

УДК 544.344.015.3

DOI <https://doi.org/10.32782/pcsd-2021-2-7>

**Олександр СМІТЮХ**

кандидат хімічних наук, старший лаборант кафедри хімії та технологій, Волинський національний університет імені Лесі Українки, просп. Волі, 13, м. Луцьк, Волинська обл., Україна, 43025

**ORCID:** 0000-0003-1632-5849

**Олег МАРЧУК**

кандидат хімічних наук, доцент, доцент кафедри хімії та технологій, Волинський національний університет імені Лесі Українки, просп. Волі, 13, м. Луцьк, Волинська обл., Україна, 43025

**ORCID:** 0000-0002-5618-7156

**Бібліографічний опис статті:** Смітюх, О., Марчук, О. (2021). Фазові рівноваги в системі  $PbS-La(Pr)_2S_3-Y(Er)_2S_3$ . *Проблеми хімії та сталого розвитку*, 2, 42–47, doi: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2021-2-7>

**ФАЗОВІ РІВНОВАГИ В СИСТЕМІ  $PbS-La(Pr)_2S_3-Y(Er)_2S_3$**

Дослідження фазових рівноваг у квазіпотрійних системах – важливий етап для формування фундаментальних знань про матеріали. Кожна кристалічна структура – це новий мотив організації атомів, який дозволяє пояснювати деякі закономірності утворення чи не утворення більш складних фаз. У роботі проведено дослідження квазіпотрійних систем  $PbS-La(Pr)_2S_3-Y(Er)_2S_3$  з метою вивчення складних взаємодій між бінарними та тернарними фазами, що утворюються на відповідних квазібінарних перерізах. Зразки для аналізу отримані прямим синтезом з елементарних компонентів високої чистоти. Максимальна температура синтезу становила 1323 К. За цієї температури зразки витримувалися протягом 2 год. В подальшому за 770 К проводили відпал, для кращої гомогенізації. Після витримки ампули гартувалися у воді за кімнатної температури. Дифрактограми зразків були отримані на ДРОН-4-13. Згідно з рентгенофазовим аналізом, у системах не спостерігається утворення нових тернарних фаз. Такий мотив фазових рівноваг пояснюється, виходячи з організації атомів у бінарних сполуках. При аналізі бінарних сполук, що утворюють квазібінарні перерізи  $SnS_2 - Y(Er)_2S_3$  встановлено, що мотиви організації атомів не об'єднуються для утворення тернарної фази, напроти у випадку  $SnS_2 - La(Pr)_2S_3$  мотиви об'єднуються з утворенням тернарних фаз  $La_2SnS_5$  та  $Pr_2SnS_5$ . Фактично мотив Станум-вмісної фази входить у структуру La-вмісної і як наслідок параметри комірок децю збільшуються. Сукупно, при переході до квазіпотрійної системи, внаслідок вище згаданого опису, мотиви укладок атомів не об'єднуються і нові тернарні сполуки не утворюються. У роботі, за результатами рентгенофазового аналізу побудовано ізотермічні перерізи квазіпотрійних систем  $PbS-La(Pr)_2S_3-Y(Er)_2S_3$  за температури 770 К. Між сполуками  $Y(Er)_2S_3 - La(Pr)_2SnS_3$  існують квазібінарні рівноваги.

**Ключові слова:** кристалічна структура, елементарна комірка, ізотермічний переріз, квазібінарна рівновага.

**Oleksandr SMITIUKH**

PhD in Chemistry, Senior Assistant at the Department of Chemistry and Technology, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Voli ave., Lutsk, Volyn region, Ukraine, 43025

**ORCID:** 0000-0003-1632-5849

**Oleg MARCHUK**

PhD in Chemistry, Associate Professor, Senior Lecturer at the Department of Chemistry and Technology, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Voli ave., Lutsk, Volyn region, Ukraine, 43025

