

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СИСТЕМЫ ХЛОРИД ГАЛЛИЯ (III) – ВОДА

А.Н. Почтарев, Н.А. Ремешевская

Александр Николаевич Почтарев (ORCID 0009-0004-2799-2035)*, Надежда Андреевна Ремешевская (ORCID 0009-0004-7270-838X)

АО «Гиредмет» им. Н.П. Сагина, ул. Электродная, 2, Москва, Российская Федерация, 111524

E-mail: ANPochtarev@rosatom.ru*, nremeshevskaya@mail.ru

Авторами статьи изучены физико-химические свойства системы хлорид галлия (III) – вода в широком диапазоне концентраций от 0,5 до 85,0 мас.% при 25 °С. Актуальность данного исследования обусловлена накоплением значительных количеств растворов трихлорида галлия в виде промежуточных продуктов, образующихся в различных технологических процессах, а также отсутствием в литературных источниках информации об их свойствах. С помощью стандартных методов и приборов были измерены значения pH, электропроводности, плотности, вязкости, скорости ультразвука и коэффициента объемного термического расширения. На основании экспериментальных данных были рассчитаны коэффициенты адиабатической сжимаемости и числа гидратации. Согласно полученным данным, были выявлены три области концентраций в системе хлорид галлия (III) – вода, обладающие различными свойствами: от 0,5 до 40,0 мас.% GaCl₃, от 40,0 до 60,0 мас.% GaCl₃ и > 60,0 мас.% GaCl₃. В области концентраций от 40,0 до 60,0 мас.% GaCl₃ наблюдается аномальное поведение зависимостей вязкости, скорости ультразвука, коэффициентов термического расширения и адиабатической сжимаемости, pH и электропроводности, что связано с эффектом объемной вязкости и структурными превращениями в растворах. Кроме того, было выявлено, что в разбавленных растворах числа гидратации GaCl₃ практически совпадают с числами гидратации AlCl₃ – это особенно важно при изучении процессов разделения элементов. Полученные экспериментальные данные имеют важное практическое значение и могут быть использованы для оптимизации процессов выделения трихлорида галлия из растворов.

Ключевые слова: трихлорид галлия, электропроводность, скорость ультразвука, число гидратации, объемная вязкость, адиабатическая сжимаемость, коэффициент объемного термического расширения

STUDY OF PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES OF GALLIUM (III) CHLORIDE – WATER SYSTEM

A.N. Pochtarev, N.A. Remeshevskaya

Alexander N. Pochtarev (ORCID 0009-0004-2799-2035), Nadezhda A. Remeshevskaya (ORCID 0009-0004-7270-838X)

GIREDMET State Research and Design Institute of Rare Metal Industry, Elektrodная st., 2, Moscow, 111524, Russia

E-mail: ANPochtarev@rosatom.ru*, nremeshevskaya@mail.ru

The authors of the article studied the physical and chemical properties of the gallium (III) chloride – water system in a wide concentration range from 0.5 to 85.0 wt.% at 25 °C. The relevance of this study is due to the accumulation of significant amounts of gallium trichloride solutions as intermediate products generated in various fields of science and technology, as well as the lack of information on their properties in the literature. Using standard methods and devices, the values of pH, electrical conductivity, density, viscosity, ultrasound velocity and coefficient of volumetric thermal expansion were measured. Based on the experimental data, the coefficients of adiabatic

compressibility and hydration numbers were calculated. According to the data obtained, three concentration ranges with different properties were identified in the gallium (III) chloride – water system: from 35.0 to 40.0 wt.% GaCl₃, from 40.0 to 60.0 wt.% GaCl₃ and > 60.0 wt.% GaCl₃. In the concentration range from 40.0 to 60.0 wt.% GaCl₃, anomalous behavior of the viscosity, ultrasound velocity, coefficients of thermal expansion coefficients and coefficients of adiabatic compressibility, pH and electrical conductivity dependencies is observed, which is associated with the effect of bulk viscosity and structural transformations in solutions. In addition, it was found that in dilute solutions, the hydration numbers of GaCl₃ practically coincide with the hydration numbers of AlCl₃. This is especially important for studying the processes of element separation. The obtained data on the change in physical and chemical quantities are of great practical importance and can be used to optimize the processes of gallium trichloride extraction from solutions, as well as enrich the field of knowledge about gallium chemistry.

