

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ
НЕОРГАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 544.344.015.3

КОРРЕКЦИЯ КОМПЬЮТЕРНОЙ 3D-МОДЕЛИ ФАЗОВОЙ
ДИАГРАММЫ СИСТЕМЫ $\text{LiCl-PrCl}_3\text{-KCl}$ ПО ТЕРМОГРАММАМ

© 2023 г. В. П. Воробьева^а, *, А. Э. Зеленая^а, В. И. Луцык^а, М. Д. Парфенова^а, В. Д. Балданов^а

^аИнститут физического материаловедения СО РАН, ул. Сахьяновой, 6, Улан-Удэ, 670047 Россия

*e-mail: vvorobjeva@mail.ru

Поступила в редакцию 31.03.2023 г.

После доработки 18.04.2023 г.

Принята к публикации 19.04.2023 г.

Построена трехмерная (3D) компьютерная модель изобарной фазовой диаграммы системы $\text{LiCl-PrCl}_3\text{-KCl}$. Она собрана из 66 поверхностей и 27 фазовых областей, из них 31 поверхность и 14 фазовых областей вследствие ограниченной растворимости исходных хлоридов и их соединений вырождены в вертикали и вертикальные плоскости. Для улучшения качества 3D-модели использованы опубликованные экспериментальные изотермические разрезы и термограммы 33 солевых смесей. Полученные результаты можно использовать при совершенствовании технологии расплавно-солевого рафинирования отходов ядерного топлива.

Ключевые слова: фазовая диаграмма, компьютерное моделирование, трехмерная визуализация, хлорид лития, хлорид празеодима, хлорид калия

DOI: 10.31857/S0044457X23600524, EDN: HXWIDM

ВВЕДЕНИЕ

Система LiCl-KCl хорошо известна. В одной из последних статей [1], посвященных этой системе, дан краткий обзор по истории ее изучения с цитатами из работ [2–8], уточняющими экспериментальные результаты по линиям ликвидуса, составу и температуре эвтектики, а также по температурам плавления исходных хлоридов.

Система LiCl-KCl простая эвтектическая, и практический интерес к ней вызван прежде всего тем, что ее эвтектика – это низкотемпературный (625 К) маловязкий электролит состава 58.2 мол. % LiCl . Однако в последнее время расплавы этой системы привлекают все большее внимание с целью их практического применения при рафинировании металлов [9, 10], когда расплавленная эвтектика LiCl-KCl используется в качестве жидкой электролитной среды при пирохимической переработке отработанного ядерного топлива [11] для отделения топливных материалов от продуктов деления электрорафинированием [12–17].

Отработанное металлическое топливо включает преимущественно актиниды, редкоземельные элементы, благородные металлы, щелочные и щелочноземельные элементы. Поскольку одним из главных элементов продуктов деления является празеодим, очевидна необходимость изучения взаимодействия PrCl_3 в среде LiCl-KCl , фазовых превращений в тройной системе $\text{LiCl-PrCl}_3\text{-KCl}$.

Целью настоящей работы является подробное исследование всех фазовых превращений в системе $\text{LiCl-PrCl}_3\text{-KCl}$, построение на основе этого исследования трехмерной (3D) компьютерной модели изобарной фазовой диаграммы и проверка модели путем сравнения с опубликованными экспериментальными разрезами и температур термических эффектов при кристаллизации расплавов со значениями функций отклика, полученными для 3D-модели.

ТРОЙНАЯ СИСТЕМА $\text{LiCl-PrCl}_3\text{-KCl}$
И ФОРМИРУЮЩИЕ ЕЕ БИНАРНЫЕ СИСТЕМЫ

Система LiCl-PrCl_3 , как и LiCl-KCl , также простая эвтектическая с температурой плавления эвтектики $464 \pm 1^\circ\text{C}$ и эвтектическим составом 69.3 мол. % LiCl [18]. В работах [19, 20] температуры ликвидуса на $\sim 30\text{--}40^\circ\text{C}$ ниже по ветке PrCl_3 . В [21] проведена термодинамическая оптимизация данных [19, 20], которая привела к температуре 466°C и эвтектическому составу 70 мол. % LiCl .

Особо стоит остановиться на работе [22], итоги которой кратко изложены в статье [23], где описаны результаты как подробного экспериментального изучения тройной системы $\text{LiCl-PrCl}_3\text{-KCl}$, так и перепроверки формирующих ее двойных систем. В этих работах данные по системе LiCl-KCl совпадают с [1], а для системы LiCl-PrCl_3 коор-

