂Gd, построены квазибинарная диаграмма состояния AlLi-Al₂Gd и поверхность ликвидуса тройной системы Al-AlLi-Al₂Gd.
7. Получены оптимальные составы сплавов системы Al-Li-Gd с высокими акустодемпфирующими и механическими свойствами, которые составили: для лития - 6 % (по массе); гадолиния - 0.025-0.050 % (по массе) и алюминия – 93.975-93.950 % (по массе).

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ ОТРАЖЕНЫ В СЛЕДУЮЩИХ ПУБЛИКАЦИЯХ:

1. Джураев Т.Д., Муслимов И.Ш. Расчет параметров взаимодействия и диаграмм фазового равновесия лития с элементами периодической системы / Материалы Международной конференции, посвящённой 80-летию Сулейманова А. Душанбе, 1998. С. 67.
2. Джураев Т.Д., Ганиев И.Н., Муслимов И.Ш. Взаимная предельная растворимость РЗМ и лития в твердом и жидком состояниях / Материалы Международной конференции, посвящённой 80-летию Сулейманова А. Душанбе, 1998. С. 71.
3. Джураев Т.Д., Муслимов И.Ш., Бобоев К.С. Оценка взаимодействия лития с элементами периодической системы Д.И.Менделеева в жидком состоянии / Материалы научно-практической конференции, посвящённой 40-летию химического факультета ТГНУ и 65-летию профессора Якубова Х.М. Душанбе, 1999. С. 32-33.
4. Джураев Т.Д., Муслимов И.Ш., Викторова А.В. Расчет координат критического распада на диаграммах состояния систем литий-РЗМ / Материалы научно-практической конференции, посвящённой 40-летию химического факультета ТГНУ и 65-летию профессора Якубова Х.М. Душанбе, 1999. С. 37-38.
5. Муслимов И.Ш. Особенности взаимодействия лития с элементами периодической системы Д.И.Менделеева / Материалы конференции молодых учёных "Химия в начале XXI века", посвящённой 80-ти летию академика АН РТ М.С.Осими. Душанбе, 2000. С.19.
6. Джураев Т.Д., Муслимов И.Ш. Оценка параметров и видов взаимодействия лития с элементами Периодической системы Д.И.Менделеева / Материалы республиканской конференции "Достижения в области химии и химической технологии". Душанбе, 2002. С.44-46.
7. Джураев Т.Д., Муслимов И.Ш., Ганиев И.Н., Назаров Х.М. Система алюминий-литий-гадолиний в области, богатой алюминием // Вестник Педагогического университета. Душанбе, 2002. С.61-64.
8. Джураев Т.Д., Муслимов И.Ш., Ганиев И.Н. Оценка легирующей способности щелочных металлов в сплавах алюминия со стронцием // Доклады АН Республики Таджикистан, 2002. Т. 45, № 1-2. С.55-59.
9. Джураев Т.Д., Муслимов И.Ш., Набиев З.Ш. Диаграммы состояния несмешивающихся систем на основе лития / Материалы I Международной научно-технической конференции "Генезис, теория и технология литых сплавов". Владимир, 2002. С.178-180.
10. Джураев Т.Д., Муслимов И.Ш. Разновидности диаграмм состояния расслаивающихся систем на основе лития / Материалы Международной научно-практической конференции "16 сессия Шурои Оли Республики Таджикистан (12 созыва) и ее историческая значимость в развитии науки и образования". Душанбе, 2002. С. 108.
11. Джураев Т.Д., Муслимов И.Ш., Газизова Э.Р., Набиев З.Ш. О диаграммах состояния систем лития с другими щелочными металлами / Материалы Межвузовской научно-практической конференции "Достижения в области металлургии и машиностроения РТ", Душанбе, 2004. С.72-74.
12. Джураев Т.Д., Муслимов И.Ш., Газизова Э.Р. О диаграммах фазового равновесия лития с другими щелочными металлами // Доклады АН Республики Таджикистан, 2005. Т. 48, № 2. С.42-45.
13. Джураев Т.Д., Муслимов И.Ш., Газизова Э.Р. Диаграммы состояния расслаивающихся систем на основе лития с ниобием и торием / Материалы II Международной научно-практической конференции «Перспективы развития науки и образования в XXI веке». Душанбе: ЭР-граф, 2006. С. 278-280.
14. Джураев Т.Д., Муслимов И.Ш., Сангинов Д.Г. Статистический прогноз и расчёт диаграмм состояния расслаивающихся систем на основе лития с некоторыми редкоземельными металлами // Вестник Таджикского технического университета. Душанбе, 2011, № 1 (13). С.61-64.
15. Муслимов И.Ш., Ганиева Н.И., Джураев Т.Д., Газизова Э.Р., Акрамов М.Б. Термодинамическая оценка взаимодействия лития с элементами периодической системы Д.И.Менделеева / Материалы Республиканской научно-методической конференции, посвящённой «Году образования и технических знаний» и 70-летию заведующего кафедрой «Теоретическая и экспериментальная физика» ТГПУ имени С.Айни к.т.н., доцента Нуриддинова Зиёдулло. Душанбе, 2010. С.151-154.

Разрешено к печати 26.01.2011 г. Сдано в печать 10.02.2011 г.
Бумага офсетная. Формат А5. Печать на ризографе. Заказ № 62/11. Тираж 100 экз.

ООО «Новые системы и технологии», Полиграфия «Vector»
734025, Таджикистан, г. Душанбе, ул. Турдыева-26
Тел.: +992 (37) 227 33 55, (44) 601 33 55