

На правах рукописи



ЖУМАЕВ МАЪРУФЖОН ТАГОЙМУРОТОВИЧ

**ФАЗОВЫЕ РАВНОВЕСИЯ И РАСТВОРИМОСТЬ В
СИСТЕМЕ Na, Ca//SO₄, CO₃, HCO₃-H₂O ПРИ 0 И 25°C**

02.00.01 - неорганическая химия

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

**диссертации на соискание ученой
степени кандидата химических наук**

ДУШАНБЕ – 2018

Работа выполнена на кафедре «Общая и неорганическая химия»
Таджикского государственного педагогического университета им. С. Айни

Научный руководитель: **Солиев Лутфулло,**
заслуженный деятель науки и техники РТ,
доктор химических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Рахимова Мубаширхон,**
доктор химических наук, профессор
кафедры физической и коллоидной химии
Таджикского национального университета

Сабуров Мухидин Икромович,
кандидат химических наук, доцент кафедры
общей химии и методики её преподавания
Худжандского государственного
университета им. академика Б. Гафурова

Ведущая организация: Кафедра общей и неорганической химии
Таджикского технического университета
им. академика М. Осими

Защита диссертации состоится **«22» августа 2018** г. в **11⁰⁰** часов на
заседании диссертационного совета Д 047.003.03 при Институте химии им.
В.И. Никитина АН Республики Таджикистан по адресу: 734063, г. Душанбе,
ул. Айни, 299/2. E-mail: dissovet@ikai.tj

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института химии
В.И. Никитина Академии наук Республики Таджикистан и на сайте
Института химии им. В.И.Никитина АН Республики Таджикистан
www.chemistry.tj

Автореферат разослан « _____ » _____ 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат химических наук



Усманова С.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Многокомпонентные системы лежат в основе многих природных и технических объектов, являющихся предметом исследования химии, петрологии, минералогии, металлургии и других наук. Известным приёмом исследования многокомпонентных химических систем является физико-химический анализ, который позволяет устанавливать взаимодействие между их составными частями (компонентами) с последующим построением их диаграмм состояния.

Изучение сложных водно-солевых систем является одной из актуальных задач неорганической химии. Оно необходимо для установления закономерностей состояния фазовых равновесий и растворимости в них, которые определяют оптимальные условия переработки полиминерального природного и сложного технического сырья.

Данная диссертационная работа, кроме научно-теоретического значения полученных результатов, имеет большое прикладное значение. Они необходимы для разработки оптимальных условий переработки природного и технического сырья, содержащего сульфаты, карбонаты, гидрокарбонаты натрия и кальция, в том числе жидких отходов производства алюминия.

Диссертационная работа выполнена согласно плану НИР «Определение фазовых равновесий в многокомпонентной системе из сульфатов, карбонатов, гидрокарбонатов, фторидов натрия и кальция» (№ ГР 0114ТJ00343).

Целью данной работы является определение возможных фазовых равновесий в пятикомпонентной системе $\text{Na,Ca//SO}_4,\text{CO}_3,\text{HCO}_3\text{-H}_2\text{O}$, составляющих её четырёхкомпонентных систем при 0 и 25 °С, построение их замкнутых фазовых диаграмм методом трансляции и изучение растворимости в их инвариантных точках.

Для достижения поставленной цели были решены следующие **задачи**:

- определено состояние изученности исследуемой пятикомпонентной и составляющих её четырёх- и трёхкомпонентных систем;
- на основании данных о фазовых равновесиях в трёх- и четырёхкомпонентных системах, с использованием метода трансляции, определены фазовые равновесия в составляющих четырёх- и пятикомпонентной системах с последующим построением их диаграмм фазовых равновесий;
- построенные диаграммы фрагментированы по областям кристаллизации отдельных фаз (для четырехкомпонентных систем) и совместной кристаллизации двух фаз (для пятикомпонентной системы);
- по результатам экспериментального определения растворимости построены диаграммы исследованных четырёхкомпонентных систем.

Научная новизна:

- с использованием метода трансляции определены возможные фазовые равновесия в пятикомпонентной системе $\text{Na,Ca//SO}_4,\text{CO}_3,\text{HCO}_3\text{-H}_2\text{O}$, составляющих её четырёхкомпонентных системах: $\text{Na}_2\text{SO}_4\text{-Na}_2\text{CO}_3\text{-NaHCO}_3\text{-H}_2\text{O}$; $\text{CaSO}_4\text{-CaCO}_3\text{-Ca(HCO}_3)_2\text{-H}_2\text{O}$; $\text{Na,Ca//SO}_4,\text{CO}_3\text{-H}_2\text{O}$; $\text{Na,Ca//SO}_4,\text{HCO}_3\text{-H}_2\text{O}$ и $\text{Na,Ca//CO}_3,\text{HCO}_3\text{-H}_2\text{O}$ при 0 и 25 °С с последующим построением их замкнутых фазовых диаграмм;
- построенные диаграммы фазовых равновесий фрагментированы по областям кристаллизации отдельных равновесных фаз (для четырехкомпонентного уровня) и совместной кристаллизации двух фаз (для пятикомпонентного уровня);
- изучена растворимость в системах: $\text{CaSO}_4\text{-CaCO}_3\text{-Ca(HCO}_3)_2\text{-H}_2\text{O}$; $\text{Na}_2\text{SO}_4\text{-Na}_2\text{CO}_3\text{-NaHCO}_3\text{-H}_2\text{O}$; $\text{Na,Ca//SO}_4,\text{CO}_3\text{-H}_2\text{O}$; $\text{Na,Ca//CO}_3,\text{HCO}_3\text{-H}_2\text{O}$ при 0 и 25 °С; на основании полученных данных впервые построены их диаграммы.

Практическая значимость работы:

- обнаруженные с использованием метода трансляции фазовые равновесия могут служить справочным материалом;
- установленные закономерности фазовых равновесий могут быть научной основой для разработки оптимальных условий переработки природного полиминерального и технически сложного сырья (отходов производства), содержащих сульфаты, карбонаты, гидрокарбонаты натрия и кальция.

Выносимые на защиту основные положения диссертационной работы:

- результаты определения фазовых равновесий в четырехкомпонентных системах $\text{Na}_2\text{SO}_4\text{-Na}_2\text{CO}_3\text{-NaHCO}_3\text{-H}_2\text{O}$; $\text{CaSO}_4\text{-CaCO}_3\text{-Ca(HCO}_3)_2\text{-H}_2\text{O}$; $\text{Na,Ca//SO}_4,\text{CO}_3\text{-H}_2\text{O}$; $\text{Na,Ca//SO}_4,\text{HCO}_3\text{-H}_2\text{O}$ и $\text{Na,Ca//CO}_3,\text{HCO}_3\text{-H}_2\text{O}$ при 0 и 25 °С методом трансляции, а также строения их диаграммы;
- результаты определения фазовых равновесий в пятикомпонентной системе $\text{Na,Ca//SO}_4,\text{CO}_3,\text{HCO}_3\text{-H}_2\text{O}$ при 0 и 25 °С; методом трансляции, а также строения её диаграммы;
- результаты изучения растворимости в четырехкомпонентных системах: $\text{CaSO}_4\text{-CaCO}_3\text{-Ca(HCO}_3)_2\text{-H}_2\text{O}$; $\text{Na}_2\text{SO}_4\text{-Na}_2\text{CO}_3\text{-NaHCO}_3\text{-H}_2\text{O}$; $\text{Na,Ca//SO}_4,\text{CO}_3\text{-H}_2\text{O}$; $\text{Na,Ca//CO}_3,\text{HCO}_3\text{-H}_2\text{O}$ при 0 и 25°С, а также строения их диаграммы.

Апробация работы. Основное содержание диссертационной работы докладывалось на: ежегодных научно-теоретических конференциях профессорско - преподавательского состава Таджикского государственного педагогического Университета им. С. Айни (Душанбе, - 2009-2017); Международной конференции посвященной 60 – летию Академии наук республики Таджикистан (Душанбе, 2011); Международной конференции «Химическая термодинамика и кинетика». (Донецк, 2012); Республиканской конференции «Комплексообразование в растворах» (Душанбе, 2012); Республиканской научной конференции «Химия, технология и экология воды», посвящённая году «Сотрудничество по водной проблеме» и 55-летию кафедры «Общая и неорганическая химия» ТГПУ им. С.Айни (Душанбе, 2013); VI Международной конференции «Современные проблемы физической химии» (Донецк, 2013); Международной конференции «Экологобезопасные и ресурсосберегающие технологии и материалы» (Улан – Уде, 2014); Международной конференции «Теплофизические исследования и измерения при контроле качества веществ, материалов и изделия» (Душанбе, 2014); Научной конференции «Актуальные проблемы современной науки» (Душанбе-Тамбов, 2015); Междунар. Научно – практическая конференция «Посвященной 1150 – летию персидско-таджикского учёного-энциклопедиста, врача, алхимика и философа Абу Бакра Мухаммада ибн Закария Рази». -Душанбе. 2015; Международной конференции «Экологобезопасные и ресурсосберегающие технологии и материалы» (Улан – Уде, 2015); VI Международной научно-практической конференции «Современные тенденции развития науки и технологии» (Белгород, 2015); Международной научно-практической конференции «Научные исследования и разработки в эпоху глобализации» (Киров, 2016); II Всероссийской молодёжной конференции – школы с международным участием. «Достижения химии в агропромышленном комплексе» (Уфа, 2016); XI Международное Курнаковское совещание по физико-химическому анализу в рамках XX Менделеевского съезда по общей и прикладной химии (Воронеж, 2016); Международной конференции «Термический анализ и калориметрии (Санкт-Петербург, 2016); «II Байкальский материаловедческий форум», (Улан-Уде, 2017).

Публикации. По материалам диссертационной работы опубликовано 37 работ в т.ч. 22 статьи в журналах, рекомендованных ВАК РФ и 15 тезисов докладов.

Личный вклад автора. Личный вклад автора состоит в анализе литературных данных, планировании и проведении теоретических и экспериментальных исследований, обработке, обобщении и анализе полученных результатов, формулировании выводов, подготовке и публикации научных статей.

Объём и структура диссертационной работы. Диссертация представляет собой рукопись, изложенную на 141 страницах компьютерного набора, состоит из введения, 4-х глав и выводов, содержит 47 рисунков и 40 таблиц, список цитируемой литературы включает 102 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснованы актуальность темы, цели и задачи исследования, раскрыто основное содержание диссертационной работы.

В первой главе рассмотрены основные методы исследования многокомпонентных систем, состояние изученности пятикомпонентной системы $\text{Na, Ca//SO}_4, \text{CO}_3, \text{HCO}_3\text{-H}_2\text{O}$, составляющих её четырёх- и трехкомпонентных систем.

Во второй главе приведены результаты исследования пятикомпонентной системы $\text{Na, Ca//SO}_4, \text{CO}_3, \text{HCO}_3\text{-H}_2\text{O}$, составляющих её четырёхкомпонентных систем методом трансляции при 0 °С.

В третьей главе приведены результаты исследования пятикомпонентной системы $\text{Na, Ca//SO}_4, \text{CO}_3, \text{HCO}_3\text{-H}_2\text{O}$, составляющих её четырёхкомпонентных систем методом трансляции при 25 °С.

Четвёртая глава посвящена изучению методом растворимости четырехкомпонентных систем: $\text{CaSO}_4\text{-CaCO}_3\text{-Ca(HCO}_3)_2\text{-H}_2\text{O}$; $\text{Na}_2\text{SO}_4\text{-Na}_2\text{CO}_3\text{-NaHCO}_3\text{-H}_2\text{O}$; $\text{Na, Ca//SO}_4, \text{CO}_3\text{-H}_2\text{O}$; $\text{Na, Ca//CO}_3, \text{HCO}_3\text{-H}_2\text{O}$ при 0 и 25°С.

Диссертационная работа завершается общими выводами и списком цитированной литературы.

Приняты следующие условные обозначения: Мб - мирабилит $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$; СаГ - кальций гидрокарбонат $\text{Ca(HCO}_3)_2$; Гб - глауберит $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot \text{CaSO}_4$; Гп - гипс $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$; Нх – нахколит NaHCO_3 ; Тр – трона $\text{NaHCO}_3 \cdot \text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$; Гл – гейлюссит $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$; Сц – кальцит CaCO_3 ; С·10 - $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$.