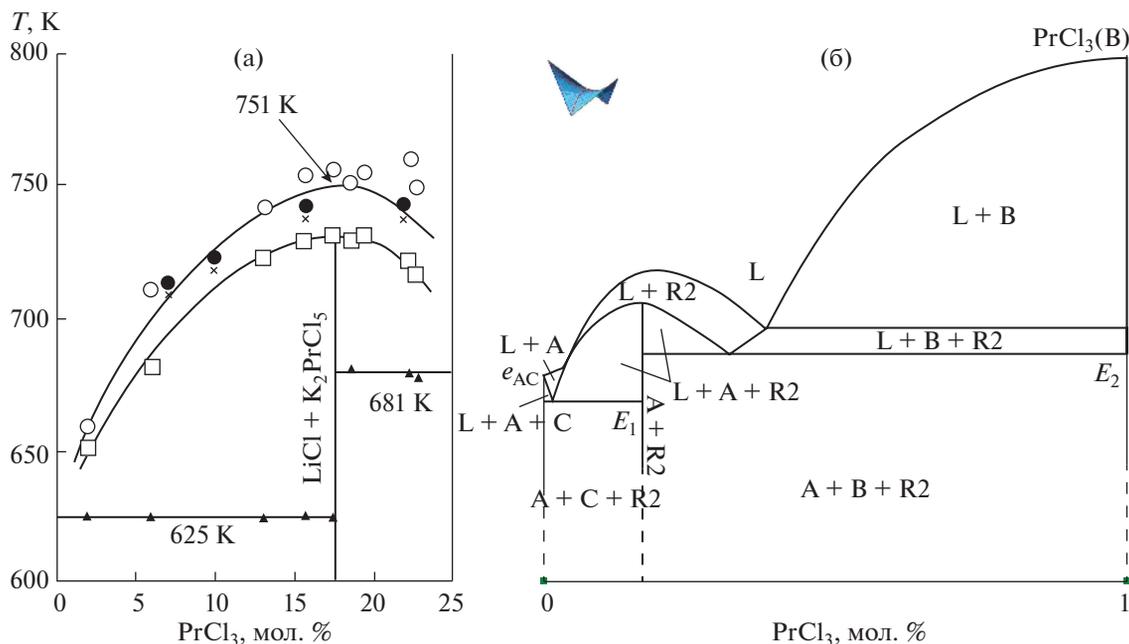


Рис. 1. Политермический разрез e_{AC} – $PrCl_3$ (B): фрагмент 0–0.25 мол. % $PrCl_3$ [27] (а), 3D-модель (б).

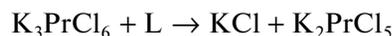
динатам эвтектики соответствуют значения $464^\circ C$ (737 K) и 31 мол. % $LiCl$.

Что касается системы $PrCl_3$ – KCl , то в [22, 23] говорится, что автор смог найти по ней только две публикации: [24] и [25]. В этой системе образуются два соединения: K_3PrCl_6 и K_2PrCl_5 . Одно из них – K_3PrCl_6 – плавится конгруэнтно и стабильно выше $489^\circ C$ (762 K). Оно вступает в эвтектическую реакцию с KCl при $613^\circ C$ (886 K) и содержании 16.5 мол. % $PrCl_3$. С другой стороны, это соединение участвует в перитектической реакции образования инконгруэнтно плавящегося соединения K_2PrCl_5 с координатами перитектики $617^\circ C$ (890 K) и 34.5 мол. % $PrCl_3$. Кроме того, соединение K_2PrCl_5 вместе с $PrCl_3$ является продуктом эвтектической реакции при $499^\circ C$ (772 K) и составе эвтектики 56 мол. % $PrCl_3$.

Следует отметить, что в [26] на основании исследований методом дифференциальной сканирующей калориметрии приведена температура разложения K_3PrCl_6 , равная $495^\circ C$ (768 K), а не $489^\circ C$ (762 K), и температура его конгруэнтного плавления $671^\circ C$ (944 K).

Авторы [22, 23] сообщают, что литературных данных по тройной системе $LiCl$ – $PrCl_3$ – KCl до начала их исследований им удалось найти совсем немного, лишь в работе [27] был показан фрагмент (до 25 мол. % $PrCl_3$) политермического разреза, соединяющего эвтектику $LiCl$ – KCl с $PrCl_3$ (рис. 1а). Последующее экспериментальное изучение тройной системы авторами [22, 23] позволило определить координаты трех тройных нон-

вариантных точек и точки Ван Рейна на частично квазибинарном разрезе, сам этот разрез, проекцию пяти поверхностей ликвидуса с нанесенными на них линиями уровня и четыре изотермических разреза при 673, 723, 773, 873 K. Установлено, что разложение соединения K_3PrCl_6 по реакции:



в тройной системе происходит при той же температуре $489^\circ C$ (762 K), что и в двойной системе: $K_3PrCl_6 \rightarrow KCl + K_2PrCl_5$, и составе расплава 22.3 мол. % $LiCl$, 12.7 мол. % $PrCl_3$, 65 мол. % KCl .

При более низких температурах – $381^\circ C$ (654 K) и $318^\circ C$ (591 K) – имеют место два эвтектических превращения:



с координатами эвтектик 46.8 мол. % $LiCl$, 31.7 мол. % $PrCl_3$, 21.5 мол. % KCl и 55.1 мол. % $LiCl$, 1.8 мол. % $PrCl_3$, 43.1 мол. % KCl соответственно.

ПОСТРОЕНИЕ КОМПЬЮТЕРНОЙ 3D-МОДЕЛИ ФАЗОВОЙ ДИАГРАММЫ СИСТЕМЫ $LiCl$ – $PrCl_3$ – KCl

Моделирование фазовой диаграммы начинается с температурного ряда (в направлении его понижения) и со схемы моно- и неинвариантных состояний – схемы фазовых реакций Шейла, в которой всем трехфазным реакциям приписывают траектории изменения состава их участников