**ORCID:** 0000-0002-5618-7156

**To cite this article:** Smitiukh, O. & Marchuk, O. (2021). Fazovi rivnovahy v systemi  $PbS-La(Pr)_2S_3-Y(Er)_2S_3$  [The phase equilibria of the  $PbS-La(Pr)_2S_3-Y(Er)_2S_3$  systems]. *Problems of Chemistry and Sustainable Development*, 2, 42–47, doi: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2021-2-7>

**THE PHASE EQUILIBRIA OF THE  $PbS-La(Pr)_2S_3-Y(Er)_2S_3$  SYSTEMS**

Research of phase equals in quasi-ternary systems – creation of a stage of formation of basic knowledge about materials. Each crystal structure is a new motive for the organization of atoms, which allows us to explain some patterns of forma-

tion without creating more complex phases. During the research of the quasi-ternary systems  $PbS-La(Pr)_2S_3-Y(Er)_2S_3$  by studying the complex interactions between binary and ternary phases, which are created on the corresponding quasi-binary transfers. Samples for analysis are obtained by direct synthesis from elementary components of high purity. The maximum synthesis temperature was 1323 K. For this temperature, the samples are maintained for 2 hours. Subsequently, annealing was performed at 770 K for better homogenization. After aging, the ampoules are hardened in water at the room temperature. Diffractograms of the samples were obtained on DRON-4-13. According to X-ray phase analysis, the creation of new quaternary phases is not observed in the systems. This motif of phase equilibria is explained by the organization of atoms in binary compounds. In the analysis of binary compounds that create quasi-binary transitions  $SnS_2 - Y(Er)_2S_3$ , it was found that the motives of the organization of atoms are not reproduced for the formation of the ternary phase, in contrast to the case of  $SnS_2 - La(Pr)_2S_3$ , motifs are combined with the formation of ternary phases  $La_2SnS_5$  and  $Pr_2SnS_5$ . In fact, the motif State-content of the phase is part of the structure of the La-content and as a result, the parameters of the cells increase slightly. Collectively, during the transitions to the quasi-ternary system, as a result of the above-mentioned description, the motifs of the atoms are not combined and new quaternary compounds are not created. At work, the results of X-ray phase analysis constructed isothermal sections of the quasi-ternary systems  $PbS - La(Pr)_2S_3 - Y(Er)_2S_3$  at the temperature 770 K. Between the compounds  $Y(Er)_2S_3 - La(Pr)_2SnS_5$  there are quasi-binary equilibria.

**Key words:** crystalline structure, a unit cell, isothermal section, quasi-binary section.

Пошук нових перспективних матеріалів зумовлюється насамперед розвитком технологічного обладнання. За останні десятиріччя халькогеніди займають чільне місце серед матеріалів, які цікавлять науковців. Згідно з результатами багатьох досліджень, встановлено що халькогенідні матеріали проявляють електронні [1-2], термоелектричні [3], оптичні [4], напівпровідникові [5,6] та магнітні [7] властивості.

Вивчення закономірностей взаємодії компонентів у системах  $PbS-La(Pr)_2S_3-Y(Er)_2S_3$  є одним із етапів систематичного дослідження взаємодії халькогенідів рідкісноземельних металів, та елементів IVA групи Періодичної системи [8].

Вихідні фази мають евтектичний тип плавлення. Їх діаграми стану зображені на рис. 1-3.

Діаграма стану системи  $Y(Er) - S$  не побудовані. Згідно з літературними даних, у доступних джерелах інформації відсутня інформація про фазові рівноваги у системах