Keywords: gallium trichloride, electrical conductivity, speed of ultrasound, hydration number, volume viscosity, adiabatic compressibility, coefficient of thermal expansion

Для цитирования:

Почтарев А.Н., Ремешевская Н.А. Исследование физико-химических свойств системы хлорид галлия (III) – вода. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2025. Т. 68. Вып. 11. С. 50–56. DOI: 10.6060/ivkkt.20256811.7222.

For citation:

Pochtarev A.N., Remeshevskaja N.A. Study of physical and chemical properties of gallium (III) chloride – water system. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2025. V. 68. N 11. P. 50–56. DOI: 10.6060/ivkkt.20256811.7222.

ВВЕДЕНИЕ

Трихлорид галлия является важным соединением, которое находит применение в различных областях техники благодаря своим уникальным свойствам: органическом синтезе и катализе [1, 2], производстве полупроводников и светодиодов [3], медицине [4] и нанотехнологиях [5].

Технология получения особо чистого галлия предусматривает образование значительных количеств солянокислых растворов [6–8]. Кроме этого, солянокислые галлийсодержащие растворы образуются при определении количества нейтрино в нейтринном галлиевом телескопе [9]. По существующей технологии солянокислые растворы перерабатывают либо электролитическим методом с предварительной щелочной нейтрализацией [10], либо экстракционным методом с применением синтетических экстрагентов [11].

Значительное число работ посвящено экстракции трихлорида галлия и определению его экстрагируемых форм, где, в частности, показано, что из кислых растворов он экстрагируется в виде хлоргаллиевой кислоты [6, 12].

Более того, проблема точного определения содержания галлия в различных материалах отмечается и в аналитической химии [13]. По этой причине изучение базовых физико-химических свойств растворов хлорида галлия является необходимым шагом для корректной интерпретации его поведения в различных средах. Сведения, касающиеся

физико-химических свойств водных растворов трихлорида галлия, в литературе отсутствуют.

Поэтому целью данного исследования явилось исследование физико-химических свойств растворов в системе GaCl₃ – H₂O. Были определены значения pH, электропроводности, плотности, вязкости, скорости ультразвука, сжимаемости, чисел гидратации и коэффициента объемного термического расширения растворов в интервале концентраций трихлорида галлия от 0,5 до 85,0% при температуре 25,0 ± 0,1 °С. Полученные результаты имеют важное значение для оптимизации промышленных процессов и понимания поведения галлия в технологических системах.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Рабочие растворы готовили из трихлорида галлия, изготовленного по ТУ 48-0531-230-00, посредством растворения точной навески соли в дистиллированной воде, которые затем выдерживали в течение 2 ч. Измерения физико-химических свойств проводили на свежеприготовленных растворах.

Исследования проводили с использованием следующих методов и оборудования:

- значения pH растворов измерены на pH-метре 150МИ с помощью комбинированного электрода ЭСК-10603/7;
- значения электропроводности растворов измерены на кондуктометре SevenExcellence S700-Kit;

- значения плотности растворов получены пикнометрически;
- значения вязкости растворов измерены на вискозиметре типа ВПЖ-1;
- значения скорости ультразвука измерены на ультразвуковом дефектоскопе KRETZCHNIK 1000 при частоте следования импульсов 1 мГц;
- значения коэффициента объемного термического расширения получены dilatометрическим методом путем нагрева растворов от 20 до 25 °C [14]. Объем dilatометрической ячейки составляет 100 см³ с ценой деления 0,05 см³.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Зависимость значений pH растворов от концентрации трихлорида галлия, приведенная на рис. 1, показывает, что с ростом концентрации соли pH уменьшается. Уменьшение значений pH растворов с ростом концентрации трихлорида галлия обусловлено частичным гидролизом последнего по реакции [15, 16]:



с образованием свободной соляной кислоты и увеличением концентрации гидратированного протона в растворе.

В интервале концентраций от 40,0 до 60,0% GaCl₃ на кривой функции $\text{pH} = f[\text{GaCl}_3]$ наблюдается изменение характера зависимости, связанное с вероятными структурными превращениями в растворе.