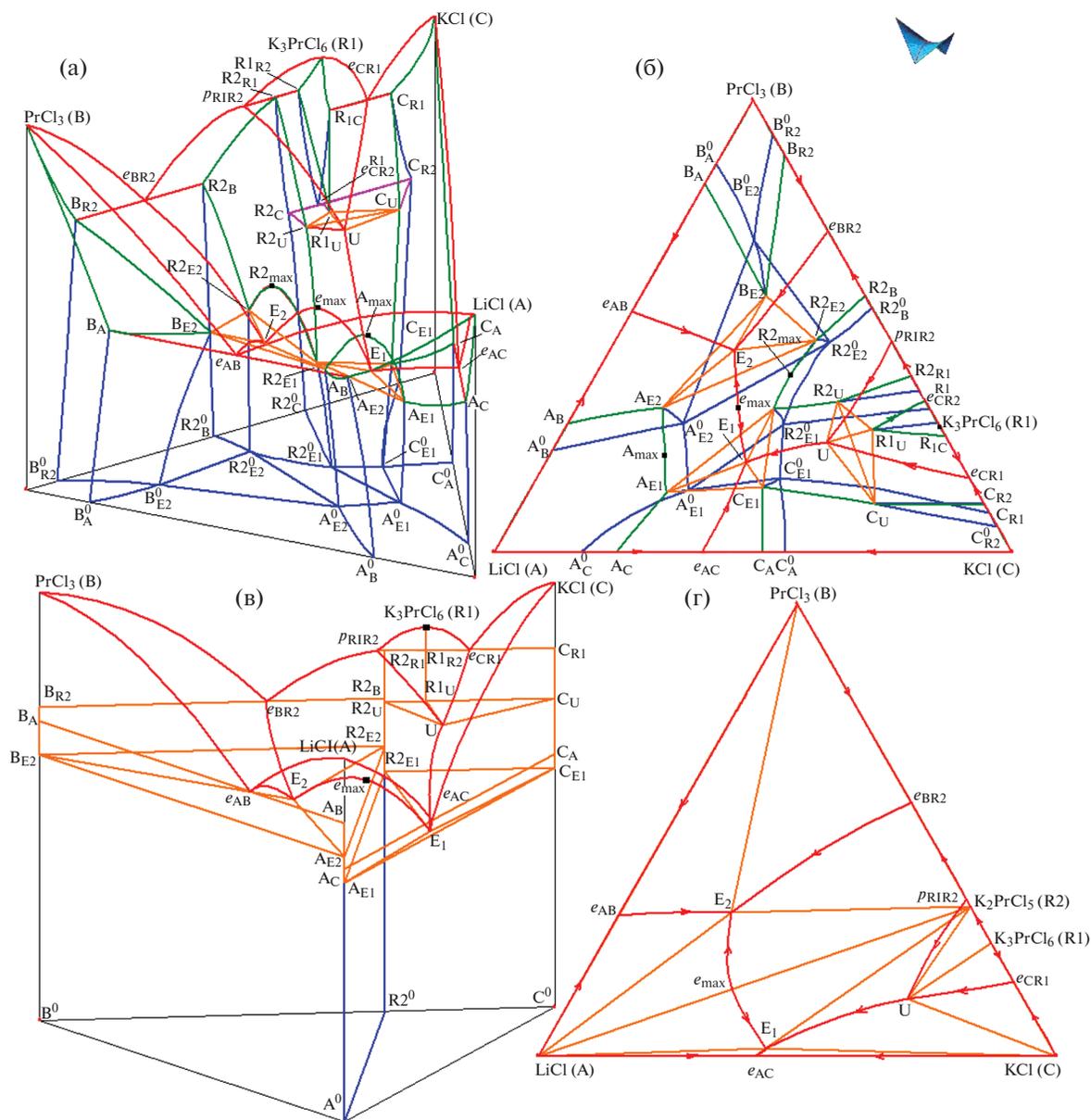


Рис. 2. Прототип фазовой диаграммы системы $\text{LiCl}-\text{PrCl}_3-\text{KCl}$ (A–B–C): T–x–y- (а) и x–y-проекции (б); 3D-модель фазовой диаграммы системы $\text{LiCl}-\text{PrCl}_3-\text{KCl}$ (A–B–C): T–x–y- (в) и x–y-проекции (г).

[28, 29]. У системы $\text{LiCl}-\text{PrCl}_3-\text{KCl}$ ¹ эта схема проста: всего три неинвариантных превращения (и четвертое – эвтектика на частично квазибинарном разрезе $\text{LiCl}-\text{K}_2\text{PrCl}_5$), два из которых эвтектические, а третье, согласно [23], “псевдоперитектическое”.

¹ 3D-моделирование осуществляется в программной среде PD Designer (Phase Diagram Designer) [30], которая требует переобозначения исходных хлоридов LiCl , PrCl_3 , KCl буквами A, B, C, а их соединений K_3PrCl_6 и K_2PrCl_5 – соответственно буквами R1 и R2. Таким образом, замены приводят к обозначениям соответствующих элементов диаграммы, например, эвтектика в системе A–B ($\text{LiCl}-\text{PrCl}_3$) записывается как e_{AB} , а выделяющиеся из нее твердые фазы – как A_B и B_A (рис. 2).

В научном сообществе, занимающемся фазовыми диаграммами, до сих пор не принята единая классификация для обозначения фазовых превращений. В монографии [31] четырехфазные неинвариантные превращения в тройных системах различаются как эвтектические (эвтектоидные) – E, а также квазиперитектические (квазиперитектоидные) и перитектические (перитектоидные) – P. В работе [32] их аналогами являются четырехфазные равновесия I, II и III классов. Однако и в [32] эвтектические реакции обозначаются буквой E, а перитектические и все остальные – буквой P. В публикациях, так или иначе связанных с расчетами по CALPHAD технологии, кроме эвтектиче-

ских (E) и перитектических (P), все остальные невариантные фазовые превращения обозначаются буквой U.

На наш взгляд, при классификации невариантных превращений нужно учитывать характер каждого четырехфазного превращения. Так, согласно классическим монографиям [31, 32], невариантные превращения



являются соответственно эвтектическими, квазиперитектическими и перитектическими. Поэтому точки, отвечающие составам расплава, стоит обозначать буквами E, Q и P, а составам сопряженных с ними твердых фаз приписывать тот же нижний индекс.