$SnS_2 - Y(Er)_2S_3$ ,  $SnS_2 - La(Pr)_2S_3$  та  $Y(Er)_2S_3 - La(Pr)_2S_3$  є лише короткі відомості про утворення окремих фаз  $La(Pr)_2SnS_5$ , що утворюються при стехіометричному співвідношенні вихідних компонентів. Використовуючи рентгенофазовий аналіз, нами проведено дослідження зразків відповідного складу і підтверджено існування таких сполук. Інші тернарні фази на цих квазібінарних перерізах не утворюються. Детальний аналіз зразків квазіпотрійної системи  $PbS-La(Pr)_2S_3-Y(Er)_2S_3$  вказує на існування квазібінарних перерізів  $Y(Er)_2S_3 - La(Pr)_2SnS_5$ . Самоорганізація атомів у стійку кристалічну структуру в квазіпотрійній системі не відбувається. Для того, щоби детальніше проаналізувати це питання, розглянемо деякі структурні особливості вихідних фаз та проаналізуємо мотив організації атомів на квазібінарних перерізах  $SnS_2 - Y(Er)_2S_3$  та  $SnS_2 - La(Pr)_2S_3$ , оскільки природа атомів Y, Er, La, Pr є подібна, але тернарні структури утворюються лише за участі  $SnS_2$  і  $La(Pr)_2S_3$ .

Таблиця 1

**Кристаллографічні характеристики бінарних та тернарних сполук  $SnS_2, Y_2S_3, Er_2S_3, La_2S_3, Pr_2S_3, La_2SnS_5$  та  $Pr_2SnS_5$**

Сполука	ПГ	Періоди комірки, нм			Літ-ра
		a	b	c	
$SnS_2$	$P6_3mc$	3.645	–	11.802	[9]
$Y_2S_3$	$P2_1m$	17.5334	4.0107 $\beta = 98,601^\circ$	10.1736	[10]
$Er_2S_3$	$P2_1m$	17.4418 Å	3.9822 Å $\beta = 98,688^\circ$	10.1013 Å	[11]
$La_2S_3$	$Pnma$	7.66	4.22	1.595	[12]
$Pr_2S_3$	$Pnma$	7.49 Å	4.10 Å	15.69 Å	[13]
$La_2SnS_5$	$Pbam$	11.22	7.915	3.96	[14]
$Pr_2SnS_5$	$Pbam$	7.8195	11.2145	3.9462	[15]

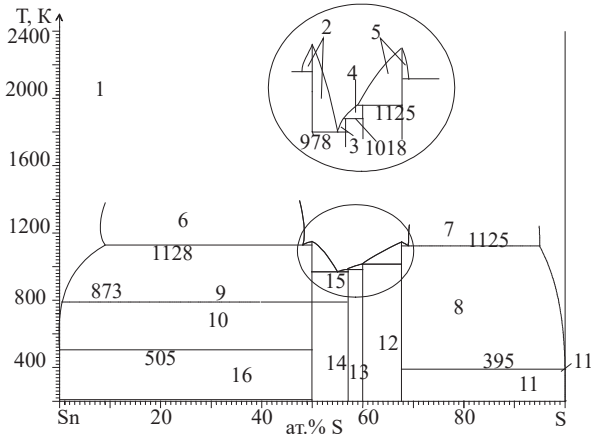


Рис. 1. Діаграма стану Sn – S [3616]:

1 – L, 2 – L +  $\beta$ -SnS, 3 – L + Sn<sub>3</sub>S<sub>4</sub>, 4 – L + Sn<sub>2</sub>S<sub>3</sub>,  
 5 – L + SnS<sub>2</sub>, 6 – L<sub>1</sub> + L<sub>2</sub>, 7 – L<sub>3</sub> + L<sub>4</sub>, 8 – L + SnS<sub>2</sub>,  
 9 – L +  $\beta$ -SnS, 10 – L +  $\alpha$ -SnS, 11 – SnS<sub>2</sub> +  $\alpha$ -S,  
 12 – Sn<sub>2</sub>S<sub>3</sub> + SnS<sub>2</sub>, 13 – Sn<sub>3</sub>S<sub>4</sub> + Sn<sub>2</sub>S<sub>3</sub>, 14 –  $\alpha$ -SnS  
 + Sn<sub>3</sub>S<sub>4</sub>, 15 –  $\beta$ -SnS + Sn<sub>3</sub>S<sub>4</sub>, 16 –  $\beta$ -Sn +  $\alpha$ -SnS