1. Методы исследования многокомпонентных систем

Закономерности фазовых равновесий в химических системах являются теоретической основой всех технологических процессов, связанных с переработкой природного и технического сырья. Основным методом изучения химических систем является физико-химический анализ, позволяющий устанавливать взаимодействие между их составными частями (компонентами) с последующим построением соответствующих диаграмм состояния (растворимости, плавкости) или диаграмм фазовых равновесий (фазовых комплексов). Системы, содержащие до четырёх компонентов, изображаются геометрическими фигурами в пространстве трёх измерений, то есть фигурами реального пространства. При увеличении числа компонентов более четырёх для изображения системы фигуры трехмерного пространства не приемлемы.

Следует отметить, что с увеличением числа компонентов растёт также и число геометрических образов: невариантных точек, моновариантных кривых, дивариантных полей. Изобилие геометрических образов в системе приводит к уменьшению различия в составе равновесной жидкой фазы, что усложняет их экспериментальное определение. Увеличение числа компонентов в химических

системах, также усложняет их диаграммы и становится невозможным их изображение в области всего состава системы на одном чертеже.

В методологии физико-химического анализа многокомпонентных систем существует ряд основных направлений (триангуляции, сингулярных звёзд, фазовых единичных блоков, минимизации термодинамического потенциала, графоаналитических и др.). Однако, все они имеют ограничения в своём применении, связанные с размерностью геометрических фигур реального пространства, необходимости образования новых фаз, наличия математического аппарата для точных термодинамических расчётов и т. д. Вместе с тем, в связи с введением в теорию и практику физико-химического анализа принципа совместимости, появились новые возможности исследования фазовых равновесий в многокомпонентных системах.

Согласно принципу совместимости при построении диаграмм фазовых равновесий (фазовых комплексов) имеет место совмещение элементов строения n и $(n+1)$ компонентных систем в одной диаграмме. Исходя из принципа совместимости и свойств геометрических образов n -компонентных систем, увеличивать свою размерность при переходе в $(n+1)$ компонентную, разработан широко известный и апробированный метод прогнозирования фазовых равновесий в многокомпонентных системах - метод трансляции. Согласно этому методу геометрические образы n компонентных систем, транслируясь на уровень $(n+1)$ компонентного состава, трансформируются и, согласно законам топологии, с соблюдением правила фаз Гиббса, взаимно пересекаясь, образуют элементы строения системы на этом уровне компонентности.

Нами для исследования фазовых равновесий в пятикомпонентной системе $\text{Na,Ca//SO}_4,\text{CO}_3,\text{HCO}_3\text{-H}_2\text{O}$ и составляющих её четырёхкомпонентных систем использован метод трансляции.

2. Пятикомпонентная система $\text{Na,Ca//SO}_4,\text{CO}_3,\text{HCO}_3\text{-H}_2\text{O}$ и состояние её изученности при 0 и 25 °С

Исследуемая пятикомпонентная система включает следующие четырёхкомпонентные: $\text{Na}_2\text{SO}_4\text{-Na}_2\text{CO}_3\text{-NaHCO}_3\text{-H}_2\text{O}$; $\text{CaSO}_4\text{-CaCO}_3\text{-Ca(HCO}_3)_2\text{-H}_2\text{O}$; $\text{Na,Ca//SO}_4,\text{CO}_3\text{-H}_2\text{O}$; $\text{Na,Ca//SO}_4,\text{HCO}_3\text{-H}_2\text{O}$; $\text{Na,Ca//CO}_3,\text{HCO}_3\text{-H}_2\text{O}$ и трёхкомпонентные: $\text{Na}_2\text{SO}_4\text{-CaSO}_4\text{-H}_2\text{O}$; $\text{Na}_2\text{SO}_4\text{-Na}_2\text{CO}_3\text{-H}_2\text{O}$; $\text{Na}_2\text{CO}_3\text{-CaCO}_3\text{-H}_2\text{O}$; $\text{CaSO}_4\text{-CaCO}_3\text{-H}_2\text{O}$; $\text{Na}_2\text{SO}_4\text{-NaHCO}_3\text{-H}_2\text{O}$; $\text{Na}_2\text{CO}_3\text{-NaHCO}_3\text{-H}_2\text{O}$; $\text{CaSO}_4\text{-Ca(HCO}_3)_2\text{-H}_2\text{O}$; $\text{CaCO}_3\text{-Ca(HCO}_3)_2\text{-H}_2\text{O}$ и $\text{NaHCO}_3\text{-Ca(HCO}_3)_2\text{-H}_2\text{O}$ системы.

Как показывают литературные данные, пятикомпонентная система $\text{Na,Ca//SO}_4,\text{CO}_3,\text{HCO}_3\text{-H}_2\text{O}$ не исследована вообще. Из пяти четырёхкомпонентных систем исследована только одна: $\text{Na}_2\text{SO}_4\text{-Na}_2\text{CO}_3\text{-NaHCO}_3\text{-H}_2\text{O}$ при 0 и 25 °С методом растворимости. Однако для ней не построена диаграмма растворимости и фазовых равновесий (фазовые комплексы).

Из трёхкомпонентных систем достаточно хорошо исследованы при 0 и 25 °С следующие системы: $\text{Na}_2\text{SO}_4\text{-CaSO}_4\text{-H}_2\text{O}$, $\text{Na}_2\text{SO}_4\text{-NaHCO}_3\text{-H}_2\text{O}$, $\text{Na}_2\text{CO}_3\text{-NaHCO}_3\text{-H}_2\text{O}$, $\text{CaSO}_4\text{-CaCO}_3\text{-H}_2\text{O}$, $\text{Na}_2\text{CO}_3\text{-CaCO}_3\text{-H}_2\text{O}$. Трёхкомпонентные системы $\text{CaSO}_4\text{-Ca(HCO}_3)_2\text{-H}_2\text{O}$, $\text{CaCO}_3\text{-Ca(HCO}_3)_2\text{-H}_2\text{O}$, $\text{NaHCO}_3\text{-Ca(HCO}_3)_2\text{-H}_2\text{O}$ и $\text{Na}_2\text{SO}_4\text{-Na}_2\text{CO}_3\text{-H}_2\text{O}$ не исследованы вообще. Для этих четырёх не исследованных систем их строение принято нами как простое эвтоническое. Сведения о состоянии изученности пятикомпонентной системы $\text{Na,Ca//SO}_4,\text{CO}_3,\text{HCO}_3\text{-H}_2\text{O}$, составляющих её четырёх- и трёхкомпонентных систем представлены в таблице 1.

Состояние изученности пятикомпонентной системы
 $\text{Na,Ca//SO}_4,\text{CO}_3,\text{HCO}_3\text{-H}_2\text{O}$ и составляющих её четырёх- и
 трехкомпонентных систем при 0 и 25 °С

№ п/п	Системы	Компонентность	Изотерма, °С	
			0	25
1.	$\text{Na,Ca//SO}_4,\text{CO}_3,\text{HCO}_3\text{-H}_2\text{O}$	5	-	-
2.	$\text{Na}_2\text{SO}_4\text{-Na}_2\text{CO}_3\text{-NaHCO}_3\text{-H}_2\text{O}$	4	+	+
3.	$\text{CaSO}_4\text{-CaCO}_3\text{-Ca(HCO}_3)_2\text{-H}_2\text{O}$	4	-	-
4.	$\text{Na,Ca//SO}_4,\text{CO}_3\text{-H}_2\text{O}$	4	-	-
5.	$\text{Na,Ca//SO}_4,\text{HCO}_3\text{-H}_2\text{O}$	4	-	-
6.	$\text{Na,Ca//CO}_3,\text{HCO}_3\text{-H}_2\text{O}$	4	-	-
7.	$\text{Na}_2\text{SO}_4\text{-CaSO}_4\text{-H}_2\text{O}$	3	+	+
8.	$\text{Na}_2\text{CO}_3\text{-CaCO}_3\text{-H}_2\text{O}$	3	+	+
9.	$\text{Na}_2\text{SO}_4\text{-Na}_2\text{CO}_3\text{-H}_2\text{O}$	3	+	+
10.	$\text{CaSO}_4\text{-CaCO}_3\text{-H}_2\text{O}$	3	+	+
11.	$\text{Na}_2\text{SO}_4\text{-NaHCO}_3\text{-H}_2\text{O}$	3	+	+
12.	$\text{Na}_2\text{CO}_3\text{-NaHCO}_3\text{-H}_2\text{O}$	3	+	+
13.	$\text{CaSO}_4\text{-Ca(HCO}_3)_2\text{-H}_2\text{O}$	3	-	-
14.	$\text{CaCO}_3\text{-Ca(HCO}_3)_2\text{-H}_2\text{O}$	3	-	-
15.	$\text{NaHCO}_3\text{-Ca(HCO}_3)_2\text{-H}_2\text{O}$	3	-	-

**Равновесные твёрдые фазы геометрических образов пятикомпонентной системы
 $\text{Na,Ca//SO}_4,\text{CO}_3,\text{HCO}_3\text{-H}_2\text{O}$ и её четырёхкомпонентных систем при 0 °С,
 установленных методом трансляции**

Четырёхкомпонентная система $\text{Na}_2\text{SO}_4\text{-Na}_2\text{CO}_3\text{-NaHCO}_3\text{-H}_2\text{O}$ включает трехкомпонентные системы: $\text{Na}_2\text{SO}_4\text{-Na}_2\text{CO}_3\text{-H}_2\text{O}$; $\text{Na}_2\text{SO}_4\text{-NaHCO}_3\text{-H}_2\text{O}$ и $\text{Na}_2\text{CO}_3\text{-NaHCO}_3\text{-H}_2\text{O}$, для которых при 0°С характерно по одной неинвариантной точке с равновесными твёрдыми фазами Мб+С·10, Мб+Нх и С·10+Нх. Сочетание (трансляция) этих неинвариантных точек на уровень четырёхкомпонентного состава даёт одну четверную неинвариантную точку (E_1^4) с равновесными твёрдыми фазами Мб+С·10+Нх, где здесь и далее Е – неинвариантная точка, её нижний индекс – порядковой номер точки, верхний индекс – компонентность системы.

Четырёхкомпонентная система $\text{CaSO}_4\text{-CaCO}_3\text{-Ca(HCO}_3)_2\text{-H}_2\text{O}$ включает трехкомпонентные системы: $\text{CaSO}_4\text{-CaCO}_3\text{-H}_2\text{O}$; $\text{CaSO}_4\text{-Ca(HCO}_3)_2\text{-H}_2\text{O}$; и $\text{CaCO}_3\text{-Ca(HCO}_3)_2\text{-H}_2\text{O}$, для которых при 0 °С характерно по одной неинвариантной точке с равновесными твёрдыми фазами Гп+СаГ; Сц+СаГ и Гп+Сц. Трансляция этих неинвариантных точек на уровень четырёхкомпонентного состава даёт одну четверную неинвариантную точку (E_2^4) с равновесными твёрдыми фазами Гп+Сц+СаГ.

Четырёхкомпонентная система $\text{Na,Ca//SO}_4,\text{HCO}_3\text{-H}_2\text{O}$ включает трехкомпонентные системы: $\text{Na}_2\text{SO}_4\text{-CaSO}_4\text{-H}_2\text{O}$; $\text{NaHCO}_3\text{-Ca(HCO}_3)_2\text{-H}_2\text{O}$; $\text{Na}_2\text{SO}_4\text{-NaHCO}_3\text{-H}_2\text{O}$; $\text{CaSO}_4\text{-Ca(HCO}_3)_2\text{-H}_2\text{O}$. Для них при 0°С характерны по одной неинвариантной точке. При трансляции на уровень четырёхкомпонентного состава они дают две четверные неинвариантные точки с равновесными твёрдыми фазами: $E_3^4 = \text{Мб+Нх+Гп}$ и $E_4^4 = \text{СаГ+Нх+Гп}$.

Четырёхкомпонентная система Na,Ca//SO₄,CO₃-H₂O включает трехкомпонентные системы: Na₂CO₃-CaCO₃-H₂O; Na₂SO₄-CaSO₄-H₂O; Na₂SO₄-Na₂CO₃-H₂O; CaSO₄-CaCO₃-H₂O. Для первой системы характерны две невариантные точки с равновесными твердыми фазами С·10+Гл и Гл+Сц, а для трех остальных – по одной невариантной точке с равновесными твердыми фазами Мб+Сц, Мб+С·10 и Гп+Сц, соответственно. При трансляции на уровень четырехкомпонентного состава эти тройные невариантные точки дают следующие четверные невариантные точки с равновесными твердыми фазами: E₅⁴ = Мб+Гл+С·10; E₆⁴ = Гп+Сц+Гл и E₇⁴ = Гп+Гл+Мб.