Что касается полиморфных переходов, то следует подчеркнуть пассивную роль расплава L, который находится не в левой, а в правой части уравнения и не является реагентом фазовых реакций:



в которых происходит перестройка кристаллической структуры высокотемпературной модификации B в кристаллическую структуру низкотемпературной модификации B₁. Поэтому и точки, отвечающие составу расплава, предлагается обозначать буквами V и W. Для аналогичных эвтектоидных, квазиперитектоидных и перитектоидных превращений:



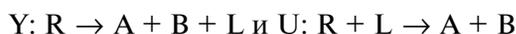
вершины симплексов достаточно отмечать соответствующим нижним индексом (например, B_W и B_{1W}).

При монотектическом и синтектическом расщеплении:



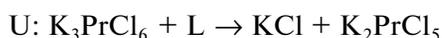
составы жидкостей L1 и L2 можно отмечать парами M–N и S–O, оставив для твердых фаз нижние индексы M и S.

Чтобы подчеркнуть пассивную роль расплава L в реакциях:



при разложении (образовании) промежуточной фазы R, можно воспользоваться буквами Y и U.

Возвращаясь к рассматриваемой хлоридной системе, реакцию



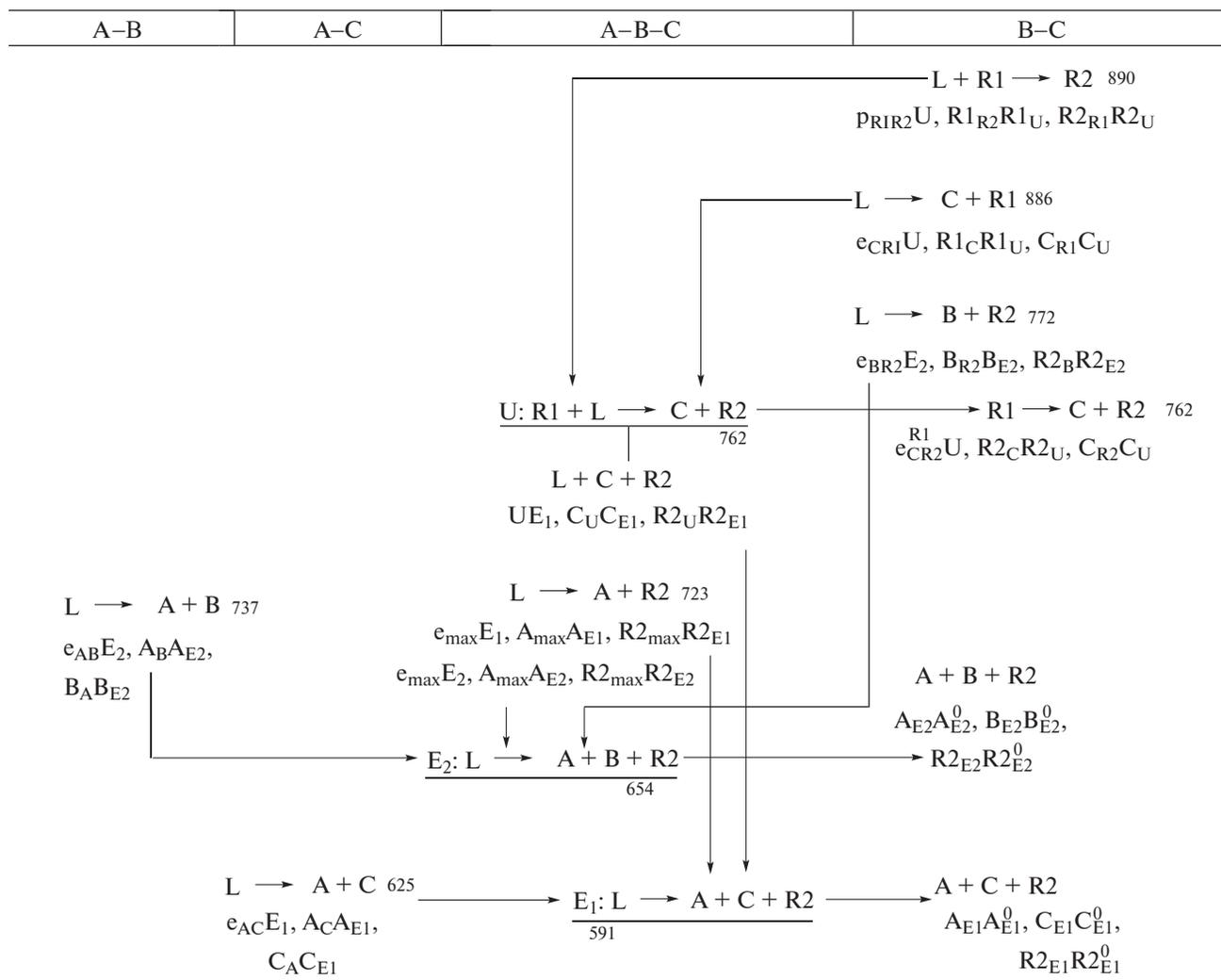
в [23] называют псевдоперитектической и обозначают буквой P. Необходимо отметить, что на самом деле эта реакция описывает разложение соединения K₃PrCl₆ (R₁) на KCl (C) и K₂PrCl₅ (R₂) при пассивной роли расплава L. Этот факт стоит подчеркнуть, обозначив как саму реакцию (табл. 1), так и точку на фазовой диаграмме, соответствующую составу расплава, буквой U (рис. 2).

