



Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология. 2026. Т. 26, вып. 1. С. 34–46

*Izvestiya of Saratov University. Chemistry. Biology. Ecology*, 2026, vol. 26, iss. 1, pp. 34–46

<https://ichbe.sgu.ru>

<https://doi.org/10.18500/1816-9775-2026-26-1-34-46>, EDN: ETJXCS

Научная статья

УДК 544.344.016+536.445:544.344.013-16-14+66.061

## Влияние карбоната лития на растворимость и фазовое поведение двойных систем вода – диизопропиламин и вода – триэтиламин



В. В. Данилина , К. Е. Зубарев, Н. О. Хлопцев, Д. Г. Черкасов

Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, Россия, 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, д. 83

Данилина Вероника Владимировна, кандидат химических наук, доцент кафедры общей и неорганической химии Института химии, [danilinaa-3@mail.ru](mailto:danilinaa-3@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0001-6385-2428>

Зубарев Кирилл Евгеньевич, магистрант Института химии, [zubarevk4@mail.ru](mailto:zubarevk4@mail.ru), <https://orcid.org/0009-0007-8716-0822>

Хлопцев Никита Олегович, студент Института химии, [nikitun68@gmail.com](mailto:nikitun68@gmail.com), <https://orcid.org/0009-0006-1329-3086>

Черкасов Дмитрий Геннадиевич, доктор химических наук, профессор кафедры общей и неорганической химии, [dgcherkasov@mail.ru](mailto:dgcherkasov@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-6862-1917>

**Аннотация.** Фазовые равновесия и растворимость изучены визуально-политермическим методом в смесях компонентов по ряду сечений треугольника состава в интервале 10–60°C в тройных системах карбонат лития – вода – диизопропиламин (триэтиламин). Для каждой системы определены температуры образования критической ноды монотектического состояния: в системе с триэтиламином она равна 14.0°C, с диизопропиламином 22.4°C. Изотермические фазовые диаграммы тройной системы карбонат лития – вода – диизопропиламин построены при 15.0, 20.0, 22.4, 25.0, 27.3 и 30°C, определена растворимость компонентов. Установлено, что в интервале 20.0–30.0°C на изотермах существует монотектический треугольник с примыкающими полями насыщенных растворов и расслоения. Установлено, что при введении карбоната лития в водно-аминные смеси происходит понижение НКТР: с 18.3 до 14.0°C для системы вода – триэтиламин и с 27.3 до 22.4°C для системы вода – диизопропиламин. Это указывает на высаливающее действие карбоната лития на смеси компонентов указанных бинарных систем. Оценена эффективность применения триэтиламина в процессе экстрактивной кристаллизации карбоната лития. Методом рентгенофлуоресцентного анализа показано, что использование триэтиламина в качестве антирастворителя позволяет значительно снизить содержание ряда примесей (Cu, Ni, Al, S) и полностью удалить некоторые из них (Mn, Cr, Pm). Таким образом, подтверждена принципиальная возможность очистки карбоната лития с помощью экстрактивной кристаллизации.

**Ключевые слова:** фазовая диаграмма, растворимость, экстрактивная кристаллизация, карбонат лития, диизопропиламин, триэтиламин

**Благодарности.** Авторы благодарят центр коллективного пользования СГУ, доцента А. В. Ушакова за регистрацию и интерпретацию рентгеновских дифрактограмм, профессора М. М. Бурашникову за проведение рентгенофлуоресцентного анализа.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 24-79-00095, <https://rscf.ru/project/24-79-00095/>).

**Для цитирования:** Данилина В. В., Зубарев К. Е., Хлопцев Н. О., Черкасов Д. Г. Влияние карбоната лития на растворимость и фазовое поведение двойных систем вода – диизопропиламин и вода – триэтиламин // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология. 2026. Т. 26, вып. 1. С. 34–46. <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2026-26-1-34-46>, EDN: ETJXCS

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)

Article

### Effect of lithium carbonate on the solubility and phase behavior of water–diisopropylamine and water–triethylamine binary systems

V. V. Danilina , K. E. Zubarev, N. O. Khloptsev, D. G. Cherkasov

Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia

Veronica V. Danilina, [danilinaa-3@mail.ru](mailto:danilinaa-3@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0001-6385-2428>

Kirill E. Zubarev, [zubarevk4@mail.ru](mailto:zubarevk4@mail.ru), <https://orcid.org/0009-0007-8716-0822>

Nikita O. Khloptsev, [nikitun68@gmail.com](mailto:nikitun68@gmail.com), <https://orcid.org/0009-0006-1329-3086>

Dmitry G. Cherkasov, [dgcherkasov@mail.ru](mailto:dgcherkasov@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-6862-1917>

© Данилина В. В., Зубарев К. Е., Хлопцев Н. О., Черкасов Д. Г., 2026



**Abstract.** Phase equilibria and solubility have been studied by the visual polythermal method in mixtures of components along a series of sections of the composition triangle within the temperature range of 10–60°C in the ternary systems lithium carbonate – water – diisopropylamine (triethylamine). For each system, the temperatures of formation of the critical node of the monotectic state have been determined: in the system with triethylamine, it is 14.0°C, and with diisopropylamine, it is 22.4°C. Isothermal phase diagrams of the ternary system lithium carbonate – water – diisopropylamine have been constructed at 15.0, 20.0, 22.4, 25.0, 27.3, and 30°C, and the component solubility was determined. It has been established that in the temperature range of 20.0–30.0°C, the isotherms feature a monotectic triangle adjacent to the fields of saturated solutions and phase separation. It has been found that the introduction of lithium carbonate into water-amine mixtures leads to a decrease in the Lower Critical Solution Temperature (LCST): from 18.3 to 14.0°C for the water – triethylamine system and from 27.3 to 22.4°C for the water – diisopropylamine system. This indicates a salting-out effect of lithium carbonate on the component mixtures of the specified binary systems. The efficiency of using triethylamine in the process of extractive crystallization of lithium carbonate has been evaluated. X-ray fluorescence analysis has demonstrated that the use of triethylamine as an antisolvent allows for a significant reduction in the content of a number of impurities (Cu, Ni, Al, S) and the complete removal of some of them (Mn, Cr, Pm). Thus, the fundamental possibility of purifying lithium carbonate via extractive crystallization has been confirmed.

**Keywords:** phase diagram, solubility, extractive crystallization, lithium carbonate, diisopropylamine, triethylamine

**Acknowledgments.** The authors thank the Saratov State University Shared Use Center, Associate Professor Arseny V. Ushakov for recording and interpreting X-ray diffraction patterns, and Professor Marina M. Burashnikova for conducting X-ray fluorescence analysis.

The research has been carried out with the financial support of the Russian Science Foundation (grant No. 24-79-00095, <https://rscf.ru/project/24-79-00095/>).

**For citation:** Danilina V. V., Zubarev K. E., Khloptsev N. O., Cherkasov D. G. Effect of lithium carbonate on the solubility and phase behavior of water–diisopropylamine and water–triethylamine binary systems. *Izvestiya of Saratov University. Chemistry. Biology. Ecology*, 2026, vol. 26, iss. 1, pp. 34–46 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2026-26-1-34-46>, EDN: ETJXCS

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)

## Введение

Одним из перспективных способов получения чистых солей является экстрактивная кристаллизация. Органический растворитель, называемый антирастворителем, добавляют в водный раствор соли, что приводит к значительному снижению ее растворимости и выпадению в осадок.

Актуальность данного способа получения солей заключается в его меньшей энергозатратности по сравнению с традиционным упариванием растворов [1–3]. Второе преимущество – возможность извлечения солей, для которых традиционный способ является малоэффективным. Это особенно относится к карбонату лития, который имеет небольшой отрицательный температурный коэффициент растворимости. Третье преимущество заключается в совмещении процесса кристаллизации с одновременной очисткой получаемых кристаллов от примесей [2, 4–6]. Среди антирастворителей наиболее перспективными являются те, которые вызывают расслаивание при введении в водные растворы солей. Это позволяет отделить органическую фазу, регенерировать из нее антирастворитель и использовать его повторно. Установлено [7, 8], что наилучшим сочетанием физико-химических свойств среди антирастворителей обладают алифатические амины. Основываясь на нашем опыте работы

[9–11] с соединениями этого класса, в качестве антирастворителей выбраны триэтиламин и диизопропиламин.