Четырёхкомпонентная система Na,Ca//CO₃,HCO₃-H₂O включает трехкомпонентные системы: Na₂CO₃-NaHCO₃-H₂O; Na₂CO₃-CaCO₃-H₂O; NaHCO₃-Ca(HCO₃)₂-H₂O и CaCO₃-Ca(HCO₃)₂-H₂O. Для первой системы при 0 °С характерна одна невариантная точка с равновесными твердыми фазами С·10+Нх, Для второй системы характерны две невариантные точки с равновесными твердыми фазами С·10+Гл и Гл+Сц. Для двух остальных систем по одной невариантной точке с равновесными твердыми фазами Нх+СаГ и СаГ+Сц, соответственно. Трансляция этих невариантных точек на уровень четырехкомпонентного состава даёт три четверные невариантные точки (E₈⁴, E₉⁴ и E₁₀⁴) с равновесными твердыми фазами: E₈⁴ = С·10+Нх+Гл, E₉⁴ = Гл+СаГ+Сц и E₁₀⁴ = Гл+СаГ+Нх.

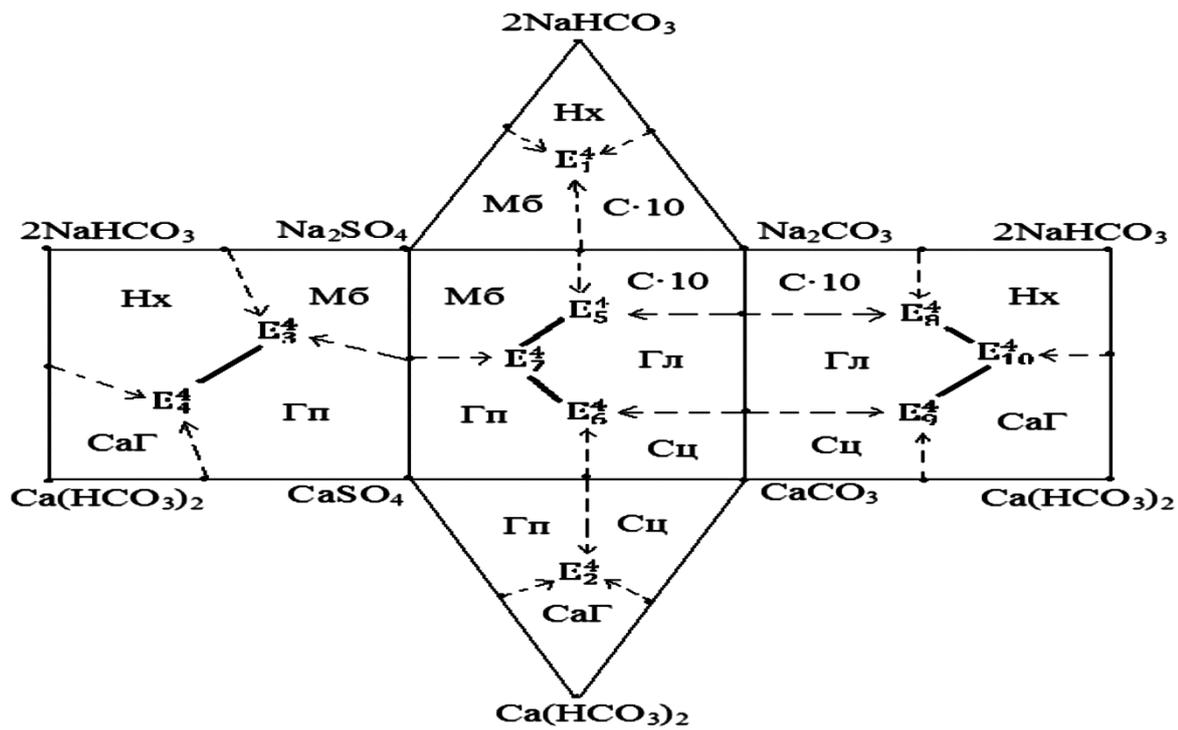
Обнаруженные методом трансляции невариантные точки уровня четырехкомпонентного состава пятикомпонентной системы Na,Ca//SO₄,CO₃,HCO₃-H₂O при 0 °С приведены в таблице 2.

Таблица 2

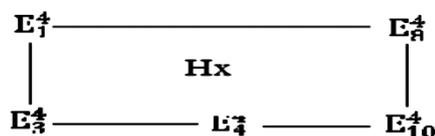
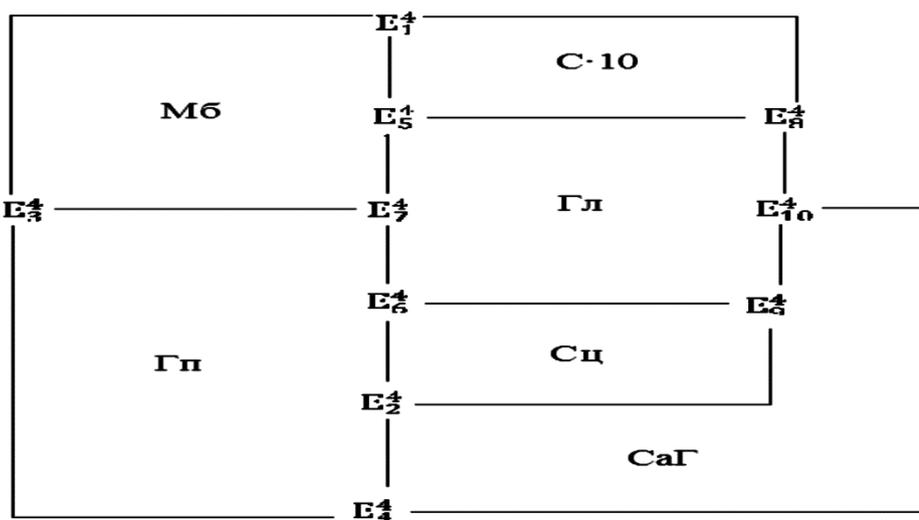
Четверные невариантные точки системы Na,Ca//SO₄,CO₃,HCO₃-H₂O при 0 °С, с характерными для них равновесными твердыми фазами, найденные методом трансляции

Система	Нонвариантная точка	Равновесные твердые фазы
Na ₂ SO ₄ -Na ₂ CO ₃ -NaHCO ₃ -H ₂ O	E ₁ ⁴	Мб + С·10 + Нх
CaSO ₄ -CaCO ₃ -Ca(HCO ₃) ₂ -H ₂ O	E ₂ ⁴	Гп + СаГ + Сц
Na,Ca//SO ₄ ,HCO ₃ -H ₂ O	E ₃ ⁴	Мб + Нх + Гп
	E ₄ ⁴	Нх + Гп + СаГ
Na,Ca//SO ₄ ,CO ₃ -H ₂ O	E ₅ ⁴	С·10 + Мб + Гл
	E ₆ ⁴	Сц + Гп + Гл
	E ₇ ⁴	Мб + Гл + Гп
Na,Ca//CO ₃ ,HCO ₃ -H ₂ O	E ₈ ⁴	С·10 + Гл + Нх
	E ₉ ⁴	Гл + Сц + СаГ
	E ₁₀ ⁴	Гл + Нх + СаГ

На основании представленных в таблице 2 данных построена диаграмма фазовых равновесий системы Na,Ca//SO₄,CO₃,HCO₃-H₂O при 0°С на уровне четырехкомпонентного состава. На рисунке 1а солевая часть построенной диаграммы представлена в виде «развёртки» призмы, а на 1б - её схематический вид после объединения идентичных полей кристаллизации равновесных твердых фаз.



а)



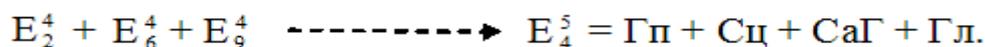
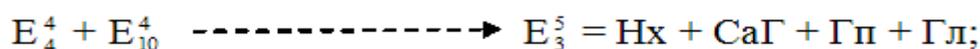
б)

Рисунок 1. Диаграмма фазовых равновесий системы Na,Ca//SO₄,CO₃,HCO₃-H₂O при 0 °C на уровне четырёхкомпонентного состава:
а) в виде «развёртки» призмы, б) схематически.

Диаграмма (рис.1б) в дальнейшем может служить основой (матрицей) для нанесения на неё элементов строения исследуемой системы на уровне пятикомпонентного состава. Как видно из рисунка 1, для системы Na,Ca//SO₄,CO₃,HCO₃-H₂O при 0 °C на уровне четырёхкомпонентного состава характерно наличие семи дивариантных полей (поля кристаллизации индивидуальных твёрдых фаз),

восемнадцатью моновариантными кривыми (кривые совместной кристаллизации двух фаз) и десяти невариантными точками (точки совместной кристаллизации трех фаз).

Пятикомпонентная система Na,Ca//SO₄,CO₃,HCO₃-H₂O. Для прогнозирования фазовых равновесий в указанной пятикомпонентной системе при 0 °С методом трансляции использованы данные о фазовых равновесиях в невариантных точках четырёхкомпонентных систем (табл.2.). При трансляции невариантных точек четырёхкомпонентных систем на уровень пятикомпонентного состава образуются следующие пятерные невариантные точки с равновесными твёрдыми фазами:



По полученным данным построена схематическая диаграмма фазовых равновесий пятикомпонентной системы Na,Ca//SO₄,CO₃,HCO₃-H₂O при 0°С (рис.2.), на которой тонкие сплошные линии обозначают моновариантные кривые уровня четырёхкомпонентного состава и характерные им равновесные твёрдые фазы (рис.1.). Пунктирные линии обозначают моновариантные кривые, образованные при трансляции соответствующих невариантных точек уровня четырёхкомпонентного состава и характеризующий их фазовый состав осадков, который идентичен фазовому составу этих невариантных точек (табл.2.). Толстые сплошные линии обозначают моновариантные кривые, проходящие между пятерными невариантными точками и характеризуются следующими равновесными твёрдыми фазами:

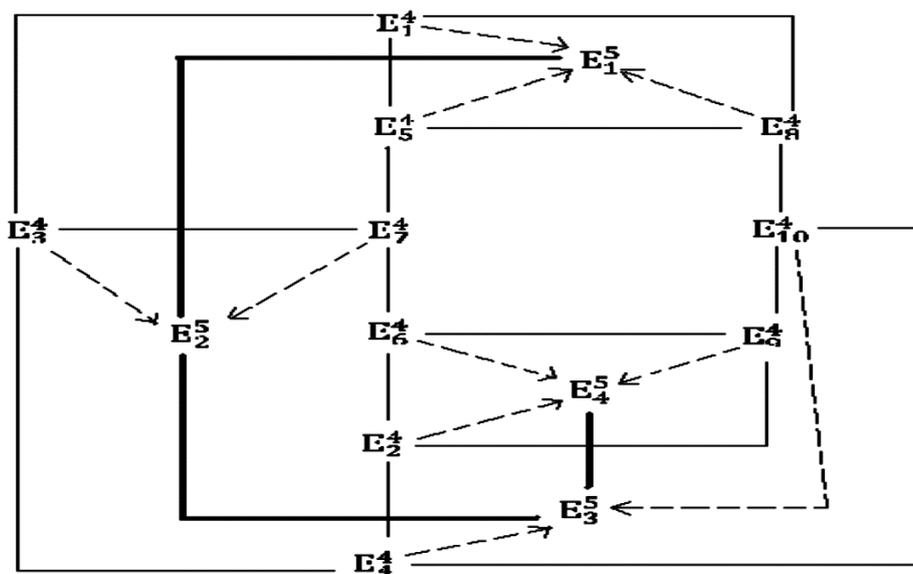
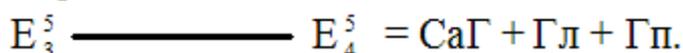
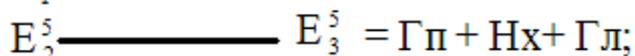
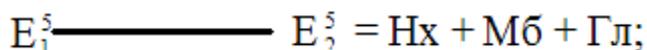


Рисунок 2. Схематическая диаграмма фазовых равновесий системы Na,Ca//SO₄,CO₃,HCO₃-H₂O при 0°С, построенная методом трансляции

Анализ строения диаграммы фазовых равновесий системы $\text{Na,Ca//SO}_4,\text{CO}_3,\text{HCO}_3\text{-H}_2\text{O}$ при 0°C показывает, что для неё при этой температуре характерно наличие 15 дивариантных полей, 13 моновариантных кривых и 4 нонвариантных точек.