Разложение соединения K₃PrCl₆ (R₁) как в бинарной системе PrCl₃–KCl (B–C), так и в тройной системе LiCl–PrCl₃–KCl (A–B–C) происходит при одной и той же температуре 762 К, а четырехфазный комплекс UR_{2U}R_{1U}C_U вырождается в треугольник, поскольку точка R_{1U} принадлежит отрезку R_{2U}C_U. Однако формально эта реакция все же не является псевдоперитектической (квазиперитектической). Как уже говорилось, при температуре T_U происходит твердофазное разложение R₁ + L → C + R₂ промежуточной фазы R₁ при индифферентной жидкой фазе L на C и R₂, которые затем в интервале температур T_U–T_{E1} продолжают выделяться по эвтектической реакции L → C + R₂ (рис. 2). Промежуточная фаза R₁ с нижней температурой существования T_U “по принятой в термодинамике классификации относится к эндотермическим соединениям” [33, с. 93, 218].

Схема моно- и невариантных состояний переводится из двумерной табличной формы (табл. 1) в трехмерную пространственную форму и далее трансформируется в прототип конструируемой фазовой диаграммы [29]. Сначала строятся три плоскости, соответствующие невариантным превращениям U, E₁, E₂ (считаем их как 12 плоскостей, т.е. три комплекса, каждый из которых разбивается на четыре симплекса). К ним подводят прямые линии (траектории фаз), связывающие соответствующие невариантные бинарные и тройные точки, например, e_{AB} с E₂, A_B с A_{E2}, B_A с B_{E2} (рис. 2а). Так формируется эскиз линейчатых поверхностей; всего, как видно из схемы моно- и невариантных состояний (табл. 1), десять триад, в границах которых будут заключены семь трехфазных областей с расплавом (L + A + B, L + A + C, L + A + R₂, L + B + R₂, L + C + R₁, L + C + R₂, L + R₁ + R₂) и три – без расплава (A + B + R₂, A + C + R₂, C + R₁ + R₂). Далее на полученный каркас достраиваются нелинейчатые поверхности: по пять поверхностей ликвидуса и солидуса, а также семь пар поверхностей сольвуса на границах двухфазных областей без расплава.

Сборка всех перечисленных 66 поверхностей (или 27 фазовых областей) дает прототип фазовой диаграммы (рис. 2а, 2б). После перемещения базовых точек в соответствии с координатами ре-

Таблица 1. Схема моно- и невариантных состояний системы $\text{LiCl}-\text{PrCl}_3-\text{KCl}$ ($A-B-C$) с бинарными соединениями K_3PrCl_6 (R_1), K_2PrCl_5 (R_2) и температурным рядом $B(\text{PrCl}_3) = 1055 > C(\text{KCl}) = 1047 > R_1(\text{K}_3\text{PrCl}_6) = 945 > p_{R_1R_2} = 890 > e_{CR_1} = 886 > A(\text{LiCl}) = 879 > e_{BR_2} = 772 > e_{CR_2}^{R_1} = U = 762 > e_{AB} = 737 > e_{\max} = 723 > E_2 = 654 > e_{AC} = 625 > E_1 = 591$



альной системы получаем 3D-модель фазовой диаграммы реальной системы (рис. 2в, 2г). При этом все поверхности солидуса и сольвуса вырождаются либо в ребра тригональной призмы, либо в отрезки ортогоналей, проведенных из точек, соответствующих соединениям R_1 и R_2 постоянного состава. Из линейчатых поверхностей 13 сливаются с гранями призмы, а три — с вертикальной плоскостью, восстановленной на отрезке, связывающей точки $A^0R_2^0$ (рис. 2в, 2г).

Соответственно из 27 фазовых областей пять однофазных областей сливаются с осями тригональной призмы или вертикалями, связанными с двумя стехиометрическими соединениями, семь двухфазных областей (без расплава) вырождаются в вертикальные плоскости — грани призмы либо

в плоскость на отрезке $A^0R_2^0$. Область $C + R_1 + R_2$ вырождается в отрезок $C_U R_2U$ вследствие равенства температур разложения R_1 в бинарной и тройной системах (рис. 2в).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Дальнейшее совершенствование модели связано с корректировкой кривизны линий и поверхностей. Обычно для оценки качества модели используют экспериментальные разрезы. И в случае с данной системой сравнение опубликованных изотермических разрезов с модельными говорит о приемлемом качестве модели (рис. 3–5). 3D-модель позволяет также строить любые поли-термические разрезы, например разрез из эвтек-