В литературе были найдены несколько работ [12–16], посвященных влиянию солей лития на растворимость и фазовое поведение двойных систем вода–органический растворитель. Авторы работы [12] изучали четыре тройные системы сульфат (формиат) лития – вода – диизопропиламин (триэтиламин) для выяснения возможности применения этих аминов в процессе экстрактивной кристаллизации солей. Для проведения регенерации аминов была выбрана температура 20°C. Процесс кристаллизации соли в системе сульфат лития – вода – триэтиламин проводили при температуре равной 2°C, а для системы с диизопропиламином был предложен интервал от –5 до 1°C. Для двух тройных систем формиат лития – вода – триэтиламин (диизопропиламин) была выбрана температура кристаллизации равная 1°C. Был сделан вывод, что триэтиламин и диизопропиламин являются перспективными антирастворителями. Однако для получения сульфата и формиата лития выгоднее использовать триэтиламин, так как его содержание в органической фазе больше, чем диизопропиламина, а содержание обоих аминов в водной фазе практически одинаково.

В [13] приведены результаты изучения фазовых равновесий четырех тройных систем



пропан-1-ол + вода + хлорид натрия, пропан-1-ол + вода + хлорид калия, пропан-2-ол + вода + хлорид лития и пропан-2-ол + вода + бромид лития при атмосферном давлении. Фазовое поведение этих смесей демонстрирует трехфазное равновесие двух жидких фаз и паровой фазы. Построены фрагменты фазовых диаграмм для этих систем, изображающие участки бинодальных кривых при температурах кипения смесей и атмосферном давлении.

Данные о равновесии жидкость – жидкость для расслаивающихся тройных систем вода + 1-бутанол + соль были измерены при 25°C [14]. В качестве солей использовали хлорид лития, бромид натрия и иодид калия. Системы сравнивали с точки зрения эффективности высаливания и эффектов сольватации. Предполагается, что процесс сольватации в органической фазе различен для всех трех солей. Сольватация NaBr, по-видимому, осуществляется только водой, в то время как для LiCl и KI наблюдаются смешанные эффекты сольватации. Все три соли оказывают сильный эффект высаливания 1-бутанола из водной фазы, эффективность которого снижается в ряду LiCl > NaBr > KI.

В статье [15] экспериментально представлены данные о равновесии твердое–жидкость–жидкость для тройных систем вода–LiCl–2-бутанол, вода–LiCl–2-метил-1-пропанол и вода–LiCl–1-бутанол при 25°C. Построенные фазовые диаграммы показывают различия между системами. В системе с 1-бутанолом твердая фаза равновесия жидкость–жидкость–твердое представляет собой моногидрат хлорида лития. Однако в системах с 2-бутанолом и 2-метил-1-пропанолом в равновесии с двумя жидкими фазами находится безводная соль. В области двух жидких фаз три диаграммы очень похожи и имеют необычную S-образную форму бинодальной кривой.

Данные о равновесии жидкость – жидкость и жидкость – твердое в тройной системе вода + LiCl + 2-метил-2-пропанол (трет-бутанол) были определены экспериментально при 25 и 40°C в работе [16]. В системе проявляется заметный эффект высаливания: введение небольших количеств LiCl в гомогенные смеси вода + 2-метил-2-пропанол вызывает их расслаивание. Авторам не удалось определить состав твердой фазы, находящейся в равновесии с двумя жидкими фазами. Предполагается, что соль может

образовывать смешанный сольват, содержащий как молекулы воды, так и 2-метил-2-пропанола.

Авторы работ [15, 16] делают попытку объяснить такую необычную S-образную форму бинодальной кривой участием органического растворителя в сольватации ионов лития: в органической фазе вода и органический растворитель конкурируют за сольватацию ионов. Известно, что ионный радиус Li<sup>+</sup> намного меньше, чем у Na<sup>+</sup> и K<sup>+</sup>. Высокая удельная поверхностная плотность заряда иона Li<sup>+</sup> может индуцировать ион-дипольные взаимодействия между ионом Li<sup>+</sup> и молекулами бутанола, которые могут сольватировать ион. Это может быть причиной того, что растворимость LiCl в бутанолах высока (выше 10 мас. %).

В литературе нет сведений о влиянии карбоната лития на растворимость и фазовое поведение двойных систем вода – триэтиламин и вода – диизопропиламин. Цель нашего исследования состояла в выявлении влияния карбоната лития на растворимость и фазовое поведение двойных систем вода – диизопропиламин и вода – триэтиламин путем изучения фазовых равновесий в тройных системах карбонат лития – вода – диизопропиламин (триэтиламин) в широком интервале температур и оценка возможности очистки карбоната лития в процессе экстрактивной кристаллизации под действием триэтиламина. Указанные тройные системы впервые изучены в настоящей работе.

В тройные системы карбонат лития – вода – диизопропиламин и карбонат лития – вода – триэтиламин входят четыре двойных составляющих системы. Кратко охарактеризуем растворимость и фазовые равновесия в них.

**Двойная система вода – карбонат лития.** Диаграмма растворимости двойной системы карбонат лития – вода изучена в широком интервале температур [17, 18]. Карбонат лития мало растворим в воде, его растворимость увеличивается с понижением температуры, т.е. эта соль имеет отрицательный температурный коэффициент растворимости, не образует кристаллогидратов.

**Двойная система вода – диизопропиламин.** Растворимость компонентов двойной системы исследована в работах [3, 7, 9, 19, 20]. Приведенные в [3, 20] критические температуры различаются, и состав критического раствора не указывается. В работе [21] иссле-



довали растворимость компонентов двойной системы в интервале от 20 до 90°C. Отмечено, что указанная жидкостная система характеризуется нижней критической температурой растворения (НКТР) при 27.3°C. Нами [11] продолжено изучение смесей компонентов двойной системы визуально-политермическим методом при температурах ниже нуля градусов для определения границ поля кристаллизации льда. Установлено, что кривая кристаллизации льда пологая и имеет короткий горизонтальный участок в области составов, отвечающих критическим смесям.

#### **Двойная система вода – триэтиламин.**

Эта двойная система характеризуется расщеплением с НКТР, определенные значения которой многочисленны и различаются в пределах от 17.55°C [22] до 18.7°C [23]. Наибольшие расхождения наблюдаются в части диаграммы растворимости, отвечающей интервалу 18–30°C. НКТР, приводимые авторами, имеют следующие значения: 17.55°C [22], 17.6°C [24, 25], 18.24°C [26, 27], 18.3°C [28, 29], 18.33°C [30], 18.36°C [31], 18.39°C [32], 18.6°C [33], 18.7°C [23]. Содержание амина в смеси, отвечающей НКТ, значительно различается: 25.8 мас.% [23], ~30 мас.% [22], 32.2 мас.% [30], 35.15 мас.% [31], 35.4 мас.% [24], 51.90 мас.% [33]. Рассматриваемая двойная система была повторно исследована в нашей лаборатории [34]. Координаты нижней критической точки ( $t=18.3^\circ\text{C}$ , содержание триэтиламина в критическом растворе 32.10 мас.%) и результаты определения взаимной растворимости компонентов хорошо согласуются с данными работы [30]. В работе [28] приведена фазовая диаграмма двойной системы триэтиламин – вода, на которой отмечен плавящийся конгруэнтно при  $-22^\circ\text{C}$  дигидрат триэтиламина.

**Система карбонат лития – диизопропиламин (триэтиламин).** Данные по растворимости карбоната лития в аминах в литературе не обнаружены. Проведенные нами исследования показали, что эта соль практически не растворима в указанных растворителях во всем интервале температуры исследования.