На рис. 1 представлена зависимость удельной электропроводности растворов (κ) от концентрации трихлорида галлия, которая характеризуется экстремальным значением при концентрации ~ 20% GaCl₃, а также некоторым отклонением от монотонного убывания в области концентраций от 40,0 до 60,0% GaCl₃, что согласуется с изменением зависимости pH в этой же области концентраций. Возрастание удельной электропроводности с ростом концентрации раствора принято объяснять увеличением в растворе числа носителей заряда-ионов, а уменьшение после точки максимума можно объяснить усилением процесса ассоциации соли [17]. Предельная эквивалентная электропроводность трихлорида галлия по результатам наших исследований составляет 128,56 см²/Ом·г-экв.

Вязкость, как структурная характеристика, для большинства растворов солей растет с ростом концентрации соли по экспоненциальному закону [17].

Вязкость растворов (η) в системе GaCl₃ – H₂O изменяется иным путем (рис. 2): она возрастает до концентрации трихлорида галлия ~ 40,0%,

затем уменьшается до концентрации ~ 60,0%, после чего резко растет.

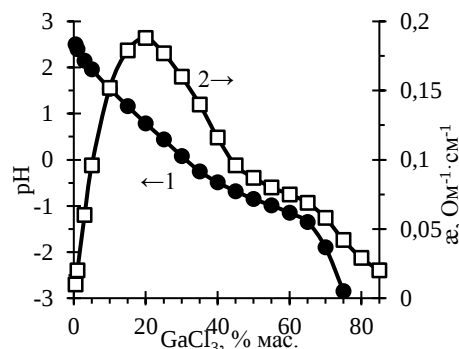


Рис. 1. Зависимости pH (1) и электропроводности (2) растворов в системе GaCl₃ – H₂O при 25 °C

Fig. 1. Dependences of pH (1) and electrical conductivity (2) of solutions in the GaCl₃ – H₂O system at 25 °C

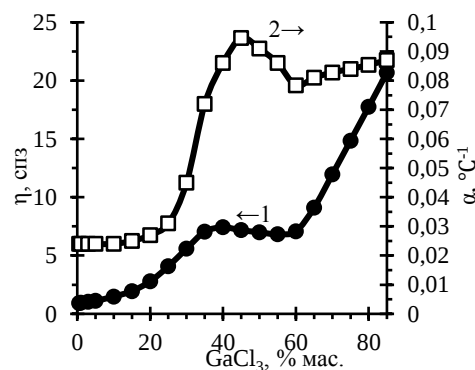


Рис. 2. Зависимости вязкости (1) и коэффициента объемного термического расширения растворов (2) в системе GaCl₃ – H₂O при 25 °C

Fig. 2. Dependences of viscosity (1) and coefficient of volumetric thermal expansion of solutions (2) in the GaCl₃ – H₂O system at 25 °C

В таблице приведены экспериментальные значения измеренных величин.

Зависимость коэффициента объемного термического расширения растворов (α) от концентрации трихлорида галлия (рис. 2) показывает, что в области концентраций до ~ 20,0% GaCl₃ коэффициент термического расширения изменяется незначительно, при увеличении концентрации до ~ 40,0% GaCl₃ – резко возрастает, в области концентраций ~ 40,0 – 60,0% GaCl₃ – уменьшается, а при концентрации GaCl₃ > 60,0% коэффициент объемного термического расширения возрастает прямолинейно.

Акустические исследования растворов в системе GaCl₃ – H₂O показали, что при частоте импульса 1 мГц в области концентраций от 40,0 до 60,0% GaCl₃ происходит «затухание» сигнала, и значения скорости ультразвука фиксируются только в областях концентраций ≤ 40 GaCl₃ и $\geq 60\%$ GaCl₃

(рис. 3). Пунктирная часть кривой получена методом интерполяции.

С помощью измерения скорости ультразвука принято определять коэффициент адиабатической сжимаемости. Он рассчитывается по формуле [18]:

$$\beta_i = (\rho_i v_i^2)^{-1}, \quad (2)$$

где ρ_i – плотность раствора i -ой концентрации, v_i – скорость ультразвука в растворе i -ой концентрации.

На рис. 3 представлена зависимость коэффициента адиабатической сжимаемости от концентрации раствора. Уменьшение сжимаемости принято объяснять электрострикционным сжатием воды в аквакомплексах соли и появлением в растворе сильно сжатых областей [18, 19].