Равновесные твёрдые фазы геометрических образов пятикомпонентной системы $\text{Na,Ca//SO}_4,\text{CO}_3,\text{HCO}_3\text{-H}_2\text{O}$ и её четырёхкомпонентных систем при 25°C , установленных методом трансляции

Четырёхкомпонентная система $\text{Na}_2\text{SO}_4\text{-Na}_2\text{CO}_3\text{-NaHCO}_3\text{-H}_2\text{O}$ включает трёхкомпонентные системы: $\text{Na}_2\text{SO}_4\text{-NaHCO}_3\text{-H}_2\text{O}$; $\text{Na}_2\text{CO}_3\text{-NaHCO}_3\text{-H}_2\text{O}$ и $\text{Na}_2\text{SO}_4\text{-Na}_2\text{CO}_3\text{-H}_2\text{O}$. Для второй системы характерны две нонвариантные точки с равновесными твёрдыми фазами Mб+Tr и $\text{Tr+C}\cdot 10$, а для первой и третьей – по одной нонвариантной точке с равновесными фазами Mб+Hx и $\text{Mб+C}\cdot 10$. В трёхкомпонентной системе $\text{Na}_2\text{CO}_3\text{-NaHCO}_3\text{-H}_2\text{O}$ с повышением температуры до 25°C появляется новая фаза – смешанная соль $\text{NaHCO}_3\cdot\text{Na}_2\text{CO}_3\cdot 2\text{H}_2\text{O}$, которая известна под названием трона (Tr). Это, согласно одному из основных принципов физико-химического анализа – принципу соответствия, способствует появлению дополнительных геометрических образов. Трансляция тройных нонвариантных точек на уровень четырёхкомпонентного состава даёт следующие четверные нонвариантные точки с равновесными твёрдыми фазами: $E_1^4 = \text{Hx+Mб+Tr}$ и $E_2^4 = \text{Tr+C}\cdot 10+\text{Mб}$.

Четырёхкомпонентная система $\text{CaSO}_4\text{-CaCO}_3\text{-Ca(HCO}_3)_2\text{-H}_2\text{O}$ включает трёхкомпонентные системы: $\text{CaSO}_4\text{-Ca(HCO}_3)_2\text{-H}_2\text{O}$; $\text{CaCO}_3\text{-Ca(HCO}_3)_2\text{-H}_2\text{O}$ и $\text{CaSO}_4\text{-CaCO}_3\text{-H}_2\text{O}$, для которых при 25°C характерно по одной нонвариантной точке с равновесными твёрдыми фазами Гп+CaГ ; CaГ+Сц и Сц+Гп . Трансляция этих нонвариантных точек на уровень четырёхкомпонентного состава даёт одну четверную нонвариантную точку с равновесными твёрдыми фазами: $E_3^4 = \text{Гп+Сц+CaГ}$.

Четырёхкомпонентная система $\text{Na,Ca//SO}_4,\text{HCO}_3\text{-H}_2\text{O}$ включает трёхкомпонентные системы: $\text{NaHCO}_3\text{-Na}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}$; $\text{NaHCO}_3\text{-Ca(HCO}_3)_2\text{-H}_2\text{O}$; $\text{Ca(HCO}_3)_2\text{-CaSO}_4\text{-H}_2\text{O}$ и $\text{Na}_2\text{SO}_4\text{-CaSO}_4\text{-H}_2\text{O}$. Для последней трёхкомпонентной системе характерно наличие двух нонвариантных точек с равновесными твёрдыми фазами: Mб+Гб ; Гб+Гп . Для трёх других трёхкомпонентных систем характерно по одной нонвариантной точке с равновесными твёрдыми фазами: Hx+Mб , CaГ+Hx и CaГ+Гп , соответственно. Трансляция перечисленных тройных нонвариантных точек на уровень четырёхкомпонентного состава даёт следующие четверные нонвариантные точки с равновесными твёрдыми фазами: $E_4^4 = \text{Hx+Гб+Mб}$, $E_5^4 = \text{Гб+Гп+CaГ}$; $E_6^4 = \text{Hx+CaГ+Гб}$.

Четырёхкомпонентная система $\text{Na,Ca//SO}_4,\text{CO}_3\text{-H}_2\text{O}$ включает трёхкомпонентные системы: $\text{Na}_2\text{SO}_4\text{-Na}_2\text{CO}_3\text{-H}_2\text{O}$; $\text{Na}_2\text{SO}_4\text{-CaSO}_4\text{-H}_2\text{O}$; $\text{CaSO}_4\text{-CaCO}_3\text{-H}_2\text{O}$ и $\text{Na}_2\text{CO}_3\text{-CaCO}_3\text{-H}_2\text{O}$. Для второй и четвертой системы характерны по две нонвариантные точки с равновесными твёрдыми фазами: Mб+Гб ; Гб+Гп и $\text{C}\cdot 10+\text{Гл}$; Гл+Сц , соответственно. Остальные трёхкомпонентные системы являются простыми эвтоническими и для них характерно по одной нонвариантной точке с равновесными твёрдыми фазами: $\text{Mб+C}\cdot 10$ и Гп+Сц . Трансляция тройных нонвариантных точек на уровень четырёхкомпонентного состава даёт следующие четверные нонвариантные точки с равновесными твёрдыми фазами: $E_7^4 = \text{Mб+Гб+C}\cdot 10$. $E_8^4 = \text{Гп+Гб+Сц}$, $E_9^4 = \text{C}\cdot 10+\text{Гл+Гб}$, $E_{10}^4 = \text{Гб+Гл+Сц}$.

Четырёхкомпонентная система $\text{Na,Ca//CO}_3,\text{HCO}_3\text{-H}_2\text{O}$ включает трёхкомпонентные системы: $\text{Na}_2\text{CO}_3\text{-NaHCO}_3\text{-H}_2\text{O}$; $\text{Na}_2\text{CO}_3\text{-CaCO}_3\text{-H}_2\text{O}$; $\text{CaCO}_3\text{-Ca(HCO}_3)_2\text{-H}_2\text{O}$ и $\text{NaHCO}_3\text{-Ca(HCO}_3)_2\text{-H}_2\text{O}$. Для первой и второй системы характерны по две нонвариантные точки с равновесными твёрдыми фазами: $\text{C}\cdot 10+\text{Tr}$; Tr+Hx и

С·10+Гл; Сц+Гл, соответственно. Для остальных характерно по одной невариантной точке с равновесными твёрдыми фазами: Сц+СаГ и СаГ+Нх. Трансляция этих тройных невариантных точек на уровень четырёхкомпонентного состава даёт четыре четверные невариантные точки с равновесными твёрдыми фазами: $E_{11}^4 = \text{Тр} + \text{Гл} + \text{С} \cdot 10$, $E_{12}^4 = \text{Тр} + \text{Нх} + \text{СаГ}$, $E_{13}^4 = \text{Гл} + \text{СаГ} + \text{Сц}$ и $E_{14}^4 = \text{Тр} + \text{Гл} + \text{СаГ}$.

Обнаруженные методом трансляции невариантные точки уровня четырёхкомпонентного состава пятикомпонентной системы $\text{Na, Ca} // \text{SO}_4, \text{CO}_3, \text{HCO}_3 - \text{H}_2\text{O}$ при 25 °С, с характерными для них равновесными твёрдыми фазами, представлены в таблице 3

Таблица 3

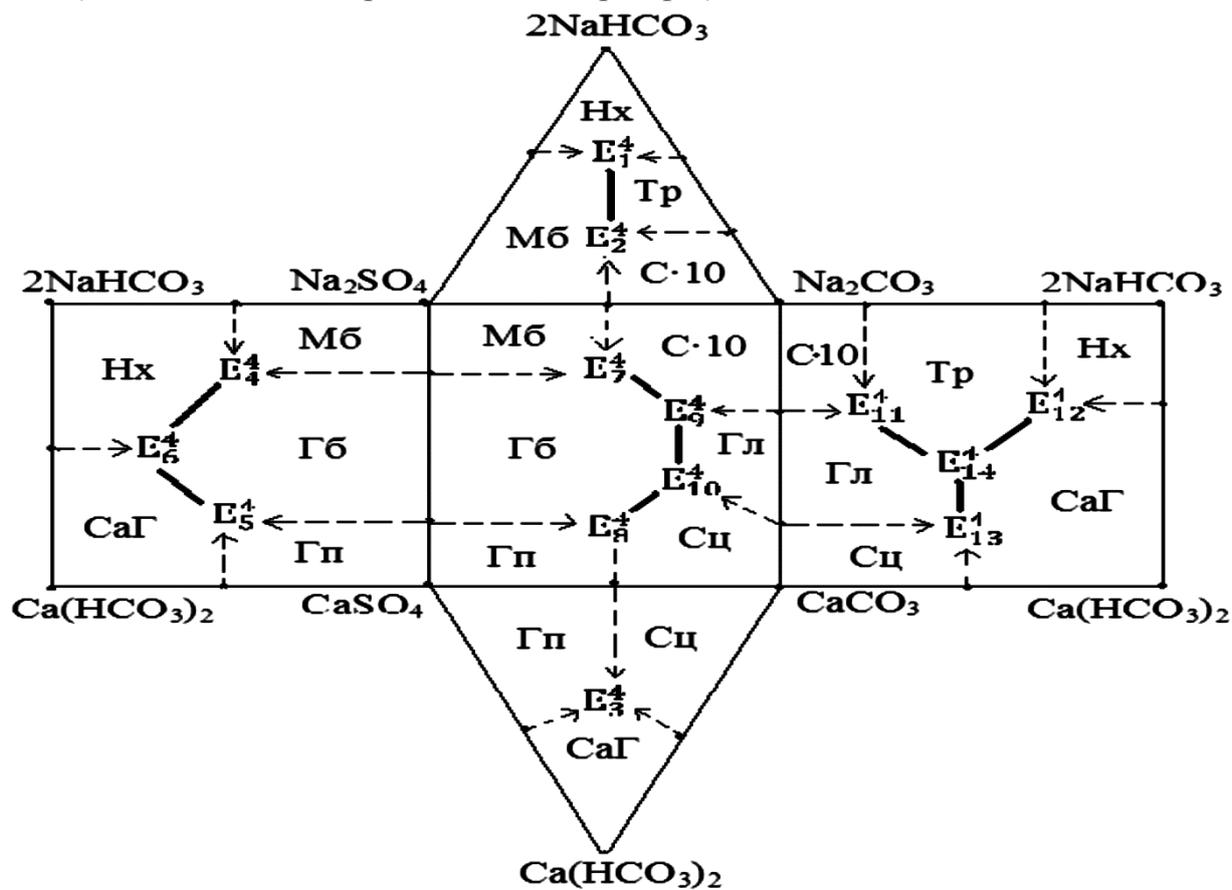
Четверные невариантные точки системы $\text{Na, Ca} // \text{SO}_4, \text{CO}_3, \text{HCO}_3 - \text{H}_2\text{O}$ при 25 °С, с характерными для них равновесными твёрдыми фазами, найденные методом трансляции

Система	Нонвариантная точка	Равновесные твёрдые фазы
$\text{Na}_2\text{SO}_4 - \text{Na}_2\text{CO}_3 - \text{NaHCO}_3 - \text{H}_2\text{O}$	E_1^4 E_2^4	Нх + Мб + Тр Мб + Тр + С·10
$\text{CaSO}_4 - \text{CaCO}_3 - \text{Ca}(\text{HCO}_3)_2 - \text{H}_2\text{O}$	E_3^4	Гп + СаГ + Сц
$\text{Na, Ca} // \text{SO}_4, \text{HCO}_3 - \text{H}_2\text{O}$	E_4^4 E_5^4 E_6^4	Нх + Мб + Гб СаГ + Гб + Гп Гб + Нх + СаГ
$\text{Na, Ca} // \text{SO}_4, \text{CO}_3, - \text{H}_2\text{O}$	E_7^4 E_8^4 E_9^4 E_{10}^4	Мб + С·10 + Гб Гп + Гб + Сц Гб + С·10 + Гл Гл + Гб + Сц
$\text{Na, Ca} // \text{CO}_3, \text{HCO}_3 - \text{H}_2\text{O}$	E_{11}^4 E_{12}^4 E_{13}^4 E_{14}^4	С·10 + Тр + Гл Тр + Нх + СаГ Сц + Гл + СаГ Тр + СаГ + Гл