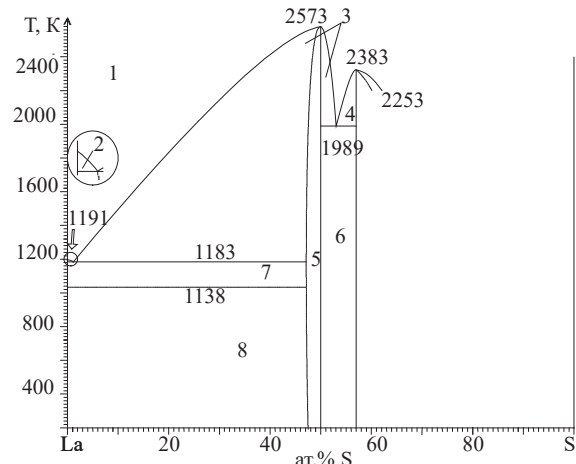


Рис. 2. Діаграма стану системи La – S [8517]:

1 – L, 2 – L + La, 3 – L +  $\delta$ -LaS, 4 – L + La<sub>2</sub>S<sub>3</sub>,  
 5 –  $\delta$ -LaS, 6 –  $\delta$ -LaS + La<sub>2</sub>S<sub>3</sub>, 7 –  $\gamma$ -La +  $\delta$ -LaS,  
 8 –  $\beta$ -La +  $\delta$ -LaS

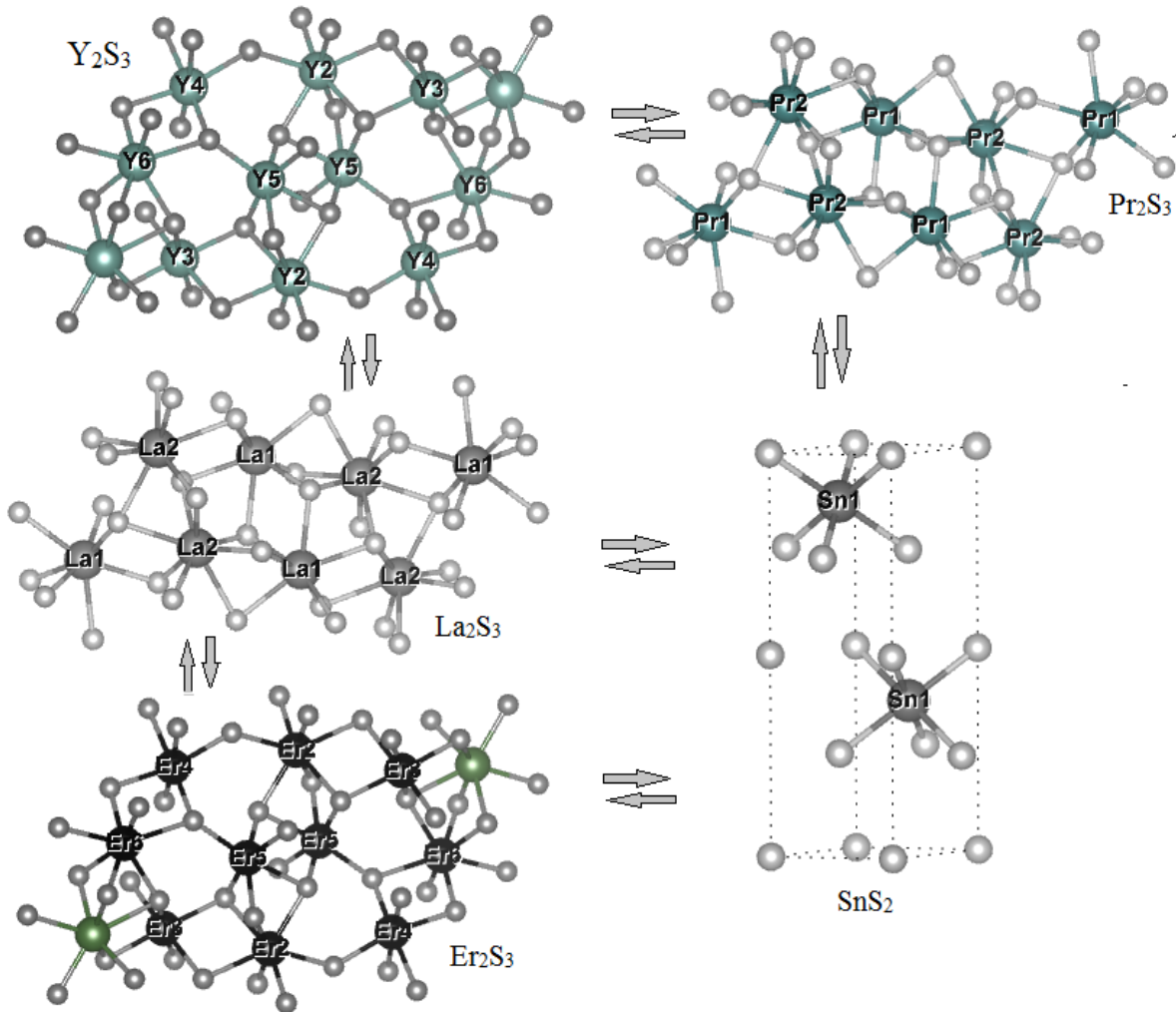
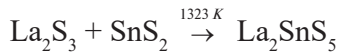