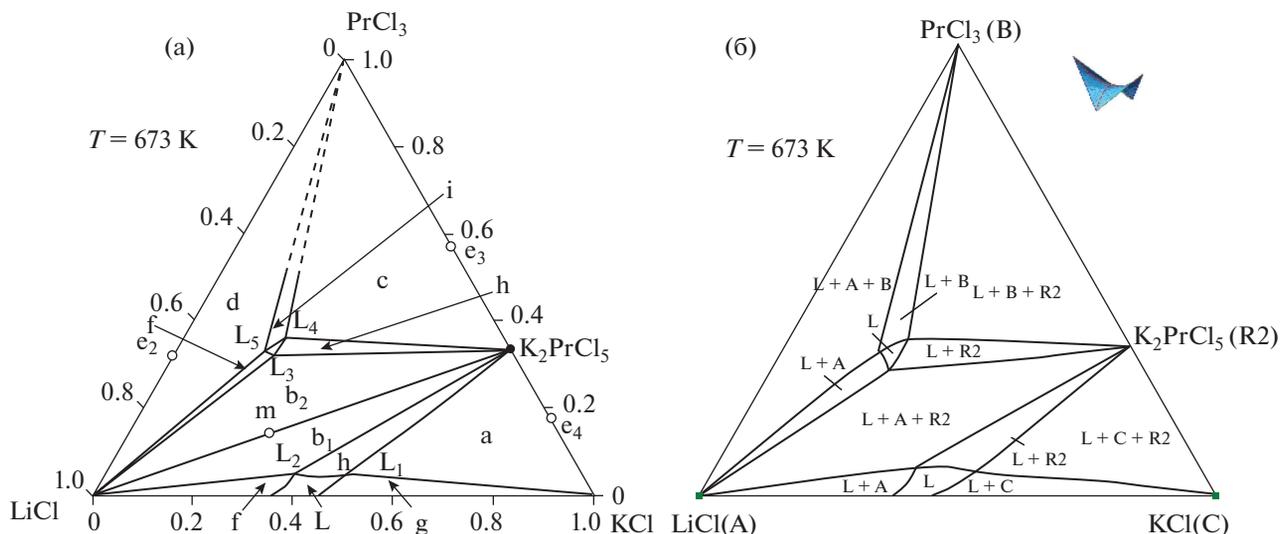


Рис. 3. Изотермический разрез $T_{E2} < 673 \text{ K} < T_{\text{emax}}$: [23] (а), 3D-модель (б).

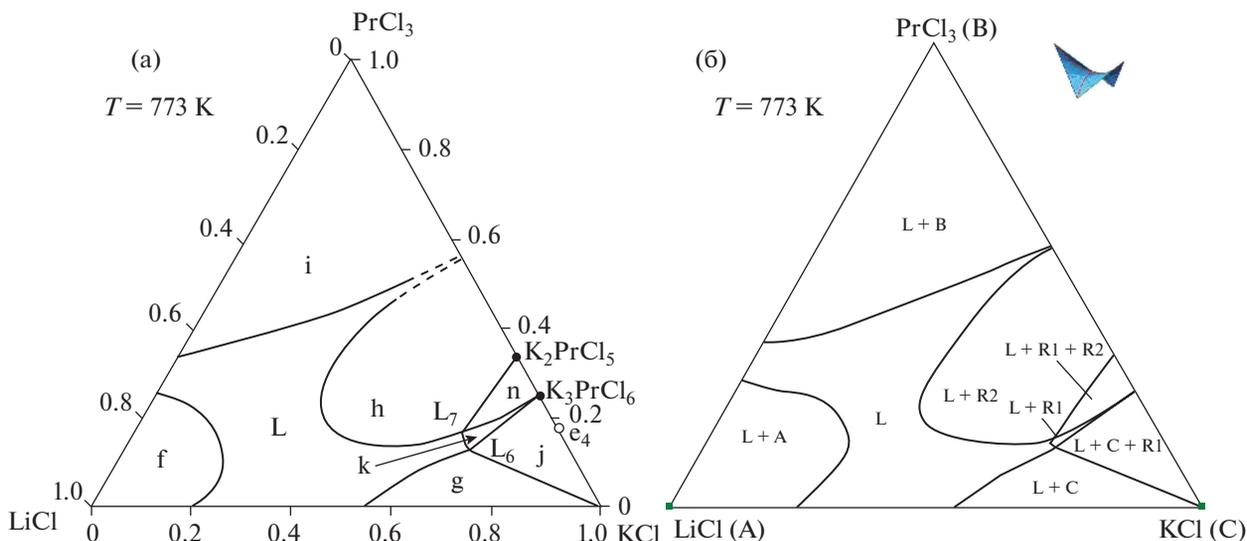


Рис. 4. Изотермический разрез $T_{eBR2} < 773 \text{ K} \ll T_A$: [23] (а), 3D-модель (б).

тики LiCl–KCl в PrCl_3 (e_{AC} –B), не ограничиваясь фрагментом (рис. 1б).

Поскольку в работах [22, 23] для системы LiCl– PrCl_3 –KCl опубликованы термограммы 33 кристаллизующихся смесей, нельзя не воспользоваться этими данными как для оценки качества 3D-модели фазовой диаграммы этой системы, так и для ее улучшения. В программе PD Designer, с помощью которой строится 3D-модели [30], есть опция расчета функций отклика ко всем поверхностям, пересекаемым вертикалью, восстановленной в точке любого заданного сплава с обозначением температур всех пересекаемых поверхностей (рис. 6). Так, в точке, которой в работе

[23] присвоен номер 6 (рис. 6е), в 3D-модели фазовой диаграммы первичная кристаллизация начинается при температуре 920 К на поверхности ликвидуса C (KCl) и заканчивается при 732 К, что совпадает с началом вторичной (совместно с R2) кристаллизации, по окончании которой следует неинвариантное эвтектическое превращение E1 при 591 К (рис. 6б). Кривая ДТА сплава 6 [23] (рис. 6а) показывает соответствующие температуры 915, 737 и 591 К (табл. 2).

Аналогичное сравнение температур дает как удовлетворительные результаты (наилучшие для образца 33, рис. 6в; табл. 2), так и с очень большим расхождением, например в расплавах 7, 16 и 27.