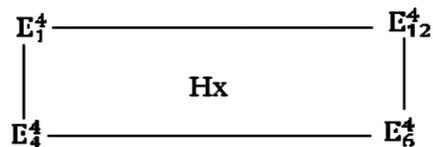
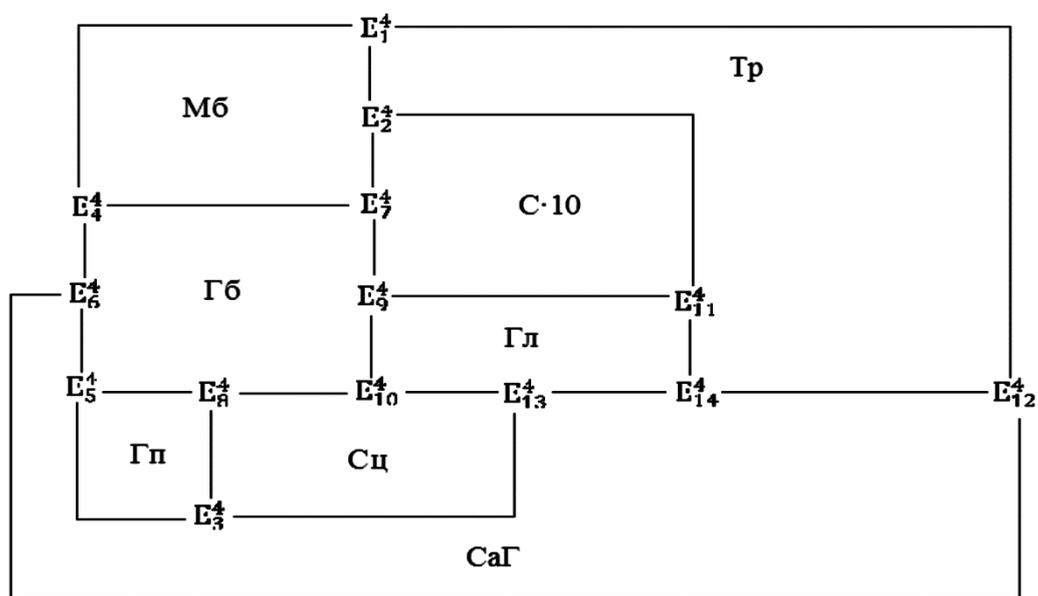
На основании представленных в таблице 3 данных построена диаграмма фазовых равновесий исследуемой системы на уровне четырёхкомпонентного состава при 25 °С. Солевая часть построенной диаграммы представлена в виде «развёртки» призмы (рис.3а), а её схематический вид, после объединения идентичных полей кристаллизации равновесных твёрдых фаз, на рисунке 3б.

Как видно из рисунков для исследованной системы на уровне четырёхкомпонентного состава характерно наличие девяти дивариантных полей (поля кристаллизации индивидуальных твёрдых фаз), девятнадцати моновариантных

кривых (кривые совместной кристаллизации двух фаз) и четырнадцатью инвариантными точками (точки совместной кристаллизации трех фаз).



a)

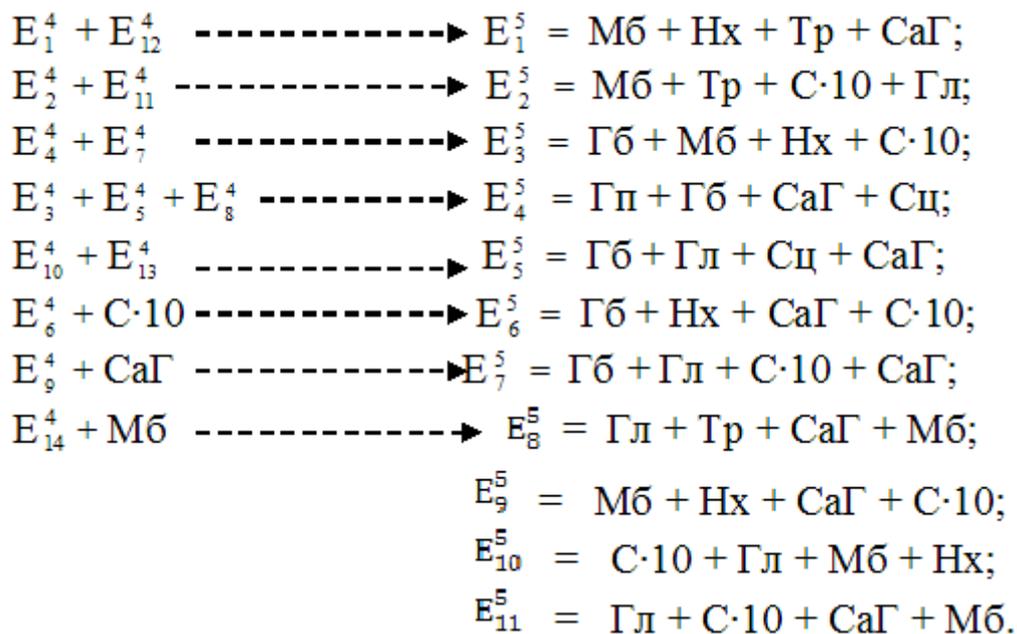


б)

Рисунок 3. Диаграмма фазовых равновесий системы Na,Ca//SO₄,CO₃,HCO₃-H₂O при 25 °С на уровне четырёхкомпонентного состава:

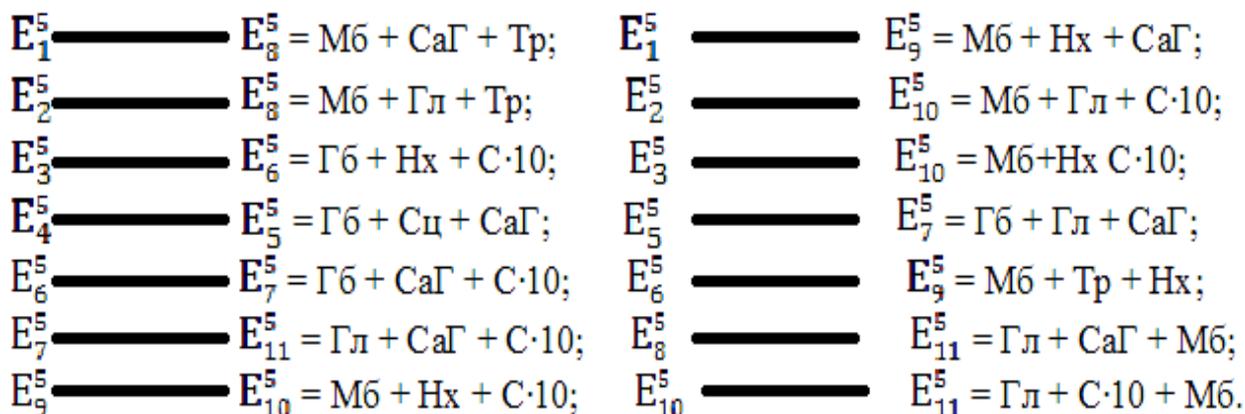
а) в виде «развёртки» призмы, б) схематически

Пятикомпонентная система Na,Ca//SO₄,CO₃,HCO₃-H₂O. Для прогнозирования фазовых равновесий в пятикомпонентной системе Na,Ca//SO₄,CO₃,HCO₃-H₂O при 25°С методом трансляции использованы данные о фазовых равновесиях в невариантных точках четырёхкомпонентных систем (табл.3.). При трансляции невариантных точек четырёхкомпонентных систем на уровень пятикомпонентного состава образуются следующие пятерные невариантные точки с равновесными твёрдыми фазами:



Как видно, из 11 пятерных невариантных точек 5 образованы «сквозной», 3 – «односторонней» и 3 – «промежуточной» трансляцией.

На основе полученных данных построена схематическая диаграмма фазовых равновесий исследованной пятикомпонентной системы (рис.4.). Как и для диаграммы фазовых равновесий изотермы 0°С (рис.2), тонкие сплошные линии обозначают моновариантные кривые уровня четырёхкомпонентного состава. Пунктирные линии со стрелками – моновариантные кривые уровня пятикомпонентного состава образованных при трансляции четверных невариантных точек, а стрелки указывают на направления трансляции невариантных точек. Толстые сплошные линии также обозначают моновариантные кривые, но проходят между пятерными точками и характеризуются следующими равновесными твёрдыми фазами:



Анализ построенной диаграммы показывает, что для пятикомпонентной системы $\text{Na,Ca//SO}_4,\text{CO}_3,\text{HCO}_3\text{-H}_2\text{O}$ при 25°C характерно наличие двадцати двух дивариантных полей, двадцати семи моновариантных кривых и одиннадцати нонвариантных точек.

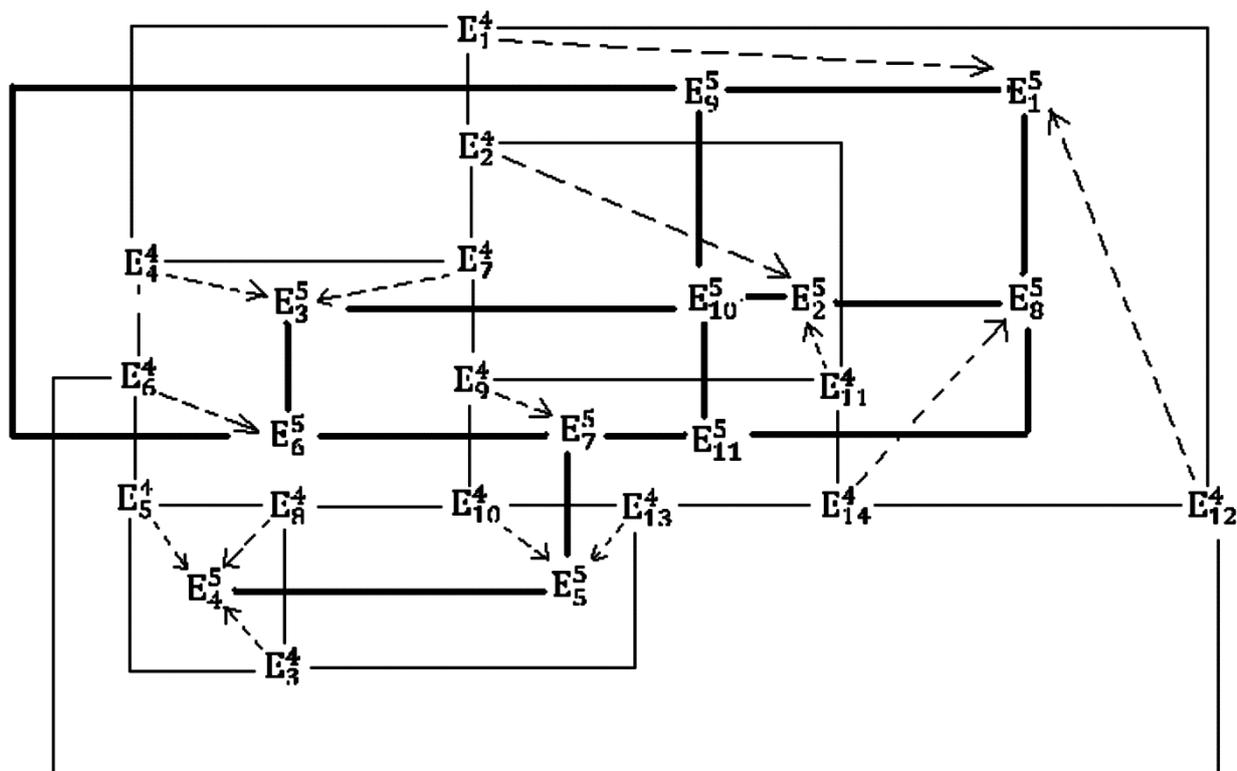


Рисунок 4. Схематическая диаграмма фазовых равновесий системы $\text{Na,Ca//SO}_4,\text{CO}_3,\text{HCO}_3\text{-H}_2\text{O}$ при 25°C , построенная методом трансляции.

4. Экспериментальное изучение растворимости четырёхкомпонентных систем

Прогнозирование фазовых равновесий в многокомпонентных системах методом трансляции значительно облегчает их экспериментальное исследование, как во времени, так и в экономии материалов, необходимых для проведения эксперимента. Кроме того, предварительное прогнозирование фазовых равновесий на геометрических образах позволит установить возможные оптимальные условия (параметры) реализации последних, что крайне важно при идентификации парагенезов (сосуществования) равновесных твёрдых фаз в многокомпонентных системах.

Методика определения растворимости в нонвариантных точках, установленных методом трансляции

Экспериментальное определение положения нонвариантных точек, установленных методом трансляции, осуществляется несколькими путями. Одним из таких путей является метод донасыщения. Сущность метода заключается в том, что раствор, отвечающий нонвариантной точке n -компонентной системы, постепенно донасыщается последующей твёрдой фазой, характерной для $(n + 1)$ компонентной системы.

Другой путь состоит в том, что конгломерат равновесных твёрдых фаз с насыщенным этими фазами раствором и характерный для транслируемой нонвариантной точки n -компонентной системы, смешивают с таковыми другой

транслируемой невариантной точкой, которые на уровне (n+1) компонентного состава пересекаются в виде соответствующих моновариантных кривых с образованием невариантной точки уровня (n+1) компонентного состава.

