

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ НЕОРГАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 544.015.3+544.013+542.06

ТРИАНГУЛЯЦИЯ В СИСТЕМЕ $\text{Li}_2\text{ZnP}_2\text{O}_7$ – $\text{Na}_2\text{ZnP}_2\text{O}_7$ – $\text{K}_2\text{ZnP}_2\text{O}_7$

© 2022 г. М. А. Петрова^а, *, О. Ю. Синельщикова^а^аИнститут химии силикатов им. И.В. Гребенщикова РАН, наб. Макарова, 2, Санкт-Петербург, 199034 Россия

*e-mail: maya_petrova@inbox.ru

Поступила в редакцию 31.05.2021 г.

После доработки 28.07.2021 г.

Принята к публикации 04.08.2021 г.

Целесообразность изучения фазовых диаграмм состояния фосфатных систем щелочных элементов и цинка определяется перспективой их использования в качестве катализаторов, ионных проводников, люминофоров, твердотельных лазеров, пьезоэлектрических и других материалов с ценными для практики свойствами. Методом рентгенофазового анализа исследовано фазообразование в частных разрезах $\text{LiNaZnP}_2\text{O}_7$ – $\text{NaKZnP}_2\text{O}_7$ и $\text{LiNaZnP}_2\text{O}_7$ – $\text{K}_2\text{ZnP}_2\text{O}_7$ тройной системы $\text{Li}_2\text{ZnP}_2\text{O}_7$ – $\text{Na}_2\text{ZnP}_2\text{O}_7$ – $\text{K}_2\text{ZnP}_2\text{O}_7$ на образцах, полученных твердофазным синтезом. На основании анализа совокупности данных по фазовым равновесиям ранее изученных систем $\text{M}'_2\text{ZnP}_2\text{O}_7$ – $\text{M}''_2\text{ZnP}_2\text{O}_7$ ($\text{M}', \text{M}'' = \text{Li}, \text{Na}, \text{K}$) и $\text{LiKZnP}_2\text{O}_7$ – $\text{LiNaZnP}_2\text{O}_7$ ($\text{NaKZnP}_2\text{O}_7, \text{Na}_2\text{ZnP}_2\text{O}_7$), а также данных, полученных в настоящей работе, проведена триангуляция тройной системы $\text{Li}_2\text{ZnP}_2\text{O}_7$ – $\text{Na}_2\text{ZnP}_2\text{O}_7$ – $\text{K}_2\text{ZnP}_2\text{O}_7$ в области, ограниченной соединениями $\text{Na}_2\text{ZnP}_2\text{O}_7$, $\text{LiNaZnP}_2\text{O}_7$, $\text{LiKZnP}_2\text{O}_7$ и $\text{K}_2\text{ZnP}_2\text{O}_7$. Установлено образование твердых растворов, содержащих три щелочных элемента: $\text{Li}_x\text{Na}_y\text{K}_{2-(x+y)}\text{ZnP}_2\text{O}_7$ ($0 \leq x \leq 0.8, 0.2 \leq y \leq 1.0$) на основе $\text{NaKZnP}_2\text{O}_7$ (пр. гр. $P2_1/n$) и $\text{Li}_x\text{Na}_y\text{K}_{2-(x+y)}\text{ZnP}_2\text{O}_7$ ($0 \leq x \leq 0.17, 0 \leq y \leq 0.42$) на основе $\text{K}_2\text{ZnP}_2\text{O}_7$ (пр. гр. $P4_2/mnm$). По результатам исследования уточнена диаграмма состояния системы $\text{Li}_2\text{ZnP}_2\text{O}_7$ – $\text{K}_2\text{ZnP}_2\text{O}_7$.

Ключевые слова: цинкофосфаты щелочных металлов, триангуляция, твердые растворы

DOI: 10.31857/S0044457X2202012X

ВВЕДЕНИЕ

Исследование фосфатов щелочных металлов и цинка обусловлено их значением для практики, например, для получения стекол, керамики [1–7], ионных проводников [8–11], сегнето- и пьезоэлектрических материалов [1], люминофоров, в том числе применимых для лазерной техники [6, 12–19] и в других специальных областях. Одна из возможностей расширения круга новых индивидуальных фаз и фаз переменного состава с ценными свойствами – использование различных типов изоморфных замещений как в катионной, так и в анионной подрешетке [20–24]. С этой точки зрения определенный интерес представляет изучение фазовых соотношений в соответствующих фосфатных системах, что открывает большие возможности для целенаправленного синтеза новых неорганических материалов, в том числе и композиционных.

В предшествующих работах по цинкофосфатам щелочных металлов [25–29] изучены фазовые соотношения в бинарных дифосфатных системах, которые графически могут быть представлены наружными и внутренними сторонами кон-

центрационного треугольника $\text{Li}_2\text{ZnP}_2\text{O}_7$ – $\text{Na}_2\text{ZnP}_2\text{O}_7$ – $\text{K}_2\text{ZnP}_2\text{O}_7$ (рис. 1). Краткое описание ранее изученных систем приведено ниже.

Системы $\text{M}'_2\text{ZnP}_2\text{O}_7$ – $\text{M}''_2\text{ZnP}_2\text{O}_7$ ($\text{M}', \text{M}'' = \text{Li}, \text{Na}, \text{K}$) образованы смешанными дифосфатами цинка и являются наружными сторонами треугольника $\text{Li}_2\text{ZnP}_2\text{O}_7$ – $\text{Na}_2\text{ZnP}_2\text{O}_7$ – $\text{K}_2\text{ZnP}_2\text{O}_7$ [25, 26] на рис. 1.