#### **Материалы и методы**

Деионизированная вода высокой чистоты (удельное электрическое сопротивление 18 МОм·см при 25°C) была получена с исполь-

зованием системы очистки воды «Спектр Осмос». Препарат триэтиламина квалификации «ч» (Вектон, Россия) очищали по методике [35]. Сначала его осушали щелочью (KOH) в течение трех дней, затем фильтрат перегоняли на установке с елочным дефлегматором высотой 0.3 м. Для работы отбирали фракцию с температурой кипения 90.0–91.0°C. Растворитель идентифицировали по температуре кипения ( $t_{\text{кип}} = 89.4^\circ\text{C}$ ) и показателю преломления ( $n_D^{20} = 1.4007$ ). Физико-химические константы в пределах погрешности совпали с литературными данными [36]. Показатели преломления измеряли на рефрактометре ИРФ-22 с погрешностью  $\pm 1 \cdot 10^{-4}$ . Препарат диизопропиламина (ACROSS ORGANICS, содержание основного вещества  $\geq 99.0\%$ ) дополнительной очистке не подвергался, поскольку его физико-химические константы в пределах погрешности совпали с литературными данными [36].

Карбонат лития «х.ч.» (Новосибирский завод редких металлов, содержание основного вещества  $\geq 99.0\%$ ) тонко растирали в агатовой ступке и сушили над оксидом фосфора (V) при 120°C до постоянной массы. Отсутствие влаги в соли контролировали термогравиметрическим анализом.

Визуально-политермический метод описан в [37]. Методология его применения к тройным системам соль–два растворителя подробно изложена в [38]. Растворимость и фазовые равновесия в смесях компонентов тройных систем карбонат лития – вода – диизопропиламин (триэтиламин) исследовали этим методом в запаянных термостойких стеклянных ампулах при давлении паров растворителей и воздуха в интервале температур 10–60°C. Запаянные стеклянные ампулы со смесями поочередно помещали в ультратермостат Lauda A-100 с прозрачными стенками (рабочая жидкость – дистиллированная вода). В термостате температуру поддерживали с точностью 0.1°C и измеряли электронным термометром ЛТ-300-Н. Нагревание и охлаждение рабочей жидкости около температуры фазового перехода проводили со скоростью 0.5 град/мин. Каждое значение температуры фазового перехода являлось средним результатом нескольких повторных измерений и характеризовалось погрешностью  $\pm 0.1^\circ\text{C}$ . Твердую фазу насыщенных растворов идентифицировали с помощью термического (дериватограф OD-102, MOM,



Венгрия) и рентгенофазового (дифрактометр ДРОН-8Т) анализов. Установлено, что твердой фазой при всех температурах интервала исследования являлся карбонат лития.

По результатам политермических исследований для каждого сечения концентрационного треугольника были построены политермы фазовых состояний. Они представляют собой зависимости температуры фазового перехода от содержания одного из компонентов в смесях. Используя политермы графической интерполяции, были определены составы смесей, соответствующие точкам фазовых переходов при выбранных нами температурах. Затем при этих температурах были построены изотермические фазовые диаграммы тройной системы [38]. Относительная погрешность определения составов смесей, отвечающим точкам фазовых переходов, составила  $\pm 0.5\text{--}1.0\%$ .

Элементный состав карбоната лития, полученного в процессе экстрактивной кристаллизации, определяли рентгенофлуоресцентным методом с применением энергодисперсионного анализатора EDX-720 (производитель SHIMADZU, Япония). Для возбуждения спектра использовалась рентгеновская трубка с Rh-анодом (напряжение 50 кВ, ток 100 мкА).

## Результаты и их обсуждение

### Тройная система карбонат лития – вода – диизопропиламин

Визуально-политермическим методом в интервале от 10 до 60°C изучены фазовые равновесия в смесях компонентов тройной системы карбонат лития – вода – диизопропиламин, составы которых изменялись по пяти сечениям концентрационного треугольника.

Сечения I–IV характеризовались переменным содержанием карбоната лития и постоянным соотношением масс амина и воды: 10 : 90 (I), 25 : 75 (II), 40 : 60 (III), 60 : 40 (IV). Политермы фазовых состояний по сечениям I–IV аналогичны и состоят из четырех кривых, сходящихся в одной точке и отделяющих друг от друга четыре поля фазовых состояний: ненасыщенные растворы  $\ell$ , насыщенные растворы  $\ell + S$  ( $S$  – карбонат лития), расслоение  $\ell_1 + \ell_2$  ( $\ell_1$  – органическая фаза,  $\ell_2$  – водная фаза) и монотектика  $\ell_1 + \ell_2 + S$ . В качестве примера на рис. 1 представлены политермы сечений I и II. Ввиду малой растворимости соли, кривые, отделяющие поле монотектики от поля расслоения и поле насыщенного раствора от ненасыщенного раствора, экспериментально не были определены и на рис. 1 представлены пунктиром.

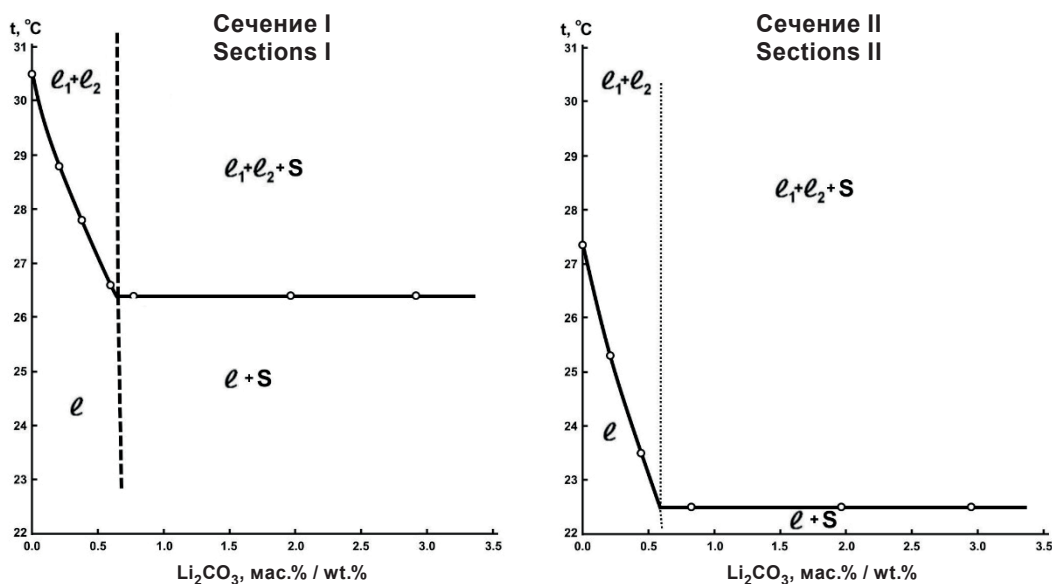


Рис. 1. Политермы фазовых состояний смесей компонентов по сечениям I, II треугольника тройной системы карбонат лития – вода – диизопропиламин

Fig. 1. Polytherms of phase states of mixtures of components in sections I, II of the triangle of the composition of the ternary system lithium carbonate–water–diisopropylamine

Сечение V характеризовалось переменным содержанием диизопропиламина и постоянным соотношением масс карбоната лития и

воды: 5:95. На политерме (рис. 2) две плавные кривые, соединяющиеся в точке KS, отделяют поля насыщенных растворов  $\ell_1+S$  и  $\ell_2+S$  от поля



монотектики  $l_1+l_2+S$ . Введение карбоната лития в двойную систему вода – диизопропиламин понижает НКТР с 27.3 до 22.4°C вследствие

эффекта высаливания солью. На рис. 2 для сравнения приведена бинодальная кривая двойной системы вода – диизопропиламин [11].