Таблица

Физико-химические свойства в системе $\text{GaCl}_3 - \text{H}_2\text{O}$ при 25 °С
Table. Physical and chemical properties of $\text{GaCl}_3 - \text{H}_2\text{O}$ system at 25 °С

№ п.п.	C, % мас.	ρ , г/см ³	pH	α , Ом ⁻¹ ·см ⁻¹	η , спз	v , км/с	α , °С ⁻¹
1	0,0	0,997	6,65	$1 \cdot 10^{-6}$	0,893	1,486	–
2	0,5	1,004	2,50	0,010	0,915	1,486	0,024
3	1,0	1,009	2,40	0,020	0,940	1,490	0,024
4	3,0	1,029	2,15	0,060	1,035	1,507	0,024
5	5,0	1,049	1,96	0,096	1,115	1,524	0,024
6	10,0	1,096	1,54	0,152	1,480	1,566	0,024
7	15,0	1,148	1,16	0,179	1,950	1,607	0,025
8	20,0	1,197	0,79	0,188	2,780	1,642	0,027
9	25,0	1,247	0,44	0,177	4,075	1,663	0,031
10	30,0	1,297	0,08	0,160	5,600	1,679	0,045
11	35,0	1,348	-0,25	0,140	7,040	1,691	0,072
12	40,0	1,399	-0,49	0,116	7,420	1,693	0,086
13	45,0	1,449	-0,68	0,096	7,170	1,685	0,095
14	50,0	1,500	-0,85	0,087	7,000	1,665	0,091
15	55,0	1,550	-0,99	0,080	6,820	1,639	0,086
16	60,0	1,602	-1,15	0,075	7,080	1,605	0,078
17	65,0	1,662	-1,35	0,069	9,100	1,565	0,081
18	70,0	1,739	-1,90	0,058	11,95	1,520	0,083
19	75,0	1,822	-2,85	0,042	14,85	1,467	0,084
20	80,0	1,904	–	0,029	17,75	1,395	0,085
21	85,0	1,988	–	0,020	20,70	1,320	0,087

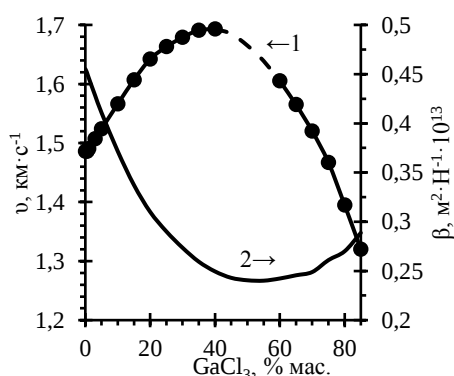


Рис. 3. Зависимости скорости ультразвука (1) и коэффициента адиабатической сжимаемости растворов (2) в системе $\text{GaCl}_3 - \text{H}_2\text{O}$ при 25 °С

Fig. 3. Dependences of the speed of ultrasound (1) and the adiabatic compressibility coefficient of solutions (2) in the $\text{GaCl}_3 - \text{H}_2\text{O}$ system at 25 °С

Представление о практически несжимаемых областях раствора лежит в основе акустического

метода изучения гидратации ионов в растворе, позволяющего определить число молей воды, связанных в гидратные комплексы ионов (число гидратации). По данным сжимаемости и плотности растворов рассчитаны числа гидратации по формуле А. Пасынского [18].

На рис. 4 представлена зависимость числа молей воды на 1 моль GaCl_3 в растворе и числа гидратации соли от концентрации хлорида галлия. При концентрации $\geq 50,0\%$ GaCl_3 числа гидратации практически совпадают с количеством молей воды на 1 моль соли. Это свидетельствует о том, что вся вода, находящаяся в растворе, связана в гидратные оболочки. Кроме этого, следует отметить, что числа гидратации GaCl_3 (31,6 - 31,3), определенные нами для разбавленных растворов, хорошо согласуются с литературными данными по числам гидратации AlCl_3 (31 - 32) [17], которые можно считать аналогом для галлия.