В системах образуется по одному эквимольному соединению с двумя щелочными катионами $\text{LiNaZnP}_2\text{O}_7$ (*Cmcm*), α - и β - $\text{LiKZnP}_2\text{O}_7$ (*Pc* и *Pmc2₁* соответственно) и $\text{NaKZnP}_2\text{O}_7$ (*P2₁/n*). Кроме того, в системе $\text{Na}_2\text{ZnP}_2\text{O}_7$ – $\text{K}_2\text{ZnP}_2\text{O}_7$ установлено образование трех типов твердых растворов на основе $\text{Na}_2\text{ZnP}_2\text{O}_7$ (*P4₂/mnm*) и $\text{K}_2\text{ZnP}_2\text{O}_7$ (*P4₂/mnm*) с предельной растворимостью второго компонента при комнатной температуре 23 и 21 мол. % соответственно, а также на основе соединения $\text{NaKZnP}_2\text{O}_7$ с содержанием до 5 мол. % $\text{K}_2\text{ZnP}_2\text{O}_7$.

Соединения со стехиометрией, подобной $\text{M}_2\text{ZnP}_2\text{O}_7$ ($\text{M} = \text{Na}, \text{K}$), для лития не установлены. Согласно фазовой диаграмме состояния си-

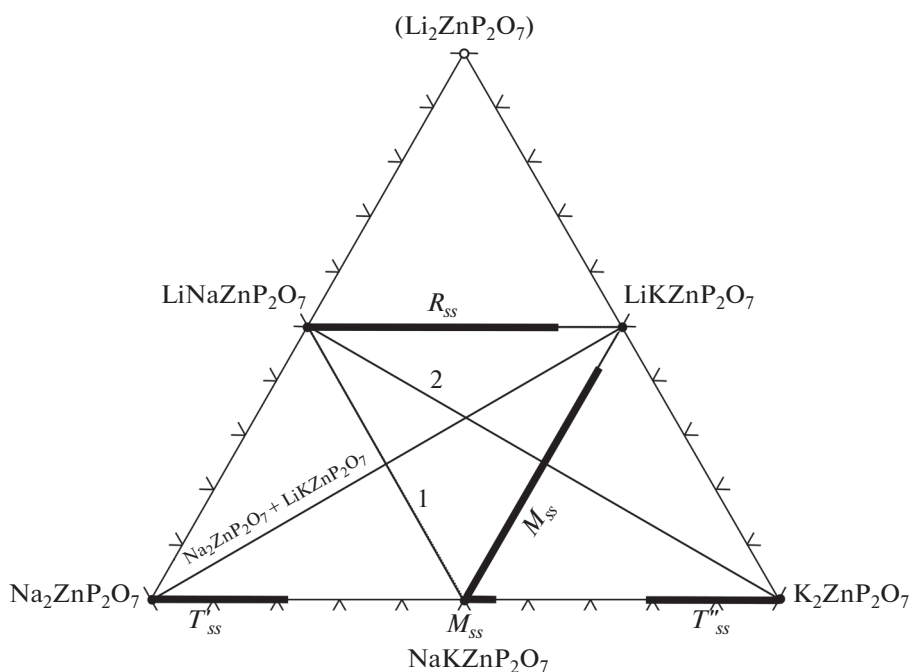


Рис. 1. Фазовый треугольник системы $\text{Li}_2\text{ZnP}_2\text{O}_7$ – $\text{Na}_2\text{ZnP}_2\text{O}_7$ – $\text{K}_2\text{ZnP}_2\text{O}_7$. Полу жирными линиями указаны твердые растворы при 25°C : тетрагональные $\text{Na}_{2-x}\text{K}_x\text{ZnP}_2\text{O}_7$ ($0.0 < x \leq 0.46$) – T_{ss}' и $\text{Na}_x\text{K}_{2-x}\text{ZnP}_2\text{O}_7$ ($0 < x \leq 0.42$) – T_{ss}'' , моноклинные $\text{Na}_{1-x}\text{K}_{1+x}\text{ZnP}_2\text{O}_7$ ($0 \leq x \leq 0.1$) и $\text{Li}_x\text{Na}_{1-x}\text{KZnP}_2\text{O}_7$ ($0 \leq x \leq 0.8$) – M_{ss} , орторомбический $\text{LiNa}_{1-x}\text{K}_x\text{ZnP}_2\text{O}_7$ ($0 \leq x \leq 0.85$) – R_{ss} ; 1 и 2 – исследуемые разрезы.

стемы $\text{Zn}_2\text{P}_2\text{O}_7$ – $\text{Li}_4\text{P}_2\text{O}_7$ [25], составу $\text{Li}_2\text{ZnP}_2\text{O}_7$ соответствует смесь двух фаз: соединения $\text{Li}_{12}\text{Zn}_4(\text{P}_2\text{O}_7)_5$ и твердого раствора $\text{Li}_{2x}\text{Zn}_{2-x}\text{P}_2\text{O}_7$ ($0.3 \leq x \leq 0.56$). Исходя из этого субсолидусные фазовые соотношения между несуществующей фазой $\text{Li}_2\text{ZnP}_2\text{O}_7$ и соответствующими соединениями $\text{LiNaZnP}_2\text{O}_7$ и $\text{LiKZnP}_2\text{O}_7$ (рис. 1) находятся в области трехфазных равновесий, так как данные части систем являются политермическими сечениями в поле тройных систем ($\text{Li}_{12}\text{Zn}_4(\text{P}_2\text{O}_7)_5$ + $\text{Li}_{2x}\text{Zn}_{2-x}\text{P}_2\text{O}_7$ + $\text{LiMZnP}_2\text{O}_7$ ($M = \text{Na}, \text{K}$)).