В обоих случаях полученную смесь термостатируют при данной температуре до достижения равновесия, которое контролируется периодическим отбором жидкой фазы на химический анализ и визуально с помощью микроскопа за состоянием равновесных твёрдых фаз. После достижения равновесия анализируют состав насыщенного раствора, равновесного с твёрдыми фазами осадка, и устанавливают координаты невариантной точки (n+1) компонентного уровня исследуемой системы. На основании полученных результатов строят диаграмму растворимости (n+1) компонентной системы.

Растворимость системы $\text{CaSO}_4\text{--CaCO}_3\text{--Ca(HCO}_3)_2\text{--H}_2\text{O}$

Результаты исследования данной четырёхкомпонентной системы методом трансляции при 0 и 25 °С приведены в разделах 2 и 3. В данном разделе рассмотрены результаты исследования растворимости данной системы при 0 и 25 °С. Составными частями системы при данных изотермах являются сульфаты, карбонаты и гидрокарбонаты кальция, которые при указанных температурах кристаллизуются в виде $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (Гп), CaCO_3 (Сц) и $\text{Ca(HCO}_3)_2$ (СаГ).

Для опытов были использованы следующие реактивы: $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (х.ч); CaCO_3 (ч); $\text{Ca(HCO}_3)_2$ (ч). Опыты проводили по следующей схеме. Предварительно были приготовлены смеси осадков с насыщенными растворами, соответствующими невариантным точкам составляющих исследуемую четырёхкомпонентную систему трехкомпонентных систем: $\text{CaSO}_4\text{--CaCO}_3\text{--H}_2\text{O}$; $\text{CaSO}_4\text{--Ca(HCO}_3)_2\text{--H}_2\text{O}$ и $\text{CaCO}_3\text{--Ca(HCO}_3)_2\text{--H}_2\text{O}$ при 0 °С.

Затем, исходя из схемы трансляции невариантных точек уровня трехкомпонентного состава на уровень четырехкомпонентного состава, приготовленные насыщенные растворы с соответствующими равновесными твёрдыми фазами объединяли и перемешивая термостатировали при 0 и 25 °С до достижения равновесия.

Анализ равновесной жидкой фазы (табл. 4) проводили по известным методикам, а фазовый состав осадков устанавливали кристаллооптическим методом.

Таблица 4

Растворимость в узловых (невариантных) точках системы
 $\text{CaSO}_4\text{--CaCO}_3\text{--Ca(HCO}_3)_2\text{--H}_2\text{O}$

Обозначения	Состав жидкой фазы, мас. %				Фазовый состав осадков
	CaSO_4	CaCO_3	$\text{Ca(HCO}_3)_2$	H_2O	
Изотерма 0 °С					
E_1^3	0.0217	0.0014	-	99.964	Гп+Сц
E_2^3	-	0.0014	0.083	99.90	Сц+СаГ
E_3^3	0.0217	-	0.083	99.985	СаГ+Гп
E_1^4	0.0217	0.0014	0.083	99.88	Сц+Гп+СаГ
Изотерма 25 °С					
E_1^3	0.175	0.0038	-	99.821	Гп+Сц
E_2^3	0.186	-	0.0168	99.797	Гп+СаГ
E_3^3	-	0.0046	0.0179	99.977	Сц +СаГ

E_1^4	0.218	0.00535	0.0225	99.754	$\Gamma\Pi + \text{Cц} + \text{Ca}\Gamma$
---------	-------	---------	--------	--------	---

На основании полученных результатов (табл. 4) была построена диаграмма растворимости четырёхкомпонентной системы $\text{CaSO}_4\text{--CaCO}_3\text{--Ca(HCO}_3)_2\text{--H}_2\text{O}$ при 0 и 25 °С, солевая часть которых представлены на рисунке 5.

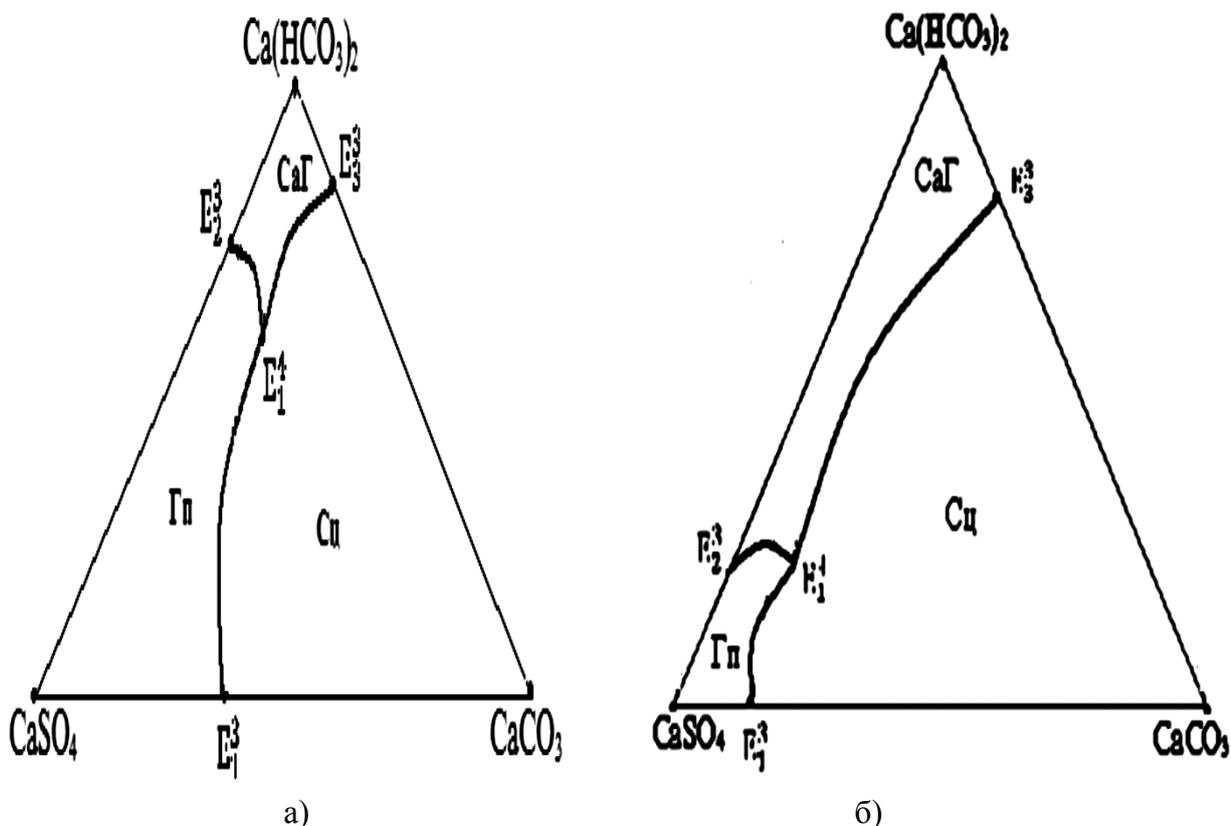


Рисунок 5. Солевая часть диаграммы растворимости системы $\text{CaSO}_4\text{--CaCO}_3\text{--Ca(HCO}_3)_2\text{--H}_2\text{O}$: а) изотерма 0 °С; б) изотерма 25 °С

Как видно из этого рисунка поле кристаллизации кальцита (CaCO_3) занимает значительную часть системы, что указывает на его малую растворимость в приведенных условиях.

Растворимость системы $\text{Na,Ca//SO}_4,\text{CO}_3\text{--H}_2\text{O}$

Результаты исследования фазовых равновесий данной четырёхкомпонентной системы методом трансляции при 0 и 25 °С приведены в разделах 2 и 3. В данном разделе рассмотрены результаты исследования данной четырёхкомпонентной системы при 0 и 25 °С методом растворимости. Составными частями системы при 0 и 25 °С являются сульфаты и карбонаты натрия и кальция, которые кристаллизуются в виде следующих равновесных твёрдых фаз: мирабилит (Мб) $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$; $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ (С·10); гипс (Гп) $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$; кальцит (Сц) CaCO_3 ; гейлюссит (Гл) $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, а при 25 °С кристаллизуется также новая равновесная твёрдая фаза глауберит (Гб) $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot \text{CaSO}_4$.

Для опытов были использованы следующие реактивы: $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ (хч); $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (х.ч); Na_2CO_3 (ч); CaCO_3 (ч), а результаты опытов представлены в таблице

Таблица 5

Растворимость в невариантных точках системы
 $\text{Na,Ca//SO}_4,\text{CO}_3\text{-H}_2\text{O}$

Обозначения	Состав жидкой фазы, мас. %					Фазовый состав осадков
	Na_2SO_4	CaSO_4	Na_2CO_3	CaCO_3	H_2O	
Изотерма 0 °С						
E_1^3	4.34	0.196	-	-	95.46	Мб+Гп
E_2^3	-	-	12.0	0.0048	87.99	С·10+Гл
E_3^3	-	-	4.3	0.0048	95.69	Гл+Сц
E_4^3	2.8	-	6.01	-	91.19	Мб+С·10
E_5^3	-	0.2	-	0.0045	99.795	Гп+Сц
E_1^4	1.967	0.244	1.551	-	96.238	Мб+С·10+Гп
E_2^4	-	0.272	11.3	0.00465	88.42	С·10+Гп+Гл
E_3^4	-	0.34	18.3	0.0125	81.347	Гп+Гл+Сц
Изотерма 25 °С						
E_1^3	21.75	0.197	-	-	78.05	Мб+Гб
E_2^3	25.78	0.188	-	-	74.032	Гп+Гб
E_3^3	16.40	-	18.40	-	65.30	Мб+С·10
E_4^3	-	-	5.65	0.0035	94.3465	С·10+Гл
E_5^3	-	-	4.50	0.0024	95.4976	Гл+Сц
E_6^3	-	0.213	-	0.0048	99.7822	Гп+Сц
E_1^4	14.20	0.273	19.60	-	65.927	Мб+С·10+Гб
E_2^4	-	0.408	18.55	0.0055	81.0365	Гп+Гб+Сц
E_3^4	12.52	-	19.45	0.0052	68.0248	С·10+Гл+Гб
E_4^4	-	0.328	20.70	0.0043	78.9677	Сц+Гб+Гл

По полученным данным (табл. 5) впервые построена диаграмма растворимости четырёхкомпонентной системы $\text{Na,Ca//SO}_4,\text{CO}_3\text{-H}_2\text{O}$ при 0 и 25 °С, солевая часть которой, в виде равностороннего четырехугольника, представлена на рисунке 6. Из рис. 6 видно, что поля кристаллизации гипса ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) и кальцита (CaCO_3) занимают значительную часть исследованной системы, что указывает на их малую растворимость.

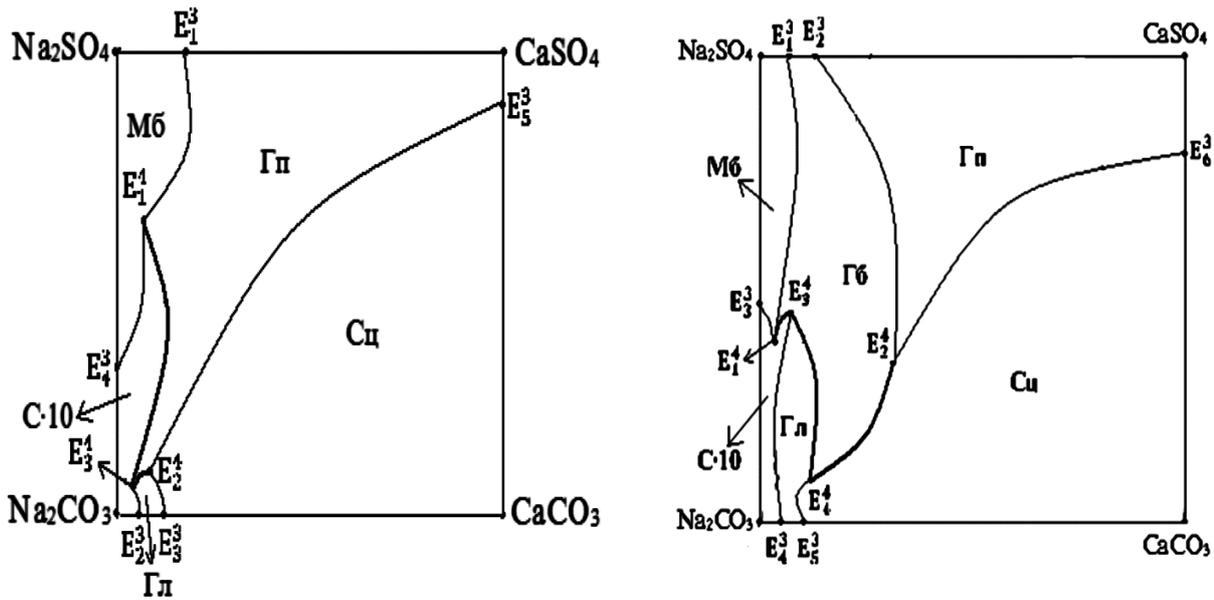


Рисунок 6. Солевая часть диаграммы растворимости системы Na,Ca//SO₄,CO₃-H₂O: а) изотерма 0 °С; б) изотерма 25 °С.