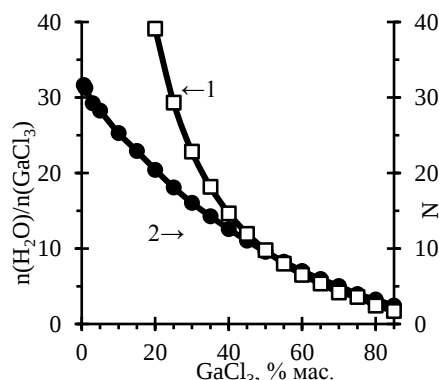


Рис. 4. Зависимости числа молей воды на 1 моль GaCl_3 (1) и числа гидратации (2) трихлорида галлия в системе $\text{GaCl}_3 - \text{H}_2\text{O}$ при 25 °C

Fig. 4. Dependences of the number of moles of water per 1 mole of GaCl_3 (1) and the hydration number (2) of gallium trichloride in the $\text{GaCl}_3 - \text{H}_2\text{O}$ system at 25 °C

Увеличение коэффициента объемного термического расширения в области концентраций до 40,0% GaCl_3 (рис. 2) возможно за счет образования квазиструктуры между гидратированными аквакомплексами ионов галлия и хлора и кластерами льдоподобной структуры свободной воды (т.е. воды, не связанной в гидратные оболочки трихлорида галлия). В интервале концентраций от 40,0 до 60,0% GaCl_3 происходит разрушение структурных образований свободной воды, что вызывает уменьшение α и, как следствие, уменьшение вязкости за счет более высокой подвижности деструктурированной свободной воды [17, 20]. Этот процесс должен продолжаться до концентрации, при которой вся вода будет связана в гидратные комплексы (граница полной гидратации по Мищенко [17, 21, 22]), после чего вязкость должна возрастет за счет уменьшения количества деструктурированной свободной воды и увеличения электростатического взаимодействия в растворе [18].

Данное предположение подтверждается тем, что при концентрации $\geq 50,0\%$ GaCl_3 числа гидратации, определенные нами ультразвуковым методом, практически совпадают с количеством молей воды, приходящихся на моль GaCl_3 в растворе (рис. 4). Это свидетельствует о том, что вся вода, находящаяся в растворе, связана в гидратные оболочки.

Затухание ультразвукового сигнала в области концентраций от 40,0 до 60,0% GaCl_3 можно объяснить эффектом объемной вязкости, при котором происходит возбуждение деструктурированной воды за счет естественной флуктуации аквакомплексов трихлорида галлия, т.к. при этом молекулы деструктурированной воды, помимо колеба-

тельных степеней свободы, приобретают ещё вращательные и поступательные степени свободы, что по теории Мандельштама-Леонтовича должно привести к значительным релаксационным процессам в системе и, как следствие, к затуханию (поглощению) ультразвукового сигнала [17, 18].

Уменьшение сжимаемости в области концентраций от 0 до 40,0% GaCl_3 (рис. 3) вызвано электрострикционным сжатием воды в аквакомплексах соли и уменьшением доли свободной воды с ростом концентрации раствора. Т.к. под действием внешнего давления, в качестве которого, в данном случае, выступает ультразвуковой сигнал, может сжиматься только свободная вода [18], то, естественно, с уменьшением ее доли будет уменьшаться и сжимаемость. В области концентраций от 40,0 до 60,0% GaCl_3 сжимаемость практически не меняется из-за разрушения структурного каркаса свободной воды, а при концентрации $\geq 60\%$ GaCl_3 , наоборот, возрастает, когда вся вода связана в гидратные оболочки. Эффектом объемной вязкости можно объяснить аномальность концентрационных зависимостей вязкости, коэффициента объемного термического расширения, скорости ультразвука и сжимаемости. Отклонение от аддитивности хода кривых зависимостей электропроводности и pH растворов в области концентраций от 40,0 до 60,0% GaCl_3 связано со структурными превращениями в растворе, которые оказывают влияние на коэффициенты активности воды и гидратированного протона [23].

Исследованные зависимости физико-химических свойств растворов в системе $\text{GaCl}_3 - \text{H}_2\text{O}$ показали, что при низких концентрациях соли изученные свойства подчиняются известным закономерностям, а в области концентраций от 40,0 до 60,0% GaCl_3 наблюдается аномальное изменение свойств растворов. Наиболее заметные аномальные концентрационные зависимости выявлены для вязкости, коэффициента объемного термического расширения, скорости ультразвука и адиабатической сжимаемости.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получены табличные данные по ряду свойств в системе $\text{GaCl}_3 - \text{H}_2\text{O}$ при температуре 25 °C (рН, электропроводность, вязкость, плотность, скорость ультразвука).