Системы $\text{LiKZnP}_2\text{O}_7$ – $\text{LiNaZnP}_2\text{O}_7$ ($\text{NaKZnP}_2\text{O}_7$, $\text{Na}_2\text{ZnP}_2\text{O}_7$) являются внутренними сечениями концентрационного треугольника $\text{Li}_2\text{ZnP}_2\text{O}_7$ – $\text{Na}_2\text{ZnP}_2\text{O}_7$ – $\text{K}_2\text{ZnP}_2\text{O}_7$ (рис. 1). В системах $\text{LiKZnP}_2\text{O}_7$ – $\text{LiNaZnP}_2\text{O}_7$ и $\text{LiKZnP}_2\text{O}_7$ – $\text{NaKZnP}_2\text{O}_7$ установлены обширные области ограниченных твердых растворов, содержащих одновременно три щелочных катиона: ромбический $\text{LiNa}_{1-x}\text{K}_x\text{ZnP}_2\text{O}_7$ ($0 \leq x \leq 0.85$) на основе $\text{LiNaZnP}_2\text{O}_7$ (пр. гр. $Cmcm$) и моноклинный $\text{Li}_x\text{Na}_{1-x}\text{KZnP}_2\text{O}_7$ ($0 \leq x \leq 0.80$) на основе $\text{NaKZnP}_2\text{O}_7$ (пр. гр. $P2_1/n$) [24, 25]. На рис. 1 они обозначены как R_{ss} и M_{ss} соответственно.

Система $\text{LiKZnP}_2\text{O}_7$ – $\text{Na}_2\text{ZnP}_2\text{O}_7$ является эвтектической. Субсолидусные фазовые соотношения в ней представлены смесью исходных компо-

нентов; взаимодействие между ними не обнаружено [29].

С целью разбиения упомянутой тройной системы $\text{Li}_2\text{ZnP}_2\text{O}_7$ – $\text{Na}_2\text{ZnP}_2\text{O}_7$ – $\text{K}_2\text{ZnP}_2\text{O}_7$ на элементарные треугольники в настоящей работе в дополнение к ранее изученным системам исследовано фазообразование в системах $\text{LiNaZnP}_2\text{O}_7$ – $\text{NaKZnP}_2\text{O}_7$ и $\text{LiNaZnP}_2\text{O}_7$ – $\text{K}_2\text{ZnP}_2\text{O}_7$ (разрезы 1 и 2 на рис. 1).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Образцы в разрезах 1 и 2 готовили из предварительно синтезированных соответствующих исходных компонентов систем $\text{LiNaZnP}_2\text{O}_7$, $\text{NaKZnP}_2\text{O}_7$ и $\text{K}_2\text{ZnP}_2\text{O}_7$, которые, в свою очередь, были получены по методике, описанной в [24, 25] с использованием следующих реактивов: ZnO , Li_2CO_3 , NaPO_3 , KPO_3 (х. ч.) и $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ (ос. ч.). Смеси исходных компонентов, взятых в необходимых соотношениях, прессовали в таблетки и обжигали при температуре 550°C в течение 11 ч. Образцы после обжига исследовали с помощью рентгенофазового анализа (РФА). Съемку проводили на дифрактометре ДРОН-3М (излучение $\text{CuK}\alpha$) при комнатной температуре в интервале брэгговских углов 2θ 10° – 70° с шагом 0.02° .