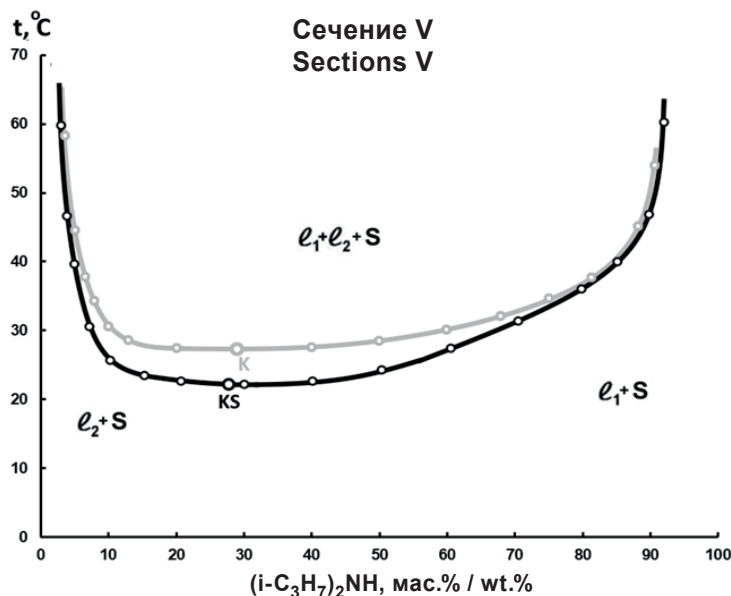


Рис. 2. Политерма фазовых состояний смесей компонентов по сечению V треугольника тройной системы карбонат лития – вода – диизопропиламин (черные точки и кривая) в сравнении с двойной жидкостной системой вода – диизопропиламин (серые точки и кривая)

Fig. 2. Polytherm of phase states of mixtures of components in section V of the triangle of the composition of the ternary system lithium carbonate–water–diisopropylamine (black dots and curve) in comparison with the water – diisopropylamine binary liquid system (gray dots and curve)

Найдено содержание карбоната лития и диизопропиламина в водной и органической фазе монотектического состояния при различных температурах (рис. 3). На основании

полученных политермических данных построены изотермические фазовые диаграммы при шести температурах: 15.0, 20.0, 22.4, 25.0, 27.3 и 30.0°C.

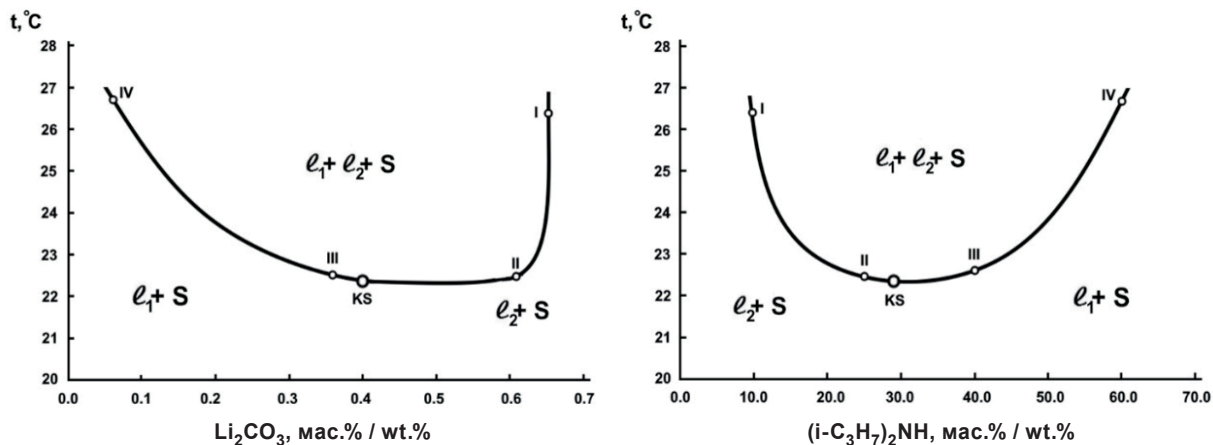


Рис. 3. Зависимость содержания карбоната лития и диизопропиламина в водной и органической фазе монотектического состояния по сечениям I–IV

Fig. 3. Dependence of the content of lithium carbonate and diisopropylamine in the aqueous and organic phases of the monotectic state in sections I–IV



При температуре 15.0°C диаграмма системы характеризуется наличием линии растворимости, разделяющей поля гомогенно-жидкого состояния  $\ell$  и насыщенных растворов  $\ell+S$  (рис. 4). При повышении температуры до 20.0°C поле гомогенно-жидкого состояния незначительно увеличивается вследствие увеличения растворимости карбоната лития в водно-диизопропиламинных растворах. При 22.4°C на линии растворимости появляется критическая точка К, соответствующая смеси, в которой две жидкие

фазы идентичны по составу и свойствам, поле гомогенно-жидкого состояния  $\ell$  незначительно увеличивается. Критическая жидкая фаза К находится в равновесии с твердой фазой S ( $\text{Li}_2\text{CO}_3$ ), следовательно, возникает критическая нода KS монотектического равновесия. Состав критической жидкой фазы К (0.4 мас.%  $\text{Li}_2\text{CO}_3$ , 70.7 мас.%  $\text{H}_2\text{O}$ , 28.9 мас.%  $(i\text{-C}_3\text{H}_7)_2\text{NH}$ ) определяли графически на концентрационном треугольнике по точке пересечения критической ноды с линией растворимости при 22.4°C.

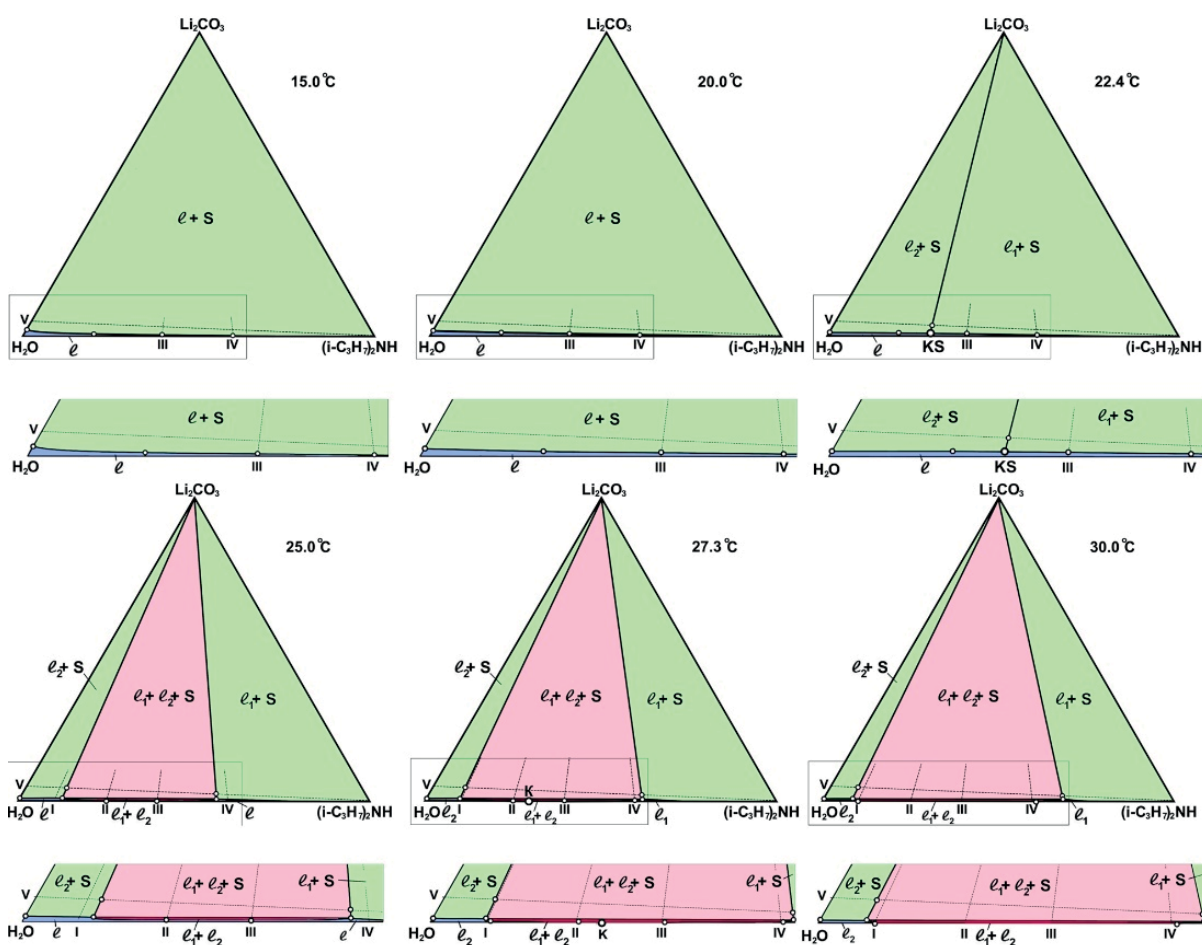


Рис. 4. Изотермы фазовых состояний (мас.%) тройной системы карбонат лития – вода – диизопропиламин при 15.0, 20.0, 22.4, 25.0, 27.3 и 30.0°C