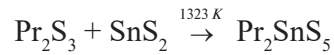
Рис. 3. Мотив організації атомів у структурах бінарних сполуках  
 SnS<sub>2</sub>, Y<sub>2</sub>S<sub>3</sub>, Er<sub>2</sub>S<sub>3</sub>, La<sub>2</sub>S<sub>3</sub>, Pr<sub>2</sub>S<sub>3</sub>

З метою більш детального аналізу кристалічної структури наведемо проєкції їх елементарних комірок, у яких включено координаційне оточення для катіонів.

Тернарна фаза  $\text{La}_2\text{SnS}_5$  утворюється на перерізі  $\text{La}_2\text{S}_3 - \text{SnS}_2$ . Сполука  $\text{La}_2\text{SnS}_5$  отримана за рахунок твердофазної хімічної реакції (синтез проводився у вакуумованих кварцевих ампулах до залишкового тиску  $10^{-2}$  Па):



Тернарна фаза  $\text{Pr}_2\text{SnS}_5$  утворюється на перерізі  $\text{Pr}_2\text{S}_3 - \text{SnS}_2$  і отримується в результаті твердофазного синтезу за температури 1323 К:



Комплекс проведених експериментальних досліджень дозволив побудувати ізотермічні перерізи квазіпотрійних систем  $\text{PbS}-\text{La}(\text{Pr})_2\text{S}_3-\text{Y}(\text{Er})_2\text{S}_3$  за температури 770 К.

У квазіпотрійних системах  $\text{PbS}-\text{La}(\text{Pr})_2\text{S}_3-\text{Y}(\text{Er})_2\text{S}_3$  синтезовано понад 60 зразків та проведено їх рентенофазовий аналіз, за його результатами побудовано ізотермічні перерізи за температури 770 К. Складний мотив організації атомів за температури 770 К не призводить до утворення нових тетрарних фаз.