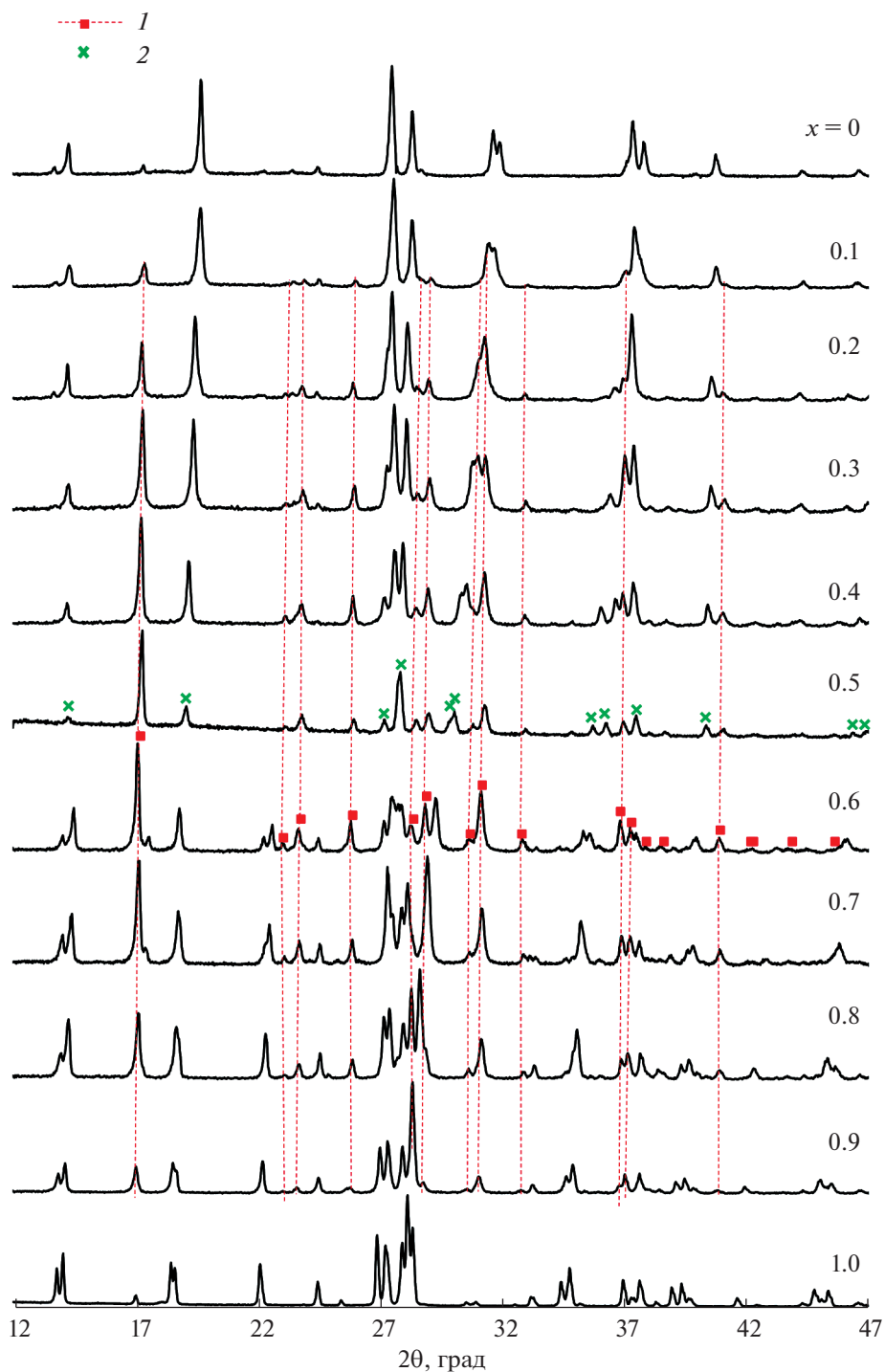


Рис. 2. Дифрактограммы $(1-x)\text{LiNaZnP}_2\text{O}_7 : x\text{NaKZnP}_2\text{O}_7$ (разрез 1) при комнатной температуре.

T'_{ss} ($\text{Na}_{2-y}\text{K}_y\text{ZnP}_2\text{O}_7$ при $0 \leq y \leq 0.46$) и $\text{Na}_2\text{ZnP}_2\text{O}_7$ ($\text{Na}_{2-y}\text{K}_y\text{ZnP}_2\text{O}_7$ при $y = 0$) (1), $\alpha\text{-LiKZnP}_2\text{O}_7$ (2).

Результаты РФА образцов в указанных системах представлены на рис. 2, 3 и в табл. 1.

В системе $\text{LiNaZnP}_2\text{O}_7\text{--K}_2\text{ZnP}_2\text{O}_7$ обнаружена область гомогенности на основе $\text{K}_2\text{ZnP}_2\text{O}_7$ с содержанием $\text{LiNaZnP}_2\text{O}_7$ до 10 мол. % (рис. 2). Об-

разование твердых растворов в указанной системе и в системе $\text{Na}_2\text{ZnP}_2\text{O}_7\text{--K}_2\text{ZnP}_2\text{O}_7$ [25] свидетельствует о возможности их существования и в системе $\text{Li}_2\text{ZnP}_2\text{O}_7\text{--K}_2\text{ZnP}_2\text{O}_7$ [28]. Для проверки существования подобных твердых растворов и в