Fig. 4. Isotherms of phase states (wt.%) of the ternary system lithium carbonate – water – diisopropylamine at 15.0, 20.0, 22.4, 25.0, 27.3 and 30.0°C

С повышением температуры, как видно из изотермы при 25.0°C (рис. 5), критическая нода KS трансформируется в монотектический треугольник  $\ell_1+\ell_2+S$  с примыкающими к нему полями насыщенных растворов  $\ell_1+S$ ,  $\ell_2+S$  и небольшим полем расслоения  $\ell_1+\ell_2$ . С дальнейшим повышением температуры размер поля расслоения увеличивается и оно касается стороны

треугольника состава вода – диизопропиламин при 27.3°C, что соответствует НКТР этой двойной системы. Поля насыщенных растворов уменьшаются с ростом температуры. Значения растворимости карбоната лития в воде при указанных температурах были определены методом графической интерполяции по кривой растворимости, построенной по справочным данным [39].

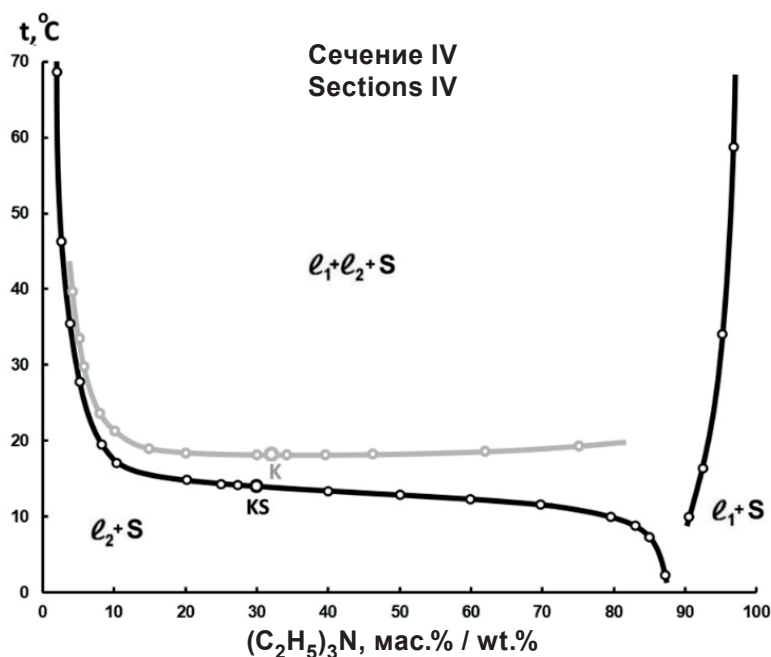


Рис. 5. Политерма фазовых состояний смесей компонентов по сечению I треугольника тройной системы карбонат лития – вода – триэтиламин (черные точки и кривая) в сравнении с двойной жидкостной системой вода – триэтиламин (серые точки и кривая)

Fig. 5. Polytherm of phase states of mixtures of components in section I of the triangle of the composition of the ternary system lithium carbonate–water–triethylamine (black dots and curve) in comparison with the water – triethylamine binary liquid system (gray dots and curve)

### Тройная система карбонат лития – вода – диизопропиламин

В данной тройной системе визуально-политермическим методом были изучены фазовые равновесия в смесях компонентов, составы которых изменялись по четырем сечениям треугольника состава тройной системы карбонат лития – вода – триэтиламин в интервале от 10 до 60°C.

Сечения I–III характеризовались переменным содержанием карбоната лития и постоянным соотношением масс амина и воды: 10:90 (I), 25:75 (II), 40:60 (III). Политермы фазовых состояний по указанным сечениям рассматриваемой системы аналогичны ранее описанным для тройной системы карбонат лития – вода – диизопропиламин.

Сечение IV характеризовалось постоянным содержанием карбоната лития и воды (5:95) и переменным содержанием триэтиламина. При введении карбоната лития в двойную систему вода – триэтиламин происходит понижение НКТР с 18.3 до 14.0°C (см. рис. 5). При этом данная температура не является минималь-

ной температурой, при которой существует расслаивание в тройной системе карбонат лития – вода – триэтиламин. В области растворов, богатых амином, существует еще один компонент – дигидрат триэтиламина [28]. Он влияет на растворимость двойной системы вода – триэтиламин и система ведет себя как псевдочетырехкомпонентная. Нами было найдено содержание карбоната лития и триэтиламина в водной и органической фазах монотектического состояния и построены их зависимости от температуры (рис. 6).

### Экстрактивная кристаллизация карбоната лития в тройных системах соль – вода – триэтиламин

Для оценки изменения содержания примесей в исходном препарате карбоната лития после проведения экстрактивной кристаллизации был проведен рентгенофлуоресцентный анализ осажденного и высушенного препарата, полученного введением триэтиламина (80 мас.%) в насыщенный раствор этой соли при 25°C. Из результатов рентгенофлуоресцентного анализа установлено, что элементный состав примесей в

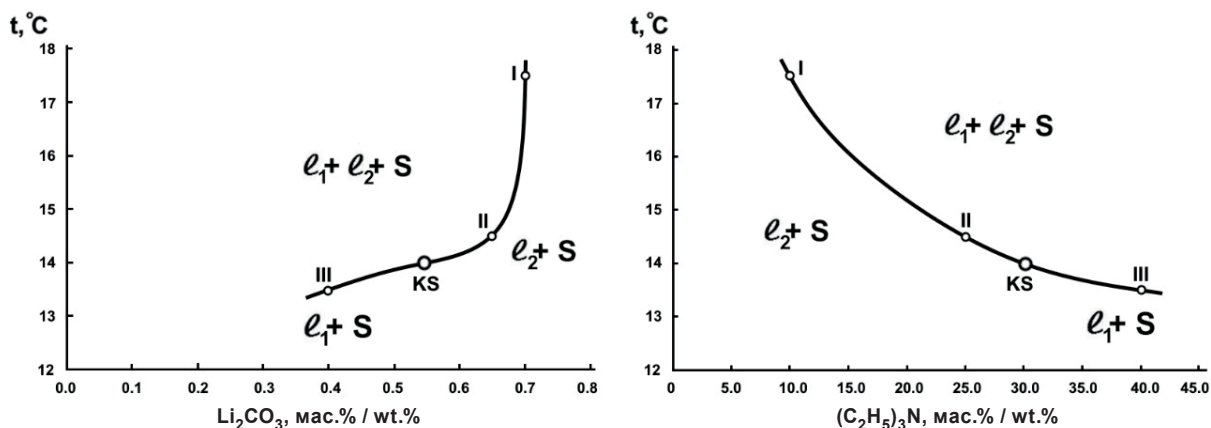


Рис. 6. Зависимость содержания карбоната лития и триэтиламина в водной и органической фазе монотектического состояния по сечениям I–III

Fig. 6. Dependence of the content of lithium carbonate and triethylamine in the aqueous and organic phases of the monotectic state in sections I–III

карбонате лития до и после экстрактивной кристаллизации отличается. Главные изменения коснулись марганца, хрома и прометия, примеси которых не обнаружены после проведения экстрактивной кристаллизации. Содержание меди и никеля сократилось более чем в два раза, алюминия и серы почти в 10 раз.

После экстрактивной кристаллизации было замечено присутствие бария, кальция, ванадия, калия, цинка и скандия, которые в исходном карбонате не обнаруживались. Можно предположить, что произошло концентрирование этих примесей из раствора исходной соли. Кроме этого, анализ показал небольшое увеличение содержания кремния после проведения процесса, которое можно объяснить растворением стекла в щелочных водных растворах карбоната лития, возникающих вследствие значительного гидролиза этой соли. Таким образом, в результате экстрактивной кристаллизации удалось значительно снизить содержание ряда примесей, а некоторые – полностью удалить.