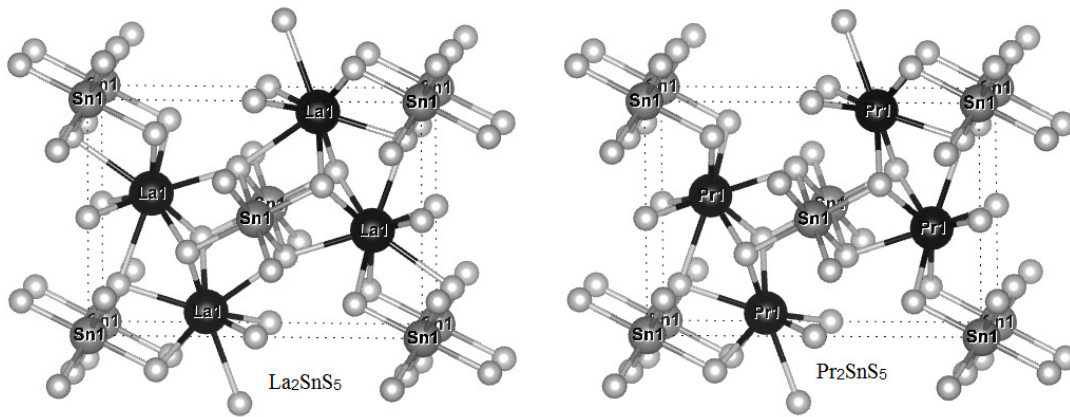


Рис. 4. Елементарна комірка та укладка атомів у сполуках  $\text{La}_2\text{SnS}_5$  та  $\text{Pr}_2\text{SnS}_5$

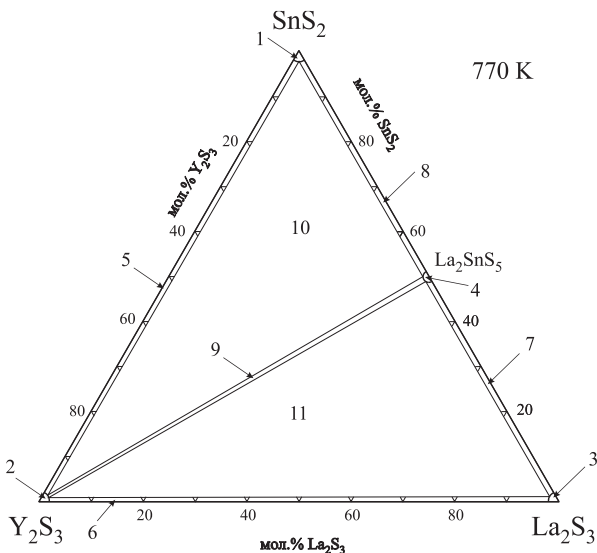


Рис. 5. Ізотермічний переріз системи  $\text{SnS}_2 - \text{Y}_2\text{S}_3 - \text{La}_2\text{S}_3$ : 1 –  $\text{SnS}_2$ ; 2 –  $\text{Y}_2\text{S}_3$ ; 3 –  $\text{La}_2\text{S}_3$ ; 4 –  $\text{La}_2\text{SnS}_5$ ; 5 –  $\text{SnS}_2 + \text{Y}_2\text{S}_3$ ; 6 –  $\text{Y}_2\text{S}_3 + \text{La}_2\text{S}_3$ ; 7 –  $\text{La}_2\text{S}_3 + \text{La}_2\text{SnS}_5$ ; 8 –  $\text{SnS}_2 + \text{La}_2\text{SnS}_5$ ; 9 –  $\text{Y}_2\text{S}_3 + \text{La}_2\text{SnS}_5$ ; 10 –  $\text{SnS}_2 + \text{Y}_2\text{S}_3 + \text{La}_2\text{SnS}_5$ ; 11 –  $\text{Y}_2\text{S}_3 + \text{La}_2\text{S}_3 + \text{La}_2\text{SnS}_5$ .