Растворимость системы Na,Ca//CO₃,HCO₃-H₂O

Результаты исследования фазовых равновесия данной четырёхкомпонентной системы методом трансляции при 0 и 25 °С приведены в разделах 2 и 3. В данном разделе рассмотрены результаты исследования данной четырёхкомпонентной системы при 0 и 25 °С методом растворимости. Составными частями системы при 0 и 25 °С являются карбонаты и гидрокарбонаты натрия и кальция, которые кристаллизуются в виде следующих равновесных твёрдых фаз: CaCO₃ - кальцит (Сц); Na₂CO₃·10H₂O - С·10; Na₂CO₃·CaCO₃·5H₂O - гейлюссит (Гл); NaHCO₃ – нахколит (Нх); и Ca(HCO₃)₂ – кальций гидрокарбонат (СаГ), а при 25 °С кристаллизуется также новая равновесная твёрдая фаза трона (Тр) NaHCO₃·Na₂CO₃·2H₂O.

Для опытов были использованы следующие реактивы: Na₂CO₃ (ч); CaCO₃ (ч); NaHCO₃ (ч) и Ca(HCO₃)₂ (ч). Соли Na₂CO₃·NaHCO₃·2H₂O (Тр) и Na₂CO₃·CaCO₃·5H₂O (Гл) получены исходя из данных справочника по растворимости многокомпонентных систем. Результаты опытов представлены в таблице 6.

Таблица 6
Растворимость в невариантных точках системы Na,Ca//CO₃,HCO₃-H₂O

Обозначения	Состав жидкой фазы, мас. %					Фазовый состав осадков
	Na ₂ CO ₃	NaHCO ₃	CaCO ₃	Ca(HCO ₃) ₂	H ₂ O	
1	2	3	4	5	6	7
Изотерма 0 °С						
E ₁ ³	5.60	4.610	-	-	89.790	С·10+Нх

E_2^3	12.00	-	0.0048	-	87.9952	C·10+Гл
1	2	3	4	5	6	7
E_3^3	4.30	-	0.0046	-	95.6954	Гл+Сц
E_4^3	-	4.890	-	0.109	95.001	Нх+СаГ
E_5^3	-	-	0.0014	0.083	99.9156	Сц+СаГ
E_1^4	6.167	2.443	0.0065	-	91.3835	C·10+Нх+Гл
E_2^4	5.904	-	0.0057	0.308	93.7823	Сц+Гл+СаГ
E_3^4	5.510	5.896	-	0.190	88.4040	Нх+СаГ+Гл
Изотерма 25 °С						
E_1^3	22.46	2.84			74.7	C·10+Тр
E_2^3	17.62	4.62			77.76	Тр+Нх
E_3^3	5.65		0.0035		94.3465	C·10+Гл
E_4^3	4.50		0.0024		95.4976	Гл+Сц
E_5^3	-	5.43	-	0.0181	94.5519	Нх+СаГ
E_6^3	-	-	0.0046	0.0179	99.9775	Сц+СаГ
E_1^4	7.85	3.72	0.00336	-	88.4266	C·10+Тр+Гл
E_2^4	9.83	4.682	-	0.0229	85.4651	Тр+Нх+СаГ
E_3^4	-	4.415	0.00423	0.0215	95.5592	Сц+СаГ+Гл
E_4^4	8.674	3.918	-	0.0198	87.3882	Тр+Гл+СаГ

По полученным данным (табл. 6) впервые построена диаграмма растворимости четырёхкомпонентной системы Na,Ca//CO₃,HCO₃-H₂O при 0 и 25 °С, солевая часть которой, в виде равностороннего четырехугольника, представлена на рисунке 7. Из рисунка видно, что поля кристаллизации Сц - кальцита (CaCO₃) и СаГ – кальций гидрокарбонат (Ca(HCO₃)₂) занимают значительную часть исследованной системы, что указывает на их малую растворимость.

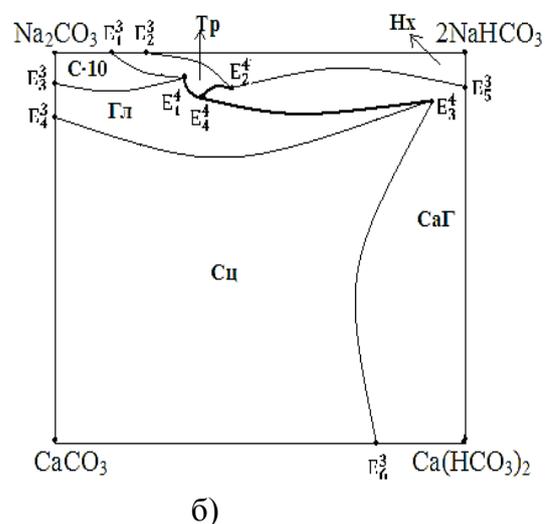
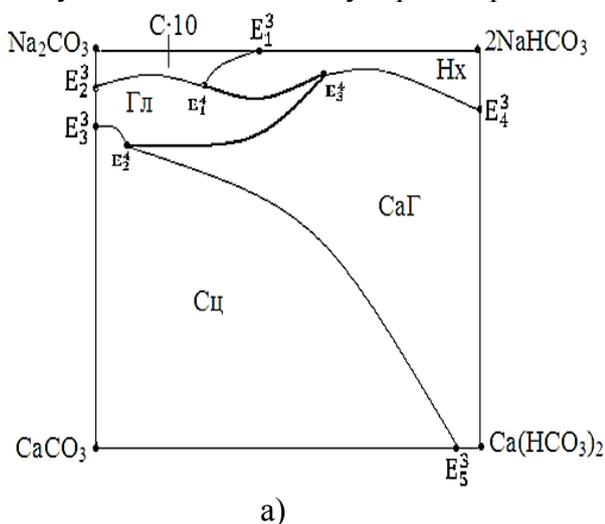


Рисунок 7. Солевая часть диаграммы растворимости системы $\text{Na,Ca//CO}_3,\text{HCO}_3\text{-H}_2\text{O}$: а) изотерма 0°C ; б) изотерма 25°C .

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Методом трансляции прогнозированы и построены диаграммы фазовых равновесий пятикомпонентной системы $\text{Na,Ca//SO}_4,\text{CO}_3,\text{HCO}_3\text{-H}_2\text{O}$ и составляющих её четырехкомпонентных систем: $\text{Na}_2\text{SO}_4\text{-Na}_2\text{CO}_3\text{-NaHCO}_3\text{-H}_2\text{O}$; $\text{CaSO}_4\text{-CaCO}_3\text{-Ca(HCO}_3)_2\text{-H}_2\text{O}$; $\text{Na,Ca//SO}_4,\text{CO}_3\text{-H}_2\text{O}$; $\text{Na,Ca//SO}_4,\text{HCO}_3\text{-H}_2\text{O}$ и $\text{Na,Ca//CO}_3,\text{HCO}_3\text{-H}_2\text{O}$ при 0 и 25°C .
2. Установлены все возможные фазовые равновесия на геометрических образах исследованных систем. Показано, что для исследованной пятикомпонентной системы характерно наличие следующего количества геометрических образов, соответственно для 0 и 25°C : дивариантные поля – 15 и 22; моновариантные кривые – 13 и 28; нонвариантные точки – 4 и 11.
3. Показано, что увеличение количества геометрических образов с повышением температуры от 0 до 25°C связано с образованием новых равновесных фаз, что вполне согласуется с основными принципами физико-химического анализа и правилом фаз Гиббса.
4. Все прогнозированные и построенные методом трансляции диаграммы фазовых равновесий фрагментированы по областям кристаллизации отдельных твердых фаз (для уровня четырехкомпонентного состава) и совместной кристаллизации двух фаз (для уровня пятикомпонентного состава).
5. Методом растворимости исследованы и впервые построены диаграммы состояния четырехкомпонентных систем: $\text{CaSO}_4\text{-CaCO}_3\text{-Ca(HCO}_3)_2\text{-H}_2\text{O}$; $\text{Na}_2\text{SO}_4\text{-Na}_2\text{CO}_3\text{-NaHCO}_3\text{-H}_2\text{O}$; $\text{Na,Ca//SO}_4,\text{CO}_3\text{-H}_2\text{O}$; $\text{Na,Ca//CO}_3,\text{HCO}_3\text{-H}_2\text{O}$ при 0 и 25°C . Полученные экспериментальные данные, достоверность которых подтверждается методами химического, кристаллооптического и рентгенофазового анализов, хорошо согласуются с данными полученными, методом трансляции.

Основное содержание диссертационной работы изложено в следующих публикациях:

Статьи:

1. Солиев, Л. Фазовые равновесия системы $\text{Na,Ca//CO}_3,\text{HCO}_3\text{-H}_2\text{O}$ при 25°C / Л. Солиев, М. Джумаев, Г. Икбол, И. Низомов // ДАН Республики Таджикистан. - 2012. -Т. 55. № 3. С. 220-224.
2. Солиев, Л. Фазовые равновесия системы $\text{Na,Ca//SO}_4,\text{HCO}_3\text{-H}_2\text{O}$ при 25°C / Л. Солиев, М. Джумаев, В. Нури, Ш. Авлоев // Вестник национального университета, серия естественных науки. - 2012. № 1/3 (85). С. 202-205.
3. Солиев, Л. Определение фазовых равновесий в системе $\text{Na,Ca//CO}_3,\text{HCO}_3\text{-H}_2\text{O}$ при 0 и 25°C / Л. Солиев, М. Джумаев, Ш. Авлоев, Г. Икбол // Вестник педагогического университета. – 2013. № 3 (52). С. 60-64.
4. Солиев, Л. Фазовые равновесия системы $\text{Na,Ca//SO}_4,\text{HCO}_3\text{-H}_2\text{O}$ при 0°C / Л. Солиев, М. Джумаев, В. Нури, Ш. Авлоев // ДАН Республики Таджикистан. - 2013. -Т. 56. № 2. С. 119-123.
5. Джумаев, М. Фазовые равновесия системы $\text{Na,Ca//CO}_3,\text{HCO}_3\text{-H}_2\text{O}$ при 0°C / М. Джумаев, Л. Солиев, Ш. Авлоев, Г. Икбол // Вестник национального университета, серия естественных науки. - 2013. № 1/1 (102). С. 151-154.