### Заключение

Впервые изучена растворимость компонентов и фазовые равновесия для смесей компонентов по ряду сечений треугольника состава тройных систем карбонат лития – вода – триэтиламин (диизопропиламин) в интервале от 10 до 60.0°C. Определена температура образования критической ноды монотектического состояния: в системе с триэтиламином она равна 14.0°C, с диизопропиламином 22.4°C.

Установлено, что при введении карбоната лития в водно-аминные смеси происходит понижение с 18.3 (НКТР) до 14.0°C для системы вода – триэтиламин, и с 27.3 (НКТР) до 22.4°C для системы вода – диизопропиламин. Это указывает на высаливающее действие карбоната лития на данные двойные системы.

Проведена оценка возможности очистки карбоната лития в процессе экстрактивной кристаллизации под действием триэтиламина с использованием рентгенофлуоресцентного анализа. Установлено, что в результате экстрактивной кристаллизации удалось значительно снизить содержание ряда примесей (Cu, Ni, Al, S), а некоторые – полностью удалить (Mn, Cr, Pm). Таким образом, триэтиламин проявляет высокую эффективность как антирастворитель карбоната лития в процессе очистки указанной соли.

Полученные в нашем исследовании результаты могут пополнить базы данных по фазовым равновесиям и растворимости компонентов в тройных системах соль – два растворителя и найти практическое применение в процессах извлечения карбоната лития из его водных техногенных растворов путем введения диизопропиламина и триэтиламина.

### Список литературы

1. Ma Y., Svärd M., Xiao X., Gardner J. M., Olsson R. T., Forsberg K. Precipitation and crystallization used in the production of metal salts for Li-ion battery materials: A review // *Metals*. 2020. Vol. 10, № 12. Art. 1609. <https://doi.org/10.3390/met10121609>



2. Choi O. K., Seo J. H., Kim G. S., Hendren Z., Kim G. D., Kim D., Lee J. W. Non-membrane solvent extraction desalination (SED) technology using solubility-switchable amine // *J. Hazard. Mater.* 2021. Vol. 403. Article ID: 123636. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123636>
3. Zijlema T. G., Geertman R. M., Witkamp G. J., Rosmalen G. M. van, de Graauw J. Antisolvent crystallization as an alternative to evaporative crystallization for the production of sodium chloride // *Ind. Eng. Chem. Res.* 2000. Vol. 39, № 5. P. 1330–1337. <https://doi.org/10.1021/ie990221h>
4. McNally J. S., Foo Z. H., Deshmukh A., Orme C. J., Lienhard J. H., Wilson A. D. Solute displacement in the aqueous phase of water–NaCl–organic ternary mixtures relevant to solvent-driven water treatment // *RSC Adv.* 2020. Vol. 10, № 49. P. 29516–29528. <https://doi.org/10.1039/D0RA06361D>
5. Du Y., Wang H., Du S., Wang Y., Huang C., Qin Y., Gong J. The liquid–liquid phase separation and crystallization of vanillin in 1-propanol/water solution // *Fluid Phase Equilib.* 2016. Vol. 409. P. 84–88. <https://doi.org/10.1016/j.fluid.2015.09.011>
6. Sun Y., Yan L., Fu H., Xiu Z. Salting-out extraction and crystallization of succinic acid from fermentation broths // *Process Biochem.* 2014. Vol. 49, № 3. P. 506–511. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2013.12.016>
7. Stephenson R. M. Mutual solubility of water and aliphatic amines // *J. Chem. Eng. Data.* 1993. Vol. 38, № 4. P. 625–629. <https://doi.org/10.1021/je00012a039>
8. Zijlema T. G., Witkamp G. J., Rosmalen G. M. Specific heats and enthalpies of mixing of amine – H<sub>2</sub>O and amine – H<sub>2</sub>O – NaCl mixtures // *J. Chem. Eng. Data.* 1999. Vol. 44, № 6. P. 1335–1339. <https://doi.org/10.1021/je9900878>
9. Danilina V. V., Klimova Y. S., Il'in K. K., Smotrov M. P., Cherkasov D. G. Physicochemical rationale for the method of extractive crystallization of salts based on the analysis of the phase diagrams of salt–water–amine ternary systems // *Russ. J. Phys. Chem. A.* 2024. Vol. 98, № 14. P. 3273–3284. <https://doi.org/10.1134/S0036024424702789>
10. Danilina V. V., Cherkasov D. G., Klimova Y. S., Il'in K. K. Solubility of components, phase equilibria, and extractive salt crystallization in the ternary lithium chloride + water + triethylamine system from T = 293.15 to 363.15 K // *J. Chem. Eng. Data.* 2025. Vol. 70, № 8. P. 3296–3306. <https://doi.org/10.1021/acs.jced.5c00191>
11. Черкасов Д. Г., Данилина В. В., Ильин К. К. Фазовые равновесия, критические явления и экстрактивная кристаллизация соли в тройной системе хлорид натрия–вода–диизопропиламин // *Журн. неорг. химии.* 2021. Т. 66, № 6. С. 785–793. <https://doi.org/10.31857/S0044457X21060076>
12. Carton A., Bolado S., Marcos M. Liquid – liquid equilibria for aqueous solutions of lithium sulfate or lithium formate and triethylamine or diisopropylamine // *J. Chem. Eng. Data.* 2000. Vol. 45, № 2. P. 260–264. <https://doi.org/10.1021/je990235u>
13. Lin C. L., Lee L. S., Tseng H. C. Phase-equilibria for propan-1-ol plus water plus sodium-chloride and plus potassium-chloride and propan-2-ol plus water plus lithium-chloride and plus lithium bromide // *J. Chem. Eng. Data.* 1993. Vol. 38, № 2. P. 306–309. <https://doi.org/10.1021/je00010a004>
14. Al-Sahhaf T. A., Kapetanovic E. Salt effects of lithium chloride, sodium bromide, or potassium iodide on liquid–liquid equilibrium in the system water+ 1-butanol // *J. Chem. Eng. Data.* 1997. Vol. 42, № 1. P. 74–77. <https://doi.org/10.1021/je960234r>
15. Gomis Y. V., Ruiz B. F., Boluda B. N., Saquete M. D. Unusual S-shaped binodal curves of the systems water+ lithium chloride+ 1-butanol or 2-butanol or 2-methyl-1-propanol // *Fluid Phase Equilib.* 1999. Vol. 155, № 2. P. 241–249. [https://doi.org/10.1016/S0378-3812\(99\)00008-4](https://doi.org/10.1016/S0378-3812(99)00008-4)
16. Gomis V., Ruiz F., Boluda N., Saquete M. D. Unusual S-shaped binodal curves of the system water + lithium chloride + 2-methyl-2-propanol // *J. Chem. Eng. Data.* 2008. Vol. 53, № 12. P. 2851–2853. <https://doi.org/10.1021/je800588p>
17. Кургинцев А. Н., Трушников Л. Н., Лаврентьева Л. Г. Растворимость неорганических веществ в воде. Л. : Химия, 1972. 248 с.
18. Miller R. R., Smith S. H., Williams D. D. Solubility of lithium carbonate at elevated temperatures // *J. Chem. Eng. Data.* 1971. Vol. 16, № 1. P. 74–75. <https://doi.org/10.1021/je60048a022>
19. Davison R. R., Smith W. H., Hood D. W. Structure and amine – water solubility in desalination by solvent extraction // *J. Chem. Eng. Data.* 1960. Vol. 5, № 4. P. 420–423. <https://doi.org/10.1021/je60008a005>
20. Davison R. R. Vapor–liquid equilibria of water – diisopropylamine and water – di-n-propylamine // *J. Chem. Eng. Data.* 1968. Vol. 13, № 3. P. 348–351. <https://doi.org/10.1021/je60038a013>
21. Моханова И. Д., Черкасов Д. Г. Взаимная растворимость компонентов двойной системы вода–диизопропиламин // *Современные проблемы теоретической и экспериментальной химии : межвуз. сб. науч. тр. IX Всерос. конф. молодых ученых с междунар. участием. Саратов : Изд-во «КУБиК», 2013. С. 10–12.*
22. Розачева Л. В., Остапенко Г. М., Никурашина Н. И. Изотермическое исследование высаливания водно-триэтиламинных смесей // *Журн. прикл. химии.* 1979. Т. 52, № 3. С. 697–700.
23. Meerburg P. A. Beitrag zur Kenntnis der Gleichgewichte in Systemen dreier Komponenten, wobei zwei flüssige Schichten auftreten können // *Z. Phys. Chem.* 1902. Vol. 40. P. 641–688.