Анализ физико-химических свойств растворов в системе $\text{GaCl}_3 - \text{H}_2\text{O}$ свидетельствует о том, что область растворов в пределах растворимости трихлорида галлия можно разбить на три ин-

тервала, в которых наблюдается значительное различие в изученных свойствах: первая область концентраций < 40,0% GaCl₃, вторая – от 40,0 до 60,0%, третья > 60,0% GaCl₃.

В области концентраций растворов от 40,0 до 60,0% GaCl₃ обнаружено аномальное изменение вязкости растворов и скорости ультразвука, которые связаны со структурными превращениями в

растворе и, как следствие, с наличием эффекта объемной вязкости.

БЛАГОДАРНОСТЬ И ФИНАНСИРОВАНИЕ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

The authors declare the absence of a conflict of interest warranting disclosure in this article.

ЛИТЕРАТУРА

1. Yang S., Bour C., Gandon V. Superelectrophilic gallium (III) homodimers in gallium chloride-mediated methylation of benzene: A theoretical study. *ACS Catal.* 2020. V. 10. N 5. P. 3027-3033. DOI: 10.1021/acscatal.9b05509.
2. Belaya M. A., Knyazev D.A., Borisov D.D., Novikov R.A., Tomilov Y.V. GaCl₃-Mediated Cascade [2 + 4]-Cycloaddition/[4 + 2]-Annulation of Donor–Acceptor Cyclopropanes with Conjugated Dienes: Strategy for the Construction of Benzobicyclo[3.3.1]nonane Skeleton. *J. Org. Chem.* 2021. V. 86. N 12. P. 8089-8100. DOI: 10.1021/acs.joc.1c00564.
3. Ashery A., Gaballah A.E.H., Elnasharty M.M.M. Photoreponsivity, electrical and dielectric properties of GaAs/P-Si Heterojunction-Based Photodiode. *Silicon.* 2022. V. 14. N 11. P. 6169-6183. DOI: 10.1007/s12633-021-01389-6.
4. de Assis A.S.J., Pegoraro G.M., Duarte I.C.S. Evolution of gallium applications in medicine and microbiology: a timeline. *Biometals.* 2022. V. 35. N 4. P. 675-688. DOI: 10.1007/s10534-022-00406-4.
5. Limantoro C., Das T., He M., Dirin D., Manos J., Kovalenko M.V. Synthesis of antimicrobial gallium nanoparticles using the hot injection method. *ACS Mater. Au.* 2023. V. 3. N 4. P. 310-320. DOI: 10.1021/acsmaterialsau.2c00078.
6. Яценко С.П., Пасечник Л.А., Скачков В.М., Рубинштейн Г.М. Галлий: Технологии получения и применение жидких сплавов. М.: РАН. 2020. 344 с.
7. Nusen S., Chairuangstri T., Zhu Z., Cheng C.Y. Recovery of indium and gallium from synthetic leach solution of zinc refinery residues using synergistic solvent extraction with LIX 63 and Versatic 10 acid. *Hydrometallurgy.* 2016. V. 160. P. 137-146. DOI: 10.1016/j.hydromet.2016.01.007.
8. Brinko, N., Koltsov V., Sevryukova E., Slesarev S., Novikov D. Comparative Analysis of Modern Technologies for Producing High-Purity Gallium. IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering. 2019. P. 2253-2256. DOI: 10.1109/EIConRus.2019.8656859.
9. Gavrin V.N. The history, present and future of SAGE (Soviet-American Gallium Experiment). Solar Neutrinos: Proceedings of the 5th International Solar Neutrino Conference. 2019. P. 29–46. DOI: 10.1142/9789811204296_0002.
10. Абдулвалиев Р.А., Ата А., Ахмадиева Н.К., Гладышев С.В., Бейсембекова К.О. Электрохимическое извлечение галлия из щелочных растворов способом электролиза. *Компл. исп. мин. сырья.* 2016. Т. 2. С. 76–82. DOI: 10.5593/SGEM2016/B12/S04.137.
11. Nguyen T.H., Lee M.S. A Review on Separation of Gallium and Indium from Leach Liquors by Solvent Extraction and Ion Exchange. *Miner. Proc. Extract. Metallurgy Rev.* 2019. V. 40. N 4. P. 278–291. DOI: 10.1080/08827508.2018.1538987.