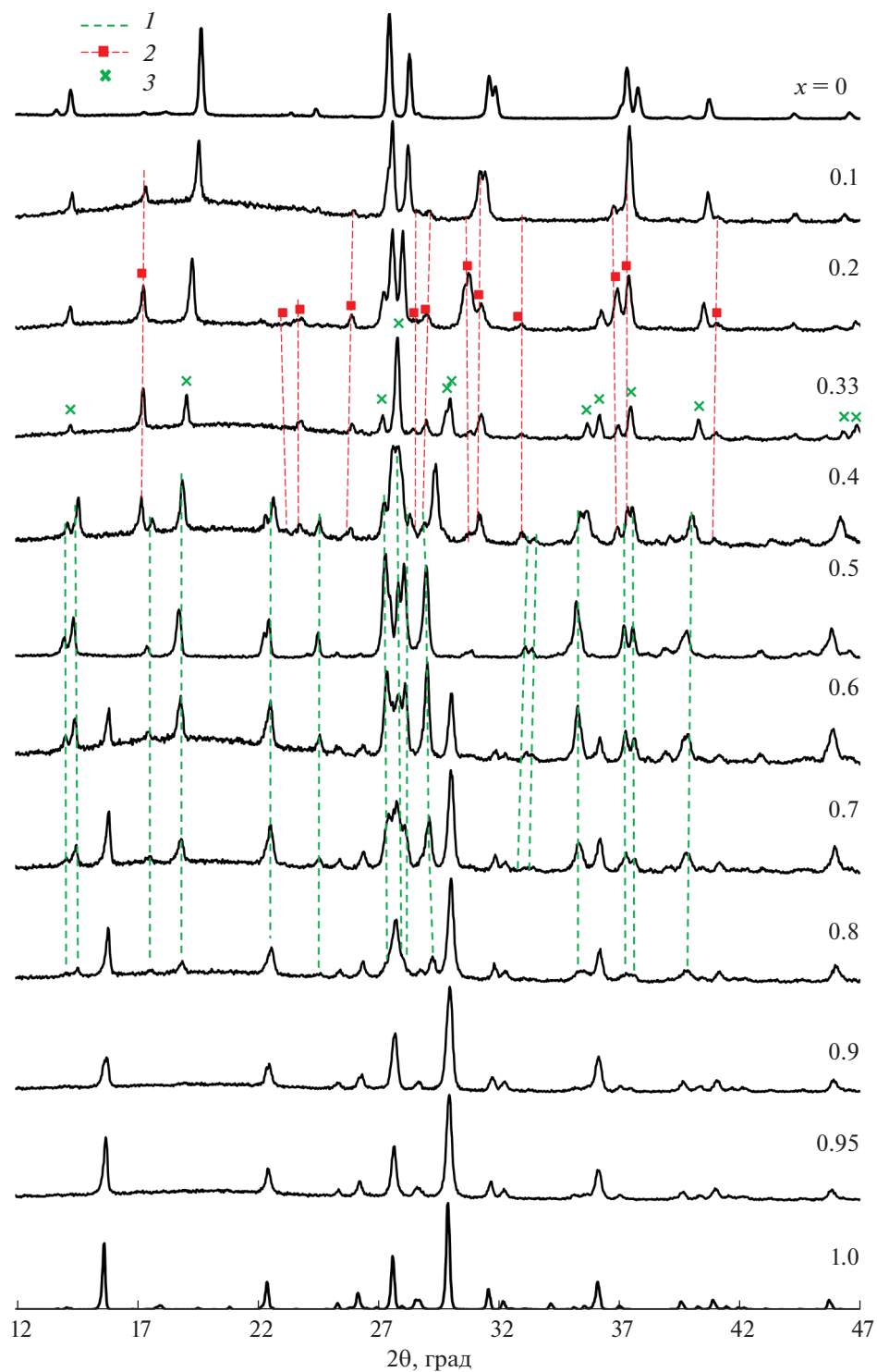


Рис. 3. Дифрактограммы $(1-x)\text{LiNaZnP}_2\text{O}_7 : x\text{K}_2\text{ZnP}_2\text{O}_7$ (разрез 2) при комнатной температуре. $M_{ss}(\text{Li}_x\text{Na}_y\text{K}_{2-(x+y)}\text{ZnP}_2\text{O}_7$ при $0 \leq x \leq 0.74$, $0.26 \leq y \leq 1.0$) (1); $T'_{ss}(\text{Na}_{2-y}\text{K}_y\text{ZnP}_2\text{O}_7$ при $0 \leq y \leq 0.46$) и $\text{Na}_2\text{ZnP}_2\text{O}_7$ ($\text{Na}_{2-y}\text{K}_y\text{ZnP}_2\text{O}_7$ при $y = 0.0$) (2); $\alpha\text{-LiKZnP}_2\text{O}_7$ (3).

Таблица 1. Фазовый состав в системах $\text{LiNaZnP}_2\text{O}_7\text{--NaKZnP}_2\text{O}_7$ и $\text{LiNaZnP}_2\text{O}_7\text{--K}_2\text{ZnP}_2\text{O}_7$

$\text{LiNaZnP}_2\text{O}_7\text{--NaKZnP}_2\text{O}_7$		$\text{LiNaZnP}_2\text{O}_7\text{--K}_2\text{ZnP}_2\text{O}_7$	
$x\text{NaKZnP}_2\text{O}_7$	состав	$x\text{K}_2\text{ZnP}_2\text{O}_7$	состав
0.1; 0.2; 0.3; 0.4	$\text{Na}_2\text{ZnP}_2\text{O}_7 + R_{\text{ss}}$	0.1; 0.2	$\text{Na}_2\text{ZnP}_2\text{O}_7 + R_{\text{ss}}$
0.5	$\text{Na}_2\text{ZnP}_2\text{O}_7 + \text{LiKZnP}_2\text{O}_7$	0.33	$\text{Na}_2\text{ZnP}_2\text{O}_7 + \text{LiKZnP}_2\text{O}_7$
0.6	$T'_{\text{ss}} + \text{LiKZnP}_2\text{O}_7$	0.4	$T'_{\text{ss}} + M_{\text{ss}} + \text{LiKZnP}_2\text{O}_7$
0.7; 0.8; 0.9	$T'_{\text{ss}} + M_{\text{ss}}$	0.5	M_{ss}
		0.6	$M_{\text{ss}} + T''_{\text{ss}}$
		0.7; 0.8	$T''_{\text{ss}} + \text{LiKZnP}_2\text{O}_7$
		0.9; 0.95	T''_{ss}

системе $\text{Li}_2\text{ZnP}_2\text{O}_7\text{--K}_2\text{ZnP}_2\text{O}_7$ были синтезированы образцы с содержанием $\text{Li}_2\text{ZnP}_2\text{O}_7$ 0.05, 0.075 и 0.1 мол. % (рис. 1) при температуре 550°C (11 ч). По данным РФА, у двух первых образцов все рефлексы отвечали структуре $\text{K}_2\text{ZnP}_2\text{O}_7$, примесных фаз не обнаружено, в отличие от состава 0.1 мол. %

$\text{Li}_2\text{ZnP}_2\text{O}_7$. Оба образца затем были обожжены при температуре 635°C в течение 2 ч (выше температуры эвтектики (630°C) в данной системе). Дифракционная картина после обжига сохранилась, подплавление образцов не наблюдалось. Таким образом, в системе $\text{Li}_2\text{ZnP}_2\text{O}_7\text{--K}_2\text{ZnP}_2\text{O}_7$ установ-