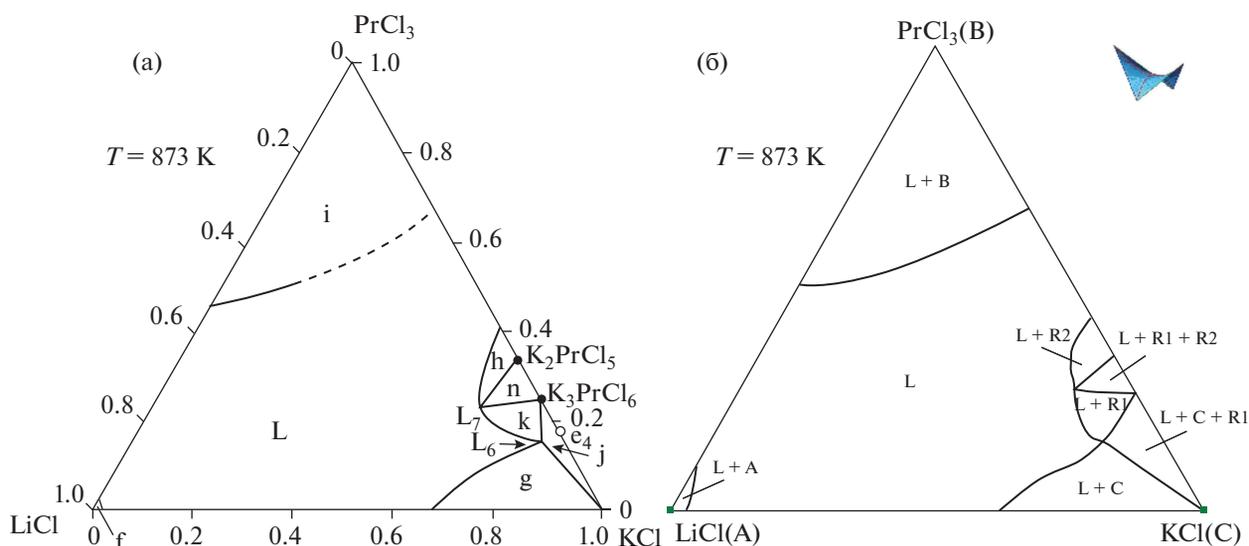


Рис. 5. Изотермический разрез $T_{eBR2} \leq 873 \text{ K} < T_A$: [23] (а), 3D-модель (б).

Необходимо отметить, что для сплава 21 в [23] вместо температуры начала вторичной кристаллизации $L + R1 + R2$ стоит прочерк (табл. 2), и можно предположить, что после первичного выделения $R1$ сразу начинается его разложение по реакции U . Однако это не так, потому что между по-

верхностью ликвидуса $R1$ и плоскостью U находится линейчатая поверхность, задаваемая направляющими линиями $p_{R1R2}U$ и $R1_{R2}R1_U$ (рис. 6г).

Точка 3 в 3D-модели лежит практически на линии $E_{1e_{max}}$ (рис. 6е), поэтому значения двух температур (начала первичной и вторичной кри-

Таблица 2. Температуры термических эффектов при кристаллизации расплавов [23] по сравнению со значениями функций отклика, полученными при помощи 3D-модели (рис. 5)

| №* | Составы точек, мол. % | | | Температуры на границах фазовых областей, К | | Пересекаемые фазовые области и плоскости |
|----|-----------------------|-------------------|-------|---|--------------------|--|
| | LiCl | PrCl ₃ | KCl | [23] | 3D-модель | |
| 6 | 0.2 | 0.05 | 0.75 | 915, 737, 591 | 920, 732, 591 | $L + C, L + C + R2, E_1$ |
| 7 | 0.10 | 0.10 | 0.80 | 931, 803, 763, 592 | 919, 850, 762, 591 | $L + C, L + C + R1, U, E_1$ |
| 21 | 0.10 | 0.20 | 0.70 | 882, —, 762, 593 | 884, 781, 762, 591 | $L + R1, L + R1 + R2, U, E_1$ |
| 1 | 0.75 | 0.05 | 0.20 | 793, 709, 590 | 786, 701, 591 | $L + A, L + A + R2, E_1$ |
| 2 | 0.65 | 0.05 | 0.30 | 733, 697, 590 | 740, 680, 591 | $L + A, L + A + R2, E_1$ |
| 3 | 0.556 | 0.050 | 0.394 | 675, 626, 591 | 665, 664, 591 | $L + R2, L + A + R2, E_1$ |
| 19 | 0.30 | 0.20 | 0.50 | 811, 706, 593 | 826, 700, 591 | $L + R2, L + A + R2, E_1$ |
| 14 | 0.80 | 0.10 | 0.10 | 822, 709, 660 | 814, 684, 654 | $L + A, L + A + R2, E_2$ |
| 16 | 0.60 | 0.20 | 0.20 | 750, 706, 658 | 783, 776, 654 | $L + A, L + A + R2, E_2$ |
| 24 | 0.30 | 0.30 | 0.40 | 793, 698, 653 | 811, 667, 654 | $L + R2, L + A + R2, E_2$ |
| 27 | 0.60 | 0.30 | 0.10 | 724, 713, 654 | 748, 717, 654 | $L + A, L + A + B, E_2$ |
| 33 | 0.40 | 0.50 | 0.10 | 883, 704, 647 | 883, 703, 654 | $L + B, L + A + B, E_2$ |
| 31 | 0.20 | 0.50 | 0.30 | 807, 721, 651 | 788, 727, 654 | $L + B, L + B + R2, E_2$ |

* Номер состава, принятый в [22, 23].