REFERENCES

1. Yang S., Bour C., Gandon V. Superelectrophilic gallium (III) homodimers in gallium chloride-mediated methylation of benzene: A theoretical study. *ACS Catal.* 2020. V. 10. N 5. P. 3027-3033. DOI: 10.1021/acscatal.9b05509.
2. Belaya M. A., Knyazev D.A., Borisov D.D., Novikov R.A., Tomilov Y.V. GaCl₃-Mediated Cascade [2 + 4]-Cycloaddition/[4 + 2]-Annulation of Donor–Acceptor Cyclopropanes with Conjugated Dienes: Strategy for the Construction of Benzobicyclo[3.3.1]nonane Skeleton. *J. Org. Chem.* 2021. V. 86. N 12. P. 8089-8100. DOI: 10.1021/acs.joc.1c00564.
3. Ashery A., Gaballah A.E.H., Elnasharty M.M.M. Photoreponsivity, electrical and dielectric properties of GaAs/P-Si Heterojunction-Based Photodiode. *Silicon.* 2022. V. 14. N 11. P. 6169-6183. DOI: 10.1007/s12633-021-01389-6.
4. de Assis A.S.J., Pegoraro G.M., Duarte I.C.S. Evolution of gallium applications in medicine and microbiology: a timeline. *Biometals.* 2022. V. 35. N 4. P. 675-688. DOI: 10.1007/s10534-022-00406-4.
5. Limantoro C., Das T., He M., Dirin D., Manos J., Kovalenko M.V. Synthesis of antimicrobial gallium nanoparticles using the hot injection method. *ACS Mater. Au.* 2023. V. 3. N 4. P. 310-320. DOI: 10.1021/acsmaterialsau.2c00078.
6. Yatsenko S.P., Pasechnik L.A., Skachkov V.M., Rubinstein G.M. Gallium: Technologies for the Production and Application of Liquid Alloys. М.: RAS. 2020. 344 p. (in Russian).
7. Nusen S., Chairuangstri T., Zhu Z., Cheng C.Y. Recovery of indium and gallium from synthetic leach solution of zinc refinery residues using synergistic solvent extraction with LIX 63 and Versatic 10 acid. *Hydrometallurgy.* 2016. V. 160. P. 137-146. DOI: 10.1016/j.hydromet.2016.01.007.
8. Brinko, N., Koltsov V., Sevryukova E., Slesarev S., Novikov D. Comparative Analysis of Modern Technologies for Producing High-Purity Gallium. IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering. 2019. P. 2253-2256. DOI: 10.1109/EIConRus.2019.8656859.
9. Gavrin V.N. The history, present and future of SAGE (Soviet-American Gallium Experiment). Solar Neutrinos: Proceedings of the 5th International Solar Neutrino Conference. 2019. P. 29–46. DOI: 10.1142/9789811204296_0002.
10. Abdulvaliyev R.A., Ata A., Akhmadieva N.K., Gladyshev S.V., Bejsembekova K.O. Electrochemical extraction of gallium from alkaline solution by electrolysis. *Kompleks. Isp. Min. Syr'ya.* 2016. V. 2. P. 76–82 (in Russian). DOI: 10.5593/SGEM2016/B12/S04.137.
11. Nguyen T.H., Lee M.S. A Review on Separation of Gallium and Indium from Leach Liquors by Solvent Extraction and Ion Exchange. *Miner. Proc. Extract. Metallurgy Rev.* 2019. V. 40. N 4. P. 278–291. DOI: 10.1080/08827508.2018.1538987.