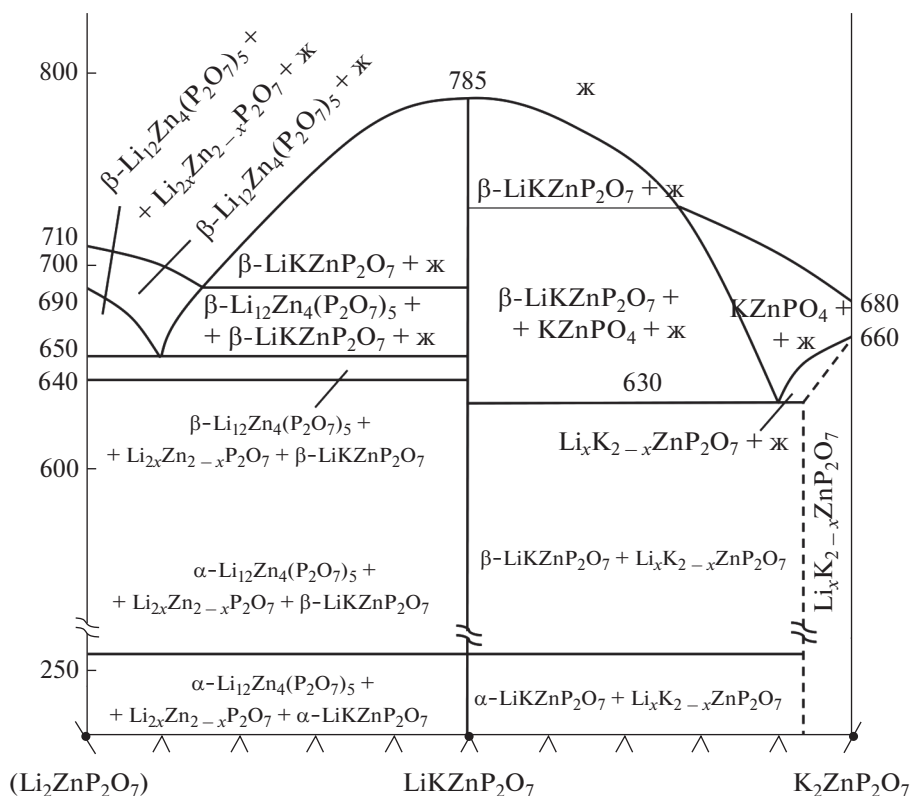


Рис. 4. Фазовая диаграмма состояния системы $\text{Li}_2\text{ZnP}_2\text{O}_7\text{--K}_2\text{ZnP}_2\text{O}_7$. $\text{Li}_{2x}\text{Zn}_{2-x}\text{P}_2\text{O}_7$ ($0.3 \leq x \leq 0.56$), $\text{Li}_x\text{K}_{2-x}\text{ZnP}_2\text{O}_7$ ($0 \leq x \leq 0.17$).

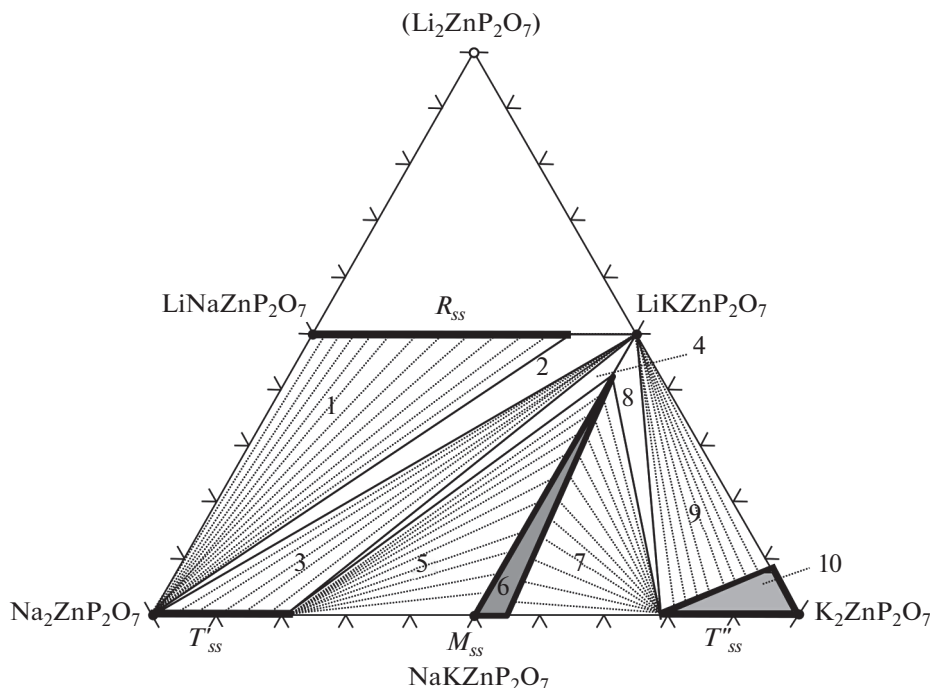


Рис. 5. Триангуляция системы $\text{Li}_2\text{ZnP}_2\text{O}_7$ – $\text{Na}_2\text{ZnP}_2\text{O}_7$ – $\text{K}_2\text{ZnP}_2\text{O}_7$ в области, ограниченной соединениями $\text{Na}_2\text{ZnP}_2\text{O}_7$, $\text{LiNaZnP}_2\text{O}_7$, $\text{LiKZnP}_2\text{O}_7$ и $\text{K}_2\text{ZnP}_2\text{O}_7$; 1–10 – элементарные фазовые треугольники, 6 – моноклинный твердый раствор $\text{Li}_x\text{Na}_y\text{K}_{2-(x+y)}\text{ZnP}_2\text{O}_7$ ($0 \leq x \leq 0.8$, $0.2 \leq y \leq 1.0$) – M_{ss} ; 10 – тетрагональный твердый раствор $\text{Li}_x\text{Na}_y\text{K}_{2-(x+y)}\text{ZnP}_2\text{O}_7$ ($0 \leq x \leq 0.17$, $0 \leq y \leq 0.42$) – T'''_{ss} .

лено существование тетрагонального твердого раствора $\text{Li}_x\text{K}_{2-x}\text{ZnP}_2\text{O}_7$ ($0 \leq x \leq 0.17$) на основе $\text{K}_2\text{ZnP}_2\text{O}_7$ (рис. 4).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Обнаружение тетрагональных твердых растворов в системе $\text{Li}_2\text{ZnP}_2\text{O}_7$ – $\text{K}_2\text{ZnP}_2\text{O}_7$ вносит коррективы в изученную нами ранее систему $\text{Li}_2\text{ZnP}_2\text{O}_7$ – $\text{K}_2\text{ZnP}_2\text{O}_7$ [25]; уточненный вариант диаграммы приведен на рис. 4.

Таким образом, твердые растворы на основе $\text{K}_2\text{ZnP}_2\text{O}_7$ установлены в трех системах: $\text{Na}_2\text{ZnP}_2\text{O}_7$ – $\text{K}_2\text{ZnP}_2\text{O}_7$, $\text{Li}_2\text{ZnP}_2\text{O}_7$ – $\text{K}_2\text{ZnP}_2\text{O}_7$ и $\text{LiNaZnP}_2\text{O}_7$ – $\text{K}_2\text{ZnP}_2\text{O}_7$, что дает основание выделить в плоскости концентрационного треугольника $\text{Li}_2\text{ZnP}_2\text{O}_7$ – $\text{Na}_2\text{ZnP}_2\text{O}_7$ – $\text{K}_2\text{ZnP}_2\text{O}_7$ область гомогенности с тетрагональной структурой (пр. гр. $P4_2/mnm$). В координатах тройной системы поле упомянутой тетрагональной фазы может быть записано как $\text{Li}_x\text{Na}_y\text{K}_{2-(x+y)}\text{ZnP}_2\text{O}_7$ ($0 \leq x \leq 0.17$, $0 \leq y \leq 0.42$).