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы сообщают об отсутствии конфликта интересов.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Онлайн версия содержит дополнительные материалы, доступные по адресу
<https://doi.org/10.31857/S0044457X23600524>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Басин А.С., Каплун А.Б., Мешалкин А.Б. и др. // Журн. неорган. химии. 2008. Т. 53. № 9. С. 1611.
<https://doi.org/10.1134/S003602360809026X>
2. Жемчужный С., Рамбах Ф. // Изв. С.-Петербург. политехн. ин-та. 1909. Т. 12. № 1. С. 349.
3. Elchardus E., Laffitte P. // Bull. Soc. Chim. Fr. 1932. V. 51. P. 1572.
4. Бухалова Г.А., Бурлакова В.М. // Журн. неорган. химии. 1966. Т. 11. С. 164.
5. Моисеенко Ж.Г., Акопов Е.К., Паниева Л.А. // Журн. неорган. химии. 1972. Т. 17. № 11. С. 3098.
6. Сафонов А.А., Труш Ф.Ф., Нахшин М.Ю. и др. // Журн. неорган. химии. 1983. Т. 28. С. 1344.
7. Бухалова Г.А., Ягубьян Е.С., Мирсоянова Н.Н. // Журн. неорган. химии. 1986. Т. 31. С. 279.
8. Korin E., Soifer L. // J. Therm. Anal. 1997. V. 50. P. 347.
9. Adachi A., Katayama Y., Miura T. et al. // J. Power Sources. 1997. V. 68. № 2. P. 348.
[https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(97\)02587-1](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(97)02587-1)
10. Shirai O., Iizuka M., Iwai T. et al. // J. Electroanal. Chem. 2000. V. 490. P. 31.
[https://doi.org/10.1016/S0022-0728\(00\)00193-5](https://doi.org/10.1016/S0022-0728(00)00193-5)
11. Laidler J.J., Battles J.E., Miller W.E. et al. // Prog. Nucl. Energy. 1997. V. 31. № 1–2. P. 131.
[https://doi.org/10.1016/0149-1970\(96\)00007-8](https://doi.org/10.1016/0149-1970(96)00007-8)
12. Masset P., Konings R.J.M., Malmbeck R. et al. // J. Nucl. Mater. 2005. V. 344. P. 173.
<https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2005.04.038>
13. Murakami T., Rodrigues A., Ougier M. et al. // J. Nucl. Mater. 2015. V. 466. P. 502.
<https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2015.08.045>
14. Gutknecht T.Y., Fredrickson G.L. Thermal Characterization of Molten Salt Systems. Idaho National Laboratory, 2011. 86 p.
15. Galashev A.Y. // Int. J. Energy Res. 2020. V. 45. № 8. P. 11459.
<https://doi.org/10.1002/er.6267>
16. Ding L., Yan Y., Smolenski V. et al. // Sep. Purif. Technol. 2021. V. 279. P. 119683.
<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.119683>
17. Li Z., Tang D., Meng S. et al. // Sep. Purif. Technol. 2021. V. 276. P. 119045.
<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.119045>
18. Kim I.S., Okamoto Y. // Japan Atomic Energy Research Institute JAERI-Research 99-033. 1999. 16 p.
19. Qiao Z., Wang M., Zheng C. et al. // J. Chin. Rare Earth Soc. 1989. V. 7. P. 16.
20. Qiao Z., Wang M., Zheng C. et al. // Acta Metall. Sin. B. 1989. V. 25. P. 234.
21. Gong W., Gaune-Escard M., Rycerz L. // J. Alloys Compd. 2005. V. 396. P. 92.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2004.12.021>
22. Ghosh S. Thermochemical Studies of Alloys and Molten Halide Salts of Relevance to Pyrochemical Reprocessing of Metallic Fuel. PhD, Diss. Kalpakkam, Tamil Nadu, India. 2016. 201 p.
23. Ghosh S., Ganesan R., Sridharan R. et al. // Thermochim. Acta. 2017. V. 653. P. 16.
<https://doi.org/10.1016/j.tca.2017.03.024>
24. Seifert H.J., Sandrock J., Uebach J. // Z. Anorg. Allg. Chem. 1987. V. 555. P. 143.
<https://doi.org/10.1002/zaac.19875551215>
25. Seifert H.J. // J. Therm. Anal. Calorim. 2002. V. 67. P. 789.
<https://doi.org/10.1023/A:1014341829611>
26. Gaune-Escard M., Rycerz L., Szczepaniak W. et al. // J. Alloys Compd. 1994. V. 204. № 1–2. P. 189.
[https://doi.org/10.1016/0925-8388\(94\)90090-6](https://doi.org/10.1016/0925-8388(94)90090-6)
27. Nakamura K., Kurata M. // J. Nucl. Mater. 1997. V. 247. P. 309.
[https://doi.org/10.1016/S0022-3115\(97\)00099-8](https://doi.org/10.1016/S0022-3115(97)00099-8)
28. Lutsyk V.I., Vorob'eva V.P. // J. Therm. Anal. Calorim. 2010. V. 101. № 1. P. 25.
<https://doi.org/10.1007/s10973-010-0855-0>
29. Воробьева В.П., Зеленая А.Э., Луцык В.И. // Журн. неорган. химии. 2021. Т. 66. № 6. С. 798.
<https://doi.org/10.31857/S0044457X21060222>
30. Lutsyk V.I., Zelenaya A.E., Zyryanov A.M. // J. Int. Sci. Publ.: Mater. Methods Technol. 2008. V. 2. P. 176.
31. Prince A. Alloy Phase Equilibria. Amsterdam—London—New York: Elsevier Publ. Comp., 1966. 290 p.
32. Райнз Ф. Диаграммы фазового равновесия в металлургии. М.: Гос. научно-технич. изд-во лит-ры по черной и цв. металлургии, 1960. 369 с.
33. Халдяниди К.А. Фазовые диаграммы гетерогенных систем с трансформациями. Новосибирск: ИНХ СО РАН, 2004. 382 с.