6. **Джумаев, М.** Фазовые равновесия системы $\text{CaSO}_4\text{-CaCO}_3\text{-Ca}(\text{HCO}_3)_2\text{-H}_2\text{O}$ при 25 °C / **М. Джумаев, Л. Солиев, Ш. Авлоев** // Вестник национального университета, серия естественных науки. - 2013. № 1/2 (106). С. 178-181.
7. **Dzhumaev, M.** Phase balance in system $\text{Na,Ca//SO}_4,\text{CO}_3,\text{HCO}_3\text{-H}_2\text{O}$ at 0 °C / **M. Dzhumaev, L. Soliev, Sh. Avloev** // «European Science and Technology» Materials of the VII international research and practice conference. Munich, Germany -2014. PP. 112-118.
8. Солиев, Л. Строение диаграмм фазовых равновесий четырёхкомпонентных взаимных систем, составляющих шестикомпонентную систему $\text{Na,Ca//SO}_4,\text{CO}_3,\text{HCO}_3,\text{F-H}_2\text{O}$ (изотерма 25 °C) / Л. Солиев, М. Усмонов, **М. Джумаев, Н. Валентино, И. Гулом** // Вестник Таджикского национального университета. - 2014. № 1/4(153). С.195-199.
9. **Dzhumaev, M.** Phase equilibriums of $\text{Na,Ca//SO}_4,\text{CO}_3,\text{HCO}_3\text{-H}_2\text{O}$ system at 25 degrees celsius / **M. Dzhumaev, L. Soliev, Sh. Avloev** // «Global Science and Innovation» Materials of the III international scientific conference. Chicago, USA 2014. PP. 17-22.
10. Солиев, Л. Фазовые равновесия системы $\text{CaSO}_4\text{-CaCO}_3\text{-Ca}(\text{HCO}_3)_2\text{-H}_2\text{O}$ при 0 °C / Л. Солиев, **М. Джумаев, Ш. Авлоев** // ДАН Республики Таджикистан. - 2014. -Т. 57. № 8. С. 671-676.
11. Гулом, И. Фазовые равновесия системы $\text{Na,Ca//CO}_3,\text{HCO}_3,\text{F-H}_2\text{O}$ при 0 °C / И. Гулом, И. Низомов, Л. Солиев, **М. Джумаев** // Вестник Таджикского национального университета. - 2015. № 1/1(156). С.135-141.
12. Солиев, Л. Растворимость в системе $\text{CaSO}_4\text{-CaCO}_3\text{-Ca}(\text{HCO}_3)_2\text{-H}_2\text{O}$ при 0 °C /Л. Солиев, **М. Джумаев, Ш. Авлоев, А. Тошов** // ДАН Республики Таджикистан. - 2015. -Т. 58, № 2. С. 139-144.
13. **Джумаев, М.** Растворимость в системе $\text{CaSO}_4\text{-CaCO}_3\text{-Ca}(\text{HCO}_3)_2\text{-H}_2\text{O}$ при 25 °C / **М. Джумаев, Л. Солиев, А. Тошов** // Вестник Таджикского национального университета. - 2015. № 1/6(191). С. 110-116.
14. Солиев, Л. Растворимость в системе $\text{Na}_2\text{SO}_4\text{-Na}_2\text{CO}_3\text{-NaHCO}_3\text{-H}_2\text{O}$ при 25 °C / Л. Солиев, М. Джумаев, И. Низомов // ДАН Республики Таджикистан. - 2016. -Т. 58, № 9. С. 827-834.
15. Солиев, Л. Растворимость в системе $\text{Na,Ca//SO}_4,\text{CO}_3\text{-H}_2\text{O}$ при 0 °C / Л. Солиев, **М. Джумаев, М. Усмонов, И. Низомов** // Журнал неорганической химии РАН. – 2016. Т. 61, № 5. С. 683-688. (Soliev L. Solubility in the $\text{Na,Ca//SO}_4,\text{CO}_3\text{-H}_2\text{O}$ System at 0 °C / L. Soliev, **M. Dzhumaev, M. Usmonov, I. Nizomov** // Russian Journal of inorganic chemistry. – 2016. Vol.61, № 5. PP. 651-656.)
16. Солиев, Л. Растворимость в системе $\text{Na,Ca//SO}_4,\text{CO}_3\text{-H}_2\text{O}$ при 25 °C / Л. Солиев, **М. Джумаев, М. Усмонов** // Журнал неорганической химии РАН. – 2016. Т. 61, № 8. С. 1093-1099. (Soliev L. Solubility in the $\text{Na,Ca//SO}_4,\text{CO}_3\text{-H}_2\text{O}$ System at 25 °C / L. Soliev, **M. Dzhumaev, M. Usmonov** // Russian Journal of inorganic chemistry. – 2016. Vol.61, № 8. PP. 1041-1046.)
17. Солиев, Л. Диаграммы фазовых равновесий четырёхкомпонентных взаимных систем, составляющих шестикомпонентную систему $\text{Na,Ca//SO}_4,\text{CO}_3,\text{HCO}_3,\text{F-H}_2\text{O}$ (изотерма 25 °C / Л.Солиев, М.Усмонов, **М. Джумаев, Н. Валентина, И. Гулом** // Вестник Таджикского национального университета. - 2016. № ¼ (216). С.213-216.
18. Солиев, Л. Строение диаграммы растворимости системы $\text{Na}_2\text{SO}_4\text{-Na}_2\text{CO}_3\text{-NaHCO}_3\text{-H}_2\text{O}$ при 25 °C/Л. Солиев, **М.Т. Джумаев, И.М. Низомов**//Международный центр инновационных исследований «ОМЕГА САЙНС». Международного научного журнала «Символ науки» № 4, 2016, С. 35-41.
19. Soliev, L. Structure of solubility diagram of the quaternary $\text{Na,Ca//SO}_4,\text{CO}_3\text{-H}_2\text{O}$ water-salt system at 25 °C / L. Soliev, **M. Jumaev, Sh. Tursunbadalov, M. Usmonov, Sh. Avloev**// Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. – Vienna, 2016. № 9-10. PP. 83-90.
20. Солиев, Л. Растворимость в системе $\text{Na,Ca//CO}_3,\text{HCO}_3\text{-H}_2\text{O}$ при 25 °C / Л. Солиев, **М. Джумаев, Б. Джабборов** // Журнал неорганической химии РАН. – 2017. Т. 62, № 9. С. 1254-1259. (Soliev L. Solubility in the $\text{Na,Ca//CO}_3,\text{HCO}_3\text{-H}_2\text{O}$ System at 25 °C /

- L. Soliev, **M. Dzharmaev**, B. Dzhabborov // Russian Journal of inorganic chemistry. – 2017. Vol.62, № 9. PP. 1245-1251.).
21. Солиев, Л. Растворимость в системе $\text{Na}_2\text{SO}_4\text{-Na}_2\text{CO}_3\text{-NaHCO}_3\text{-H}_2\text{O}$ при 0°C / Л. Солиев, **М. Джумаев**, Р. Тураев // ДАН Республики Таджикистан. - 2017. -Т. 60. № 9. С. 430-436.
 22. Soliev, L. Solubility and phase equilibria in the $\text{Na,Ca//CO}_3\text{,HCO}_3\text{-H}_2\text{O}$ system at 0°C / L. Soliev, **M. Dzharmaev**, B. Dzhabborov // Chimica Techno Acta. 2017. Vol.4, № 3. PP. 191-201.
- Тезисы докладов конференции:**
23. **Джумаев, М.** Фазовые равновесия системы $\text{Na,Ca//SO}_4\text{,CO}_3\text{-H}_2\text{O}$ при 0°C / **М. Джумаев**, Ш. Авлоев, Л. Солиев // Матер. Междунар. Науч. теорет. конф, «Посвященная 60 – летию АН Респ. Таджикистан» - Душанбе. 2011. С. 7-9.
 24. Солиев, Л. Определение фазовых равновесий в системе $\text{Na,Ca//CO}_3\text{,HCO}_3\text{-H}_2\text{O}$ / Л. Солиев, **М. Джумаев**, И. Гулом, И. Низомов // Матер. Республ. Конф. «Комплексообразование в растворах». – Душанбе. ТНУ, 2012. С. 46.
 25. **Джумаев, М.** Определение фазовых равновесие системы $\text{Na,Ca//CO}_3\text{,HCO}_3\text{-H}_2\text{O}$ при 0°C / **М. Джумаев**, Л. Солиев, Ш. Авлоев // Матер. Республ. науч. конф. «Химия, технология и экология воды», посвящ. году «Сотрудничество по водной проблеме» и 55-летию кафедры «Общая и неорганическая химия». -Душанбе. 2013. С. 30-32.
 26. Солиев, Л. Фазовые равновесия в невариантных точках системы $\text{Na,Ca//SO}_4\text{,CO}_3\text{,HCO}_3\text{,F-H}_2\text{O}$ при 25°C на уровне четырёхкомпонентного состава / Л. Солиев, М. Усмонов, **М. Джумаев**, Н. Валентино, И. Гулом // Матер. III Междунар. конф. «Современные проблемы физической химии». -Донецк. 2013. С. 199-200.
 27. Солиев, Л. Строение диаграммы фазовых равновесий системы $\text{Na,Ca//SO}_4\text{,HCO}_3\text{-H}_2\text{O}$ при 0 и 25°C / Л. Солиев, **М. Джумаев**, Ш. Авлоев // Матер. Междунар. конф. «Экологбезопасные и ресурсосберегающие технологии и материалы». -Улан-Уде. 2014. С. 226-228.
 28. Солиев, Л. Строение диаграмм фазовых равновесий четырёхкомпонентных систем с общим ионом, составляющих шестикомпонентную систему $\text{Na,Ca//SO}_4\text{,CO}_3\text{,HCO}_3\text{,F-H}_2\text{O}$ (изотерма 25°C) / Л. Солиев, М. Усмонов, **М. Джумаев**, Н. Валентино, И. Гулом // Матер. Междунар. конф. «Теплофизические исследования и измерения при контроле качества веществ, материалов и изделий». –Душанбе-Тамбов. 2014. С.390-393.
 39. Солиев, Л. Строение фазовых диаграмм четырёхкомпонентных взаимных систем, составляющих шестикомпонентную систему $\text{Na,Ca//SO}_4\text{,CO}_3\text{,HCO}_3\text{,F-H}_2\text{O}$, при 25°C / Л. Солиев, М. Усмонов, **М. Джумаев**, В. Нури, Г. Икбол // Матер. Междунар. Науч. прак. конф. «Посвященной 1150 – летию персидско-таджикского учёного-энциклопедиста, врача, алхимика и философа Абу Бакра Мухаммада ибн Закария Рази». -Душанбе. 2015. С.2015.
 30. Солиев, Л. Равновесные твёрдые фазы четверных невариантных точек системы $\text{Na,Ca//SO}_4\text{,CO}_3\text{,HCO}_3\text{,F-H}_2\text{O}$ при 25°C / Л. Солиев, М. Усмонов, **М. Джумаев**, С. Холмуродов, В. Нури, Г. Икбол // Матер. Всероссийской науч. конф. с международным участием «II Байкальский материаловедческий форум», 29 июня – 5 июля 2015 г. Улан-Уде, Изд-во БНЦ СО РАН, 2015. С. 111-112.
 31. Солиев, Л. Растворимости системы $\text{CaSO}_4\text{-CaCO}_3\text{-Ca(HCO}_3\text{)-H}_2\text{O}$ при 0°C / Л. Солиев, **М. Джумаев**, А. Тошов, З. Худоёрбекова // Сборник научных трудов по материалам VI Международной научно-практической конференции «Современные тенденции развития науки и технологий», 30 сентября 2015 г., г. Белгород, 2015. С. 28-31.
 32. Солиев, Л. Растворимости системы $\text{CaSO}_4\text{-CaCO}_3\text{-Ca(HCO}_3\text{)-H}_2\text{O}$ при 25°C / Л. Солиев, **М. Джумаев**, З. Худоёрбекова//Сборник статей Международной научно-практической конференции «Научные исследования и разработки в эпоху глобализации», 5 февраля 2016 г., г. Киров, 2016. С. 26-30.

33. Солиев, Л. О фазовых равновесиях в системе $\text{Na,Ca//SO}_4\text{,CO}_3\text{-H}_2\text{O}$ при 25°C / И. Борисов, М. Шолитодов, **М. Джумаев**, А. Набиев // Материалы II Всероссийской молодежной конференции – школы с международным участием. «Достижения химии в агропромышленном комплексе». 1-3 июня 2016 г., г. Уфа, Башкирский ГАУ. с. 31-36.
34. Солиев, Л. Строение диаграммы растворимости системы $\text{Na,Ca//SO}_4\text{,CO}_3\text{-H}_2\text{O}$ при 0°C . / Л. Солиев, **М. Джумаев**, М. Усмонов, И. Низомов // Материалы XI Международного Курнаковского совещания по физико-химическому анализу в рамках XX Менделеевского съезда по общей и прикладной химии. Россия, г. Воронеж, 27 июня – 1 июля 2016 г., С. 217-221.
35. Солиев, Л. Изотермы растворимости и фазовых равновесий системы $\text{Na,Ca//SO}_4\text{,CO}_3\text{-H}_2\text{O}$ при 0 и 25°C . / **М. Джумаев**, М. Усмонов, И. Низомов // Материалы международной конференции «Термический анализ и калориметрии (RTAC) – 2016, Часть II., Россия, Санкт-Петербург, 16-23 сентября 2016 г., С. 322-324.
36. Солиев, Л. Строение диаграммы фазовых равновесий системе $\text{Na,Ca//CO}_3\text{,HCO}_3\text{-H}_2\text{O}$ при 25°C / Л. Солиев, **М. Джумаев**, Б. Джабборов // Матер. III Всероссийской науч. конф. с международным участием «II Байкальский материаловедческий форум», -18-20 мая 2017 г. Улан-Уде, Изд-во БНЦ СО РАН, 2017. С. 149-152.
37. Солиев, Л. Строение диаграммы фазовых равновесий в системе $\text{Na}_2\text{SO}_4\text{-Na}_2\text{CO}_3\text{-NaHCO}_3\text{-H}_2\text{O}$ при 0°C / Л. Солиев, **М. Джумаев**, Р. Тураев // Матер. III Всероссийской науч. конф. с международным участием «II Байкальский материаловедческий форум», -18-20 мая 2017 г. Улан-Уде, Изд-во БНЦ СО РАН, 2017. С. 152-154.