12. **Katsuta S., Okai M., Yoshimoto Y., Kudo Y.** Extraction of gallium (III) from hydrochloric acid solutions by trioctylammonium-based mixed ionic liquids. *Analyt. Sci.* 2012. V. 28. N 10. P. 1009–1012. DOI: 10.2116/analsci.28.1009.
13. **Белозерова А.А., Майорова А.В., Бардина М.Н.** Экспериментальное и теоретическое изучение спектрального поведения галлия в плазме разряда при ИСП-АЭС определении. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2024. Т. 67. Вып. 1. С. 36–44. DOI: 10.6060/ivkkt.20246701.6834.
14. **Теленкова О.Г., Фаращук Н.Ф., Маркова Е.О.** Использование дилатометрического метода для определения структурного состояния воды и числа гидратации ионов. *Вестн. ТвГУ. Сер.: Химия.* 2017. Т. 4. С. 113–119.
15. **Дымов А.М., Савостин А.П.** Аналитическая химия галлия. М.: Наука. 1968. 256 с.
16. **Bahri Z., Rezaei B., Kowsari E.** Selective separation of gallium from zinc using flotation: Effect of solution pH value and the separation mechanism. *Miner. Eng.* 2016. V. 86. P. 104–113. DOI: 10.1016/j.mineng.2015.12.005.
17. **Эрдей-Груз Т.** Явление переноса в водных растворах. М.: Мир. 1976. 595 с.
18. **Михайлов И.Г., Соловьев В.А., Сырников Ю.П.** Основы молекулярной акустики. М.: Наука. 1964. 262 с.
19. **Афанасьев В.Н., Устинов А. Н.** Ионная сольватация водных растворов галогенидов щелочных, щелочноземельных и переходных металлов. *Журн. структ. химии.* 2012. Т. 53. № 5. С. 912–921. DOI: 10.1134/S0022476612050095.
20. **Тюнина Е.Ю.** Зависимость молярной вязкости воды в жидком и флюидном состояниях от давления. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2022. Т. 65. Вып. 5. С. 6–13. DOI: 10.6060/ivkkt.20226505.6572.
21. **Мищенко К.П., Пономарева А.М.** Термодинамика и строение растворов. М.: АН СССР. 1969. 100 с.
22. **Афанасьев В.Н., Устинов А.Н.** Верификация сольватации электролитов от разбавленных до концентрированных в водных растворах. *Вестн. МГУ. Сер. 2. Химия.* 2011. Т. 52. № 5. С. 323–341.
23. **Измайлов Н.А.** Электрохимия растворов. М.: Химия. 1976. 488 с.
12. **Katsuta S., Okai M., Yoshimoto Y., Kudo Y.** Extraction of gallium (III) from hydrochloric acid solutions by trioctylammonium-based mixed ionic liquids. *Analyt. Sci.* 2012. V. 28. N 10. P. 1009–1012. DOI: 10.2116/analsci.28.1009.
13. **Belozeroва А.А., Mayorova A.V., Bardina M.N.** Experimental and theoretical study of the spectral behavior of gallium in discharge plasma during ICP-AES determination. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.].* 2024. V. 67. N 1. P. 36–44 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20246701.6834.
14. **Telenkova O.G., Farashchuk N.F., Markova E.O.** Use of the dilatometric method for the determination of the structural state of water and the number of ion hydration. *Vestn. TverGU. Ser.: Khimiya.* 2017. V. 4. P. 113–119 (in Russian).
15. **Dymov A.M., Savostin A.P.** Analytical chemistry of gallium. M.: Nauka. 1968. 256 p. (in Russian).
16. **Bahri Z., Rezaei B., Kowsari E.** Selective separation of gallium from zinc using flotation: Effect of solution pH value and the separation mechanism. *Miner. Eng.* 2016. V. 86. P. 104–113. DOI: 10.1016/j.mineng.2015.12.005.
17. **Erdey-Grúz T.** Transfer phenomenon in aqueous solutions. M.: Mir. 1976. 595 p. (in Russian).
18. **Mikhailov I.G., Soloviev V.A., Syrnikov Y.P.** Fundamentals of molecular acoustics. M.: Nauka. 1964. 262 p. (in Russian).
19. **Afanasyev V.N., Ustinov A.N.** Ionic solvation of aqueous solutions of alkali, alkaline earth and transition metal halides. *Zhurn. Struct. Khim.* 2012. V. 53. N 5. P. 912–921 (in Russian). DOI: 10.1134/S0022476612050095.
20. **Tyunina E.Y.** Pressure dependence of molar viscosity of water in liquid and fluid states. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.].* 2022. V. 65. N 5. P. 6–13. DOI: 10.6060/ivkkt.20226505.6572.
21. **Mishchenko K.P., Ponomareva A.M.** Thermodynamics and structure of solutions. M.: USSR Academy of Sciences. 1969. 100 p. (in Russian).
22. **Afanasyev V.N., Ustinov A.N.** Verification of solvation of electrolytes from dilute to concentrated in aqueous solutions. *Vestn. MGU. Ser. 2. Khimiya.* 2011. V. 52. N 5. P. 323–341 (in Russian).
23. **Izmailov N.A.** Electrochemistry of solutions. M.: Khimiya. 1976. 488 p. (in Russian).

Поступила в редакцию 13.02.2025

Принята к опубликованию 26.03.2025

Received 13.02.2025

Accepted 26.03.2025