24. Князькова Т. В. Равновесие бинарных систем амин – вода // Укр. хим. журн. 1976. Т. 42, № 8. С. 879–882.
25. Ishiguro T., Ikushima M., Koga N., Yagyu M. Equilibria of the systems of amine–water–caustic alkali. II. Mutual solubilities of triethylamine–H<sub>2</sub>O–NaOH and triethylamine–H<sub>2</sub>O–KOH systems // J. Pharm. Soc. Japan. 1955. Vol. 75, № 2. P. 188–192.
26. Copp J. L. Thermodynamics of binary systems containing amines. Part 2 // Trans. Faraday Soc. 1955. Vol. 51, № 8. P. 1056–1061.
27. Copp J. L., Everett D. H. Thermodynamics of binary systems containing amines. Part 3. Correlation of Thermodynamic Functions and Phase Diagrams // Trans. Faraday Soc. 1957. Vol. 53, № 1. P. 9–18.
28. Kartzmark E. M. System triethylamine–water: The equilibrium diagram and some physical properties // Canad. J. Chem. 1967. Vol. 45, № 10. P. 1089–1091. <https://doi.org/10.1139/v67-183>
29. Thangavel S. Studies in triethylamine–water. Part IV. Predicting the solubilities of triethylamine and water // J. Indian Chem. Soc. 1982. Vol. 59, № 9. P. 1044–1046.
30. Кричевский И. Р., Хазанова Н. Е., Светлова Г. М. Общее давление пара над растворами триэтиламин – вода в критической области // Журн. физ. химии. 1960. Т. 34, № 10. С. 2160–2166.
31. Letcher T. M., Spiteri W. Excess molar volumes of (triethylamine+water) at temperature close to the lower critical solution temperature // J. Chem. Thermodyn. 1983. Vol. 15, № 10. P. 965–970. [https://doi.org/10.1016/0021-9614\(83\)90130-1](https://doi.org/10.1016/0021-9614(83)90130-1)
32. Николаев А. В., Яковлев И. И. Клатратообразование и физико-химический анализ экстракционных систем. Новосибирск : Наука. Сиб. отд-ние, 1975. 191 с.
33. Rothmund V. Die gegenseitige Löslichkeit von Flüssigkeiten und der kritische Lösungspunkt // Z. Phys. Chem. 1898. Vol. 26. P. 433–492.
34. Черкасов Д. Г., Ильин К. К. Политермическое исследование высаливания триэтиламина из водных растворов нитратом натрия // Журн. прикл. химии. 2011. Т. 84, № 3. С. 396–402.
35. Лабораторная техника органической химии / под ред. Б. Кейла. М. : Мир, 1966. 751 с.
36. Химическая энциклопедия : в 5 т. / гл. ред. И. Л. Кнунянц. М. : Сов. энциклопедия, 1988–1998. Т. 1–5.
37. Аносов В. Я., Озерова М. И., Фиалков Ю. Я. Основы физико-химического анализа. М. : Наука, 1976. 503 с.
38. Ильин К. К., Черкасов Д. Г. Топология фазовых диаграмм тройных систем соль – два растворителя с всаливанием – высаливанием. Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 2020. 212 с.
39. Справочник по растворимости. Бинарные системы / под ред. В. В. Кафарова. М. ; Л. : АН СССР, 1963. Т. 1, кн. 1, 2. 1960 с.

## References

1. Ma Y., Svärd M., Xiao X., Gardner J.M., Olsson R. T., Forsberg K. Precipitation and crystallization used in the production of metal salts for Li-ion battery materials: A review. *Metals*, 2020, vol. 10, no. 12, art. 1609. <https://doi.org/10.3390/met10121609>
2. Choi O. K., Seo J. H., Kim G. S., Hendren Z., Kim G. D., Kim D., Lee J. W. Non-membrane solvent extraction desalination (SED) technology using solubility-switchable amine. *J. Hazard. Mater.*, 2021, vol. 403, article ID: 123636. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123636>
3. Zijlema T. G., Geertman R. M., Witkamp G. J., Rosmalen G. M. van, Graauw J. de. Antisolvent crystallization as an alternative to evaporative crystallization for the production of sodium chloride. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2000, vol. 39, no. 5, pp. 1330–1337. <https://doi.org/10.1021/ie990221h>
4. McNally J. S., Foo Z. H., Deshmukh A., Orme C. J., Lienhard J. H., Wilson A. D. Solute displacement in the aqueous phase of water–NaCl–organic ternary mixtures relevant to solvent-driven water treatment. *RSC Adv.*, 2020, vol. 10, no. 49, pp. 29516–29528. <https://doi.org/10.1039/D0RA06361D>
5. Du Y., Wang H., Du S., Wang Y., Huang C., Qin Y., Gong J. The liquid–liquid phase separation and crystallization of vanillin in 1-propanol/water solution. *Fluid Phase Equilib.*, 2016, vol. 409, pp. 84–88. <https://doi.org/10.1016/j.fluid.2015.09.011>
6. Sun Y., Yan L., Fu H., Xiu Z. Salting-out extraction and crystallization of succinic acid from fermentation broths. *Process Biochem.*, 2014, vol. 49, no. 3, pp. 506–511. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2013.12.016>
7. Stephenson R. M. Mutual solubility of water and aliphatic amines. *J. Chem. Eng. Data*, 1993, vol. 38, no. 4, pp. 625–629. <https://doi.org/10.1021/je00012a039>
8. Zijlema T. G., Witkamp G. J., Rosmalen G. M. Specific heats and enthalpies of mixing of amine – H<sub>2</sub>O and amine – H<sub>2</sub>O – NaCl mixtures. *J. Chem. Eng. Data*, 1999, vol. 44, no. 6, pp. 1335–1339. <https://doi.org/10.1021/je9900878>
9. Danilina V. V., Klimova Y. S., Il'in K. K., Smotrov M. P., Cherkasov D. G. Physicochemical rationale for the method of extractive crystallization of salts based on the analysis of the phase diagrams of salt–water–amine ternary systems. *Russ. J. Phys. Chem. A*, 2024, vol. 98, no. 14, pp. 3273–3284. <https://doi.org/10.1134/S0036024424702789>
10. Danilina V. V., Cherkasov D. G., Klimova Y. S., Il'in K. K. Solubility of components, phase equilibria, and extractive salt crystallization in the ternary lithium chloride + water + triethylamine system from T = 293.15 to 363.15 K. *J. Chem. Eng. Data*, 2025, vol. 70, no. 8, pp. 3296–3306. <https://doi.org/10.1021/acs.jced.5c00191>