В тройной системе $\text{Li}_2\text{ZnP}_2\text{O}_7$ – $\text{Na}_2\text{ZnP}_2\text{O}_7$ – $\text{K}_2\text{ZnP}_2\text{O}_7$ выделен также твердый раствор с моноклинной структурой (пр. гр. $P2_1/n$). Предпосылкой для его существования является наличие

твердых растворов на основе $\text{NaKZnP}_2\text{O}_7$, которые реализуются в системах $\text{Na}_2\text{ZnP}_2\text{O}_7$ – $\text{K}_2\text{ZnP}_2\text{O}_7$ и $\text{LiKZnP}_2\text{O}_7$ – $\text{NaKZnP}_2\text{O}_7$. Положение моноклинного твердого раствора на фазовом треугольнике может быть записано формулой $\text{Li}_x\text{Na}_y\text{K}_{2-(x+y)}\text{ZnP}_2\text{O}_7$ ($0 \leq x \leq 0.8$, $0.2 \leq y \leq 1.0$).

Как следует из данных табл. 1, изученные системы $\text{LiNaZnP}_2\text{O}_7$ – $\text{NaKZnP}_2\text{O}_7$ и $\text{LiNaZnP}_2\text{O}_7$ – $\text{K}_2\text{ZnP}_2\text{O}_7$ не являются истинными, так как фазовые соотношения в них представлены фазами, не находящимися на соединительной прямой между исходными компонентами. Оба сечения проходят через несколько фазовых полей с одно-, двух- и трехфазными равновесиями. Однофазному равновесию соответствуют моноклинный твердый раствор на основе $\text{NaKZnP}_2\text{O}_7$ и тетрагональный на основе $\text{K}_2\text{ZnP}_2\text{O}_7$.

На основании результатов рентгенофазового анализа разрезов $\text{LiNaZnP}_2\text{O}_7$ – $\text{NaKZnP}_2\text{O}_7$ и $\text{LiNaZnP}_2\text{O}_7$ – $\text{K}_2\text{ZnP}_2\text{O}_7$ с учетом данных по фазовым равновесиям в ранее изученных вышеупомянутых системах [25–29] проведена триангуляция системы $\text{Li}_2\text{ZnP}_2\text{O}_7$ – $\text{Na}_2\text{ZnP}_2\text{O}_7$ – $\text{K}_2\text{ZnP}_2\text{O}_7$ в области, ограниченной соединениями $\text{Na}_2\text{ZnP}_2\text{O}_7$, $\text{LiNaZnP}_2\text{O}_7$, $\text{LiKZnP}_2\text{O}_7$ и $\text{K}_2\text{ZnP}_2\text{O}_7$. Эта область может быть разбита на 10 элементарных треуголь-

Таблица 2. Фазовый состав в элементарных треугольниках системы $\text{Li}_2\text{ZnP}_2\text{O}_7\text{--Na}_2\text{ZnP}_2\text{O}_7\text{--K}_2\text{ZnP}_2\text{O}_7$

Номер элементарного треугольника	Состав	Номер элементарного треугольника	Состав
1	$R_{ss} + \text{Na}_2\text{ZnP}_2\text{O}_7$	6	M_{ss}
2	$R_{ss} + \text{Na}_2\text{ZnP}_2\text{O}_7 + \text{LiKZnP}_2\text{O}_7$	7	$M_{ss} + T_{ss}''$
3	$T_{ss}' + \text{LiKZnP}_2\text{O}_7$	8	$M_{ss} + T_{ss}'' + \text{LiKZnP}_2\text{O}_7$
4	$T_{ss}' + \text{LiKZnP}_2\text{O}_7 + M_{ss}$	9	$T_{ss}'' + \text{LiKZnP}_2\text{O}_7$
5	$T_{ss}' + M_{ss}$	10	T_{ss}''

ников (рис. 5), где в равновесии находятся фазы, указанные в табл. 2.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ совокупности данных, полученных в работах [25–29], а также в настоящей работе по изучению фазовых соотношений в частных разрезах тройной системы $\text{Li}_2\text{ZnP}_2\text{O}_7\text{--Na}_2\text{ZnP}_2\text{O}_7\text{--K}_2\text{ZnP}_2\text{O}_7$, позволил провести разбиение указанной системы в области, ограниченной соединениями $\text{Na}_2\text{ZnP}_2\text{O}_7$, $\text{LiNaZnP}_2\text{O}_7$, $\text{LiKZnP}_2\text{O}_7$ и $\text{K}_2\text{ZnP}_2\text{O}_7$, на 10 элементарных треугольников с одно-, двух- и трехфазными равновесиями. В плоскости фазового треугольника данной системы установлено существование двух твердых растворов состава $\text{Li}_x\text{Na}_y\text{K}_{2-(x+y)}\text{ZnP}_2\text{O}_7$ ($0 \leq x \leq 0.17$, $0 \leq y \leq 0.42$) с тетрагональной (пр. гр. $P4_2/mnm$) и $\text{Li}_x\text{Na}_y\text{K}_{2-(x+y)}\text{ZnP}_2\text{O}_7$ ($0 \leq x \leq 0.8$, $0.2 \leq y \leq 1.0$) с моноклинной (пр. гр. $P2_1/n$) структурой.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственного задания ИХС РАН при поддержке Минобрнауки России (тема № АААА-А19-119022290092-5).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kharroubi M., Assad H., Gacem L., Henn F.* // Int. J. Emerging Technol. Adv. Engineer. 2014. V. 4. № 7. P. 49.
2. *Сычева Г.А.* // Физика и химия стекла. 2018. Т. 44. № 6. С. S27. <https://doi.org/10.1134/S013266511807017X>
3. *Caldillo U., Lira A., Meza-Rocha A.N. et al.* // J. Lumin. 2018. V. 194. P. 231. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2017.10.028>
4. *Soriano-Romero O., Lozada-Morales R., Meza-Rocha A.N. et al.* // J. Lumin. 2020. V. 217. P. 116791. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2019.116791>
5. *Shwetha M., Eraiah B.* // J. Non-Cryst. Solids. 2021. V. 555. P. 120622. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2020.120622>
6. *Kundu H.K., Massand O.P., Marathe P.K., Venkataraman G.* // Nucl. Instrum. Methods. 1980. V. 175. P. 363. [https://doi.org/10.1016/0029-554X\(80\)90749-1](https://doi.org/10.1016/0029-554X(80)90749-1)
7. *Quinn C.J., Beall G.H., Dickenson J.E.* // Bull. Span. Soc. Ceram. Glasses. 1992. V. 4. P. 79.
8. *Sunitha A.M., Gopalakrishna G.S., Byrappa K.* // J. Int. Acad. Res. Multidisciplinary. 2016. V. 4. № 2. P. 329.
9. *Kalai C., Kharroubi M., Gacem L. et al.* // Glass. Phys. Chem. 2019. V. 45. P. 503. <https://doi.org/10.1134/S1087659619060087>
10. *Voronin V.I., Sherstobitova E.A., Blatov V.A., Shekhtman G.Sh.* // J. Solid State Chem. 2014. V. 211. P. 170. <https://doi.org/10.1016/j.jssc.2013.12.015>
11. *Saha S., Rousse G., Fauth F. et al.* // Inorg. Chem. 2019. V. 58. № 3. P. 1774. <https://doi.org/10.1021/acs.inorgchem.8b01800>
12. *Kumar B.V., Vithal M.* // Physica B. 2012. V. 407. № 12. P. 2094. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2012.02.013>
13. *Rim B., Lakhdar G., Bachir B. et al.* // Luminescence. 2021. V. 36. № 2. P. 489. <https://doi.org/10.1002/bio.3968>
14. *Bhake A.M., Parauha Y.R., Dhoble S.J.* // J. Mater. Sci. –Mater. Electron. 2020. V. 31. P. 548. <https://doi.org/10.1007/s10854-019-02559-4>
15. *Guebous L., Gacem L.* // Acta Phys. Pol., A. 2012. V. 122. № 3. P. 535. <https://doi.org/10.12693/APhysPolA.122.535>
16. *Amara A., Gacem L., Gueddim A. et al.* // Phys. B. 2018. V. 545. P. 408. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2018.07.008>
17. *Fhoula M., Dammak M.* // J. Lumin. 2019. V. 210. P. 1. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2019.01.058>
18. *Gacem L., Artemenko A., Ouadjaout D. et al.* // Solid State Sci. 2009. V. 11. P. 1854. <https://doi.org/10.1016/j.solidstatescienc-es.2009.08.006>

19. *Belbal R., Gacem L., Bentria B.* // Inorg. Chem. Commun. 2018. V. 97. P. 39. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2018.09.007>
20. *Chen Z., Fang Y., Zhang W. et al.* // Inorg. Chem. 2018. V. 57. № 17. P. 10568. <https://doi.org/10.1021/acs.inorgchem.8b01140>
21. *Dong L., Ge X., Zhang P. et al.* // Z. Anorg. Allg. Chem. 2019. V. 645. № 14. P. 944. <https://doi.org/10.1002/zaac.201900045>
22. *Song H., Zhang S., Li Y. et al.* // Solid State Sci. 2019. V. 95. 105940. <https://doi.org/10.1016/j.solidstatesciences.2019.105940>
23. *Song Z., Yu H., Wu H. et al.* // Inorg. Chem. Front. 2020. V. 7. № 18. P. 3482. <https://doi.org/10.1039/D0QI00689K>
24. *Wang H., Geng L., Wang Y.-J. et al.* // J. Alloys Compd. 2020. V. 820. Art. 153176. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.153176>
25. *Петрова М.А., Микиртичева Г.А., Гребенищikov Р.Г.* // Неорган. материалы. 2007. Т. 43. № 9. С. 1141. [*Petrova M.A., Mikirticheva G.A., Grebenshchikov R.G.* // Inorg. Mater. 2007. V. 43. № 9. P. 1024. <https://doi.org/10.1134/S0020168507090208>]
26. *Ланшин А.Е., Петрова М.А.* // Физика и химия стекла. 2012. Т. 38. № 6. С. 718. [*Lapshin A.E., Petrova M.A.* // Glass Phys. Chem. 2012. V. 38. № 6. P. 491. <https://doi.org/10.1134/S108765961206003X>]
27. *Петрова М.А., Волков С.Н., Бубнова Р.С.* // Физика и химия стекла. 2014. Т. 40. № 4. С. 592. [*Petrova M.A., Volkov S.N., Bubnova R.S.* // Glass Phys. Chem. 2014. V. 40. № 4. P. 447. <https://doi.org/10.1134/S1087659614040087>]
28. *Volkov S., Petrova M., Sinel'shchikova O. et al.* // J. Solid State Chem. 2019. V. 269. P. 486. <https://doi.org/10.1016/j.jssc.2018.10.029>
29. *Петрова М.А., Попова В.Ф.* // Физика и химия стекла. 2017. Т. 43. № 4. С. 431. [*Petrova M.A., Popova V.F.* // Glass Phys. Chem. 2017. V. 43. № 4. P. 380. <https://doi.org/10.1134/S1087659617040125>]