11. Cherkasov D. G., Danilina V. V., Il'in K. K. Phase equilibria, critical phenomena, and extractive crystallization of the salt in the sodium chloride–water–diisopropylamine ternary system. *Russ. J. Inorg. Chem.*, 2021, vol. 66, no. 6, pp. 883–890. <https://doi.org/10.1134/S0036023621060073>
12. Carton A., Bolado S., Marcos M. Liquid – liquid equilibria for aqueous solutions of lithium sulfate or lithium formate and triethylamine or diisopropylamine. *J. Chem. Eng. Data*, 2000, vol. 45, no. 2, pp. 260–264. <https://doi.org/10.1021/je990235u>
13. Lin C. L., Lee L. S., Tseng H. C. Phase-equilibria for propan-1-ol plus water plus sodium-chloride and plus potassium-chloride and propan-2-ol plus water plus lithium-chloride and plus lithium bromide. *J. Chem. Eng. Data*, 1993, vol. 38, no. 2, pp. 306–309. <https://doi.org/10.1021/je00010a004>
14. Al-Sahhaf T. A., Kapetanovic E. Salt effects of lithium chloride, sodium bromide, or potassium iodide on liquid– liquid equilibrium in the system water+ 1-butanol. *J. Chem. Eng. Data*, 1997, vol. 42, no. 1, pp. 74–77. <https://doi.org/10.1021/je960234r>
15. Gomis Y. V., Ruiz B. F., Boluda B. N., Saquete M. D. Unusual S-shaped binodal curves of the systems water+ lithium chloride+ 1-butanol or 2-butanol or 2-methyl-1-propanol. *Fluid Phase Equilib.*, 1999, vol. 155, no. 2, pp. 241–249. [https://doi.org/10.1016/S0378-3812\(99\)00008-4](https://doi.org/10.1016/S0378-3812(99)00008-4)
16. Gomis V., Ruiz F., Boluda N., Saquete M. D. Unusual S-shaped binodal curves of the system water+ lithium chloride + 2-methyl-2-propanol. *J. Chem. Eng. Data*, 2008, vol. 53, no. 12, pp. 2851–2853. <https://doi.org/10.1021/je800588p>
17. Kirgintsev A. N., Trushnikova L. N., Lavrent'eva V. G. *Rastvorimost' neorganicheskikh veshchestv v vode* [Solubility of Inorganic Substances in Water]. Leningrad, Khimiya, 1972. 248 p. (in Russian).
18. Miller R. R., Smith S. H., Williams D. D. Solubility of lithium carbonate at elevated temperatures. *J. Chem. Eng. Data*, 1971, vol. 16, no. 1, pp. 74–75. <https://doi.org/10.1021/je60048a022>
19. Davison R. R., Smith W. H., Hood D. W. Structure and amine – water solubility in desalination by solvent extraction. *J. Chem. Eng. Data*, 1960, vol. 5, no. 4, pp. 420–423. <https://doi.org/10.1021/je60008a005>
20. Davison R.R. Vapor–liquid equilibria of water – diisopropylamine and water – di-n-propylamine. *J. Chem. Eng. Data*, 1968, vol. 13, no. 3, pp. 348–351. <https://doi.org/10.1021/je60038a013>
21. Mokhonova I. D., Cherkasov D. G. Mutual solubility of the components of the binary system water–diisopropylamine. *Sovremennye problemy teoreticheskoy i eksperimental'noy khimii: mezhvuz. sb. nauch. tr. IX Vseros. konf. molodykh uchenykh s mezhdunar. uchastiem* [Modern Problems of Theoretical and Experimental Chemistry: Intern. coll. of sci. papers of IX All-Russ. conf. of young scientists with Intern. participation]. Saratov, Izd-vo “KUBiK”, 2013, pp. 10–12 (in Russian).
22. Rogacheva L. V., Ostapenko G. M., Nikurashina N. I. Isothermal study of salting-out of aqueous triethylamine mixtures. *Zhurnal Prikladnoi Khimii*, 1979, vol. 52, no. 3, pp. 697–700 (in Russian).
23. Meerburg P. A. Beitrag zur Kenntnis der Gleichgewichte in Systemen dreier Komponenten, wobei zwei flüssige Schichten auftreten können. *Z. Phys. Chem.*, 1902, vol. 40, pp. 641–688 (in German).
24. Knyaz'kova T. V. Equilibrium of binary amine–water systems. *Ukrainskii Khimicheskii Zhurnal*, 1976, vol. 42, no. 8, pp. 879–882 (in Russian).
25. Ishiguro T., Ikushima M., Koga N., Yagyu M. Equilibria of the systems of amine–water–caustic alkali. II. Mutual solubilities of triethylamine–H<sub>2</sub>O–NaOH and triethylamine–H<sub>2</sub>O–KOH systems. *J. Pharmac. Soc. Japan*, 1955, vol. 75, pp. 188–192. [https://doi.org/10.1248/yakushi1947.75.2\\_188](https://doi.org/10.1248/yakushi1947.75.2_188)
26. Copp J. L. Thermodynamics of binary systems containing amines. Part 2. *Trans. Faraday Soc.*, 1955, vol. 51, no. 8, pp. 1056–1061.
27. Copp J. L., Everett D. H. Thermodynamics of binary systems containing amines. Part 3. Correlation of Thermodynamic Functions and Phase Diagrams. *Trans. Faraday Soc.*, 1957, vol. 53, no. 1, pp. 9–18.
28. Kartzmark E. M. System triethylamine–water: The equilibrium diagram and some physical properties. *Canad. J. Chem.*, 1967, vol. 45, no. 10, pp. 1089–1091. <https://doi.org/10.1139/v67-183>
29. Thangavel S. Studies in triethylamine–water. Part IV. Predicting the solubilities of triethylamine and water. *J. Indian Chem. Soc.*, 1982, vol. 59, no. 9, pp. 1044–1046.
30. Krichevsky I. R., Khazanova N. E., Svetlova G. M. Total vapor pressure over triethylamine–water solutions in the critical region. *Zhurnal Fizicheskoi Khimii*, 1960, vol. 34, no. 10, pp. 2160–2166 (in Russian).
31. Letcher T. M., Spiteri W. Excess molar volumes of (triethylamine+water) at temperature close to the lower critical solution temperature. *J. Chem. Thermodyn.*, 1983, vol. 15, no. 10, pp. 965–970. [https://doi.org/10.1016/0021-9614\(83\)90130-1](https://doi.org/10.1016/0021-9614(83)90130-1)
32. Nikolaev A. V., Yakovlev I. I. *Klatratoobrazovanie i fiziko-khimicheskii analiz ekstraktsionnykh sistem* [Clathrate Formation and Physicochemical Analysis of Extractive Systems]. Novosibirsk, Nauka, Sibirskoe otdelenie, 1975. 191 p. (in Russian).
33. Rothmund V. Die gegenseitige Löslichkeit von Flüssigkeiten und der kritische Lösungspunkt. *Z. Phys. Chem.*, 1898, vol. 26, pp. 433–492 (in German).
34. Cherkasov D. G., Il'in K. K. Polythermal study of the salting-out of triethylamine from aqueous solutions with sodium nitrate. *Russ. J. of Applied Chem.*, 2011, vol. 84, no. 3, pp. 388–394. <https://doi.org/10.1134/S1070427211030098>



35. *Laboratornaya tekhnika organicheskoy khimii. Pod red. B. Keila* [Keil B., ed. Laboratory Technology of Organic Chemistry]. Moscow, Mir, 1966. 751 p. (in Russian).
36. *Khimicheskaya entsiklopediya: v 5 t. Gl. red. I. L. Knunyants* [Knunyants I. L., ed.-in-chief. Chemical Encyclopedia: in 5 vols]. Moscow, Sovetskaya entsiklopediya, 1988–1998. Vol. 1–5 (in Russian).
37. Anosov V. Ya., Ozerova M. I., Fialkov Yu. Ya. *Osnovy fiziko-khimicheskogo analiza* [Principles of Physicochemical Analysis]. Moscow, Nauka, 1976. 503 p. (in Russian).
38. Il'in K. K., Cherkasov D. G. *Topologija fazovykh diagramm trojnykh sistem sol'-dva rastvoritelja s vsalivaniem–vysalivaniem* [Topology of the phase diagrams of the ternary systems a salt + two solvents with salting-in–salting-out]. Saratov, Saratov State University Publ., 2020. 212 p. (in Russian).
39. *Spravochnik po rastvorimosti. Binarnye sistemy. Pod red. V. V. Kafarova* [Kafarov V. V., ed. Manual in Solubility: Binary Systems]. Moscow, Leningrad, Akademiya Nauk SSSR Publ., 1961, vol. 1, book 1, 2. 1960 p. (in Russian).

Поступила в редакцию 20.11.2025; одобрена после рецензирования 30.11.2025; принята к публикации 02.12.2025  
The article was submitted 20.11.2025; approved after reviewing 30.11.2025; accepted for publication 02.12.2025