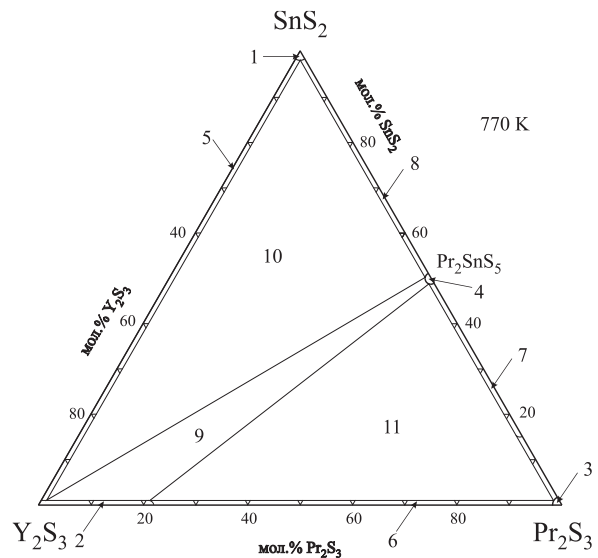
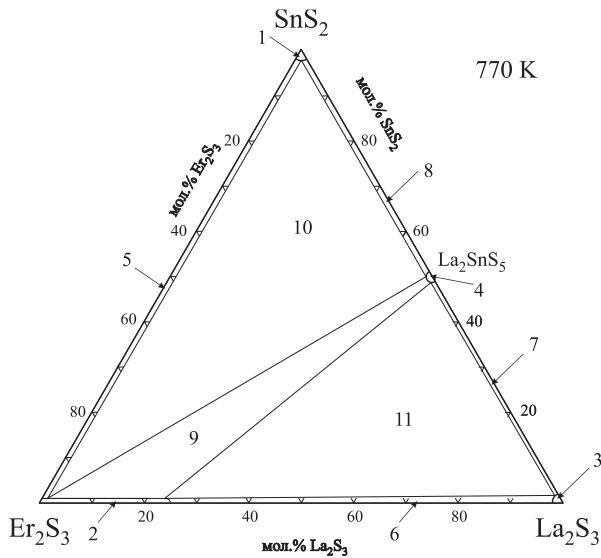
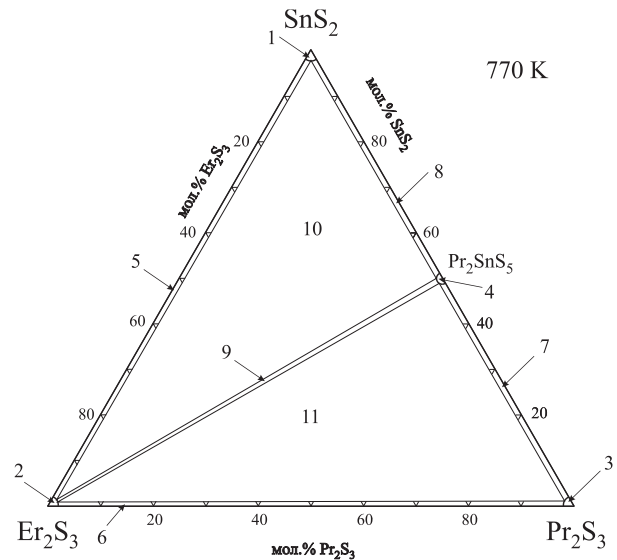


Рис. 6. Ізотермічний переріз системи  $\text{SnS}_2 - \text{Y}_2\text{S}_3 - \text{Pr}_2\text{S}_3$ : 1 –  $\text{SnS}_2$ ; 2 –  $\text{Y}_2\text{S}_3$ ; 3 –  $\text{Pr}_2\text{S}_3$ ; 4 –  $\text{Pr}_2\text{SnS}_5$ ; 5 –  $\text{SnS}_2 + \text{Y}_2\text{S}_3$ ; 6 –  $\text{Y}_2\text{S}_3 + \text{Pr}_2\text{S}_3$ ; 7 –  $\text{Pr}_2\text{S}_3 + \text{Pr}_2\text{SnS}_5$ ; 8 –  $\text{SnS}_2 + \text{Pr}_2\text{SnS}_5$ ; 9 –  $\text{Y}_2\text{S}_3 + \text{Pr}_2\text{SnS}_5$ ; 10 –  $\text{SnS}_2 + \text{Y}_2\text{S}_3 + \text{Pr}_2\text{SnS}_5$ ; 11 –  $\text{Y}_2\text{S}_3 + \text{Pr}_2\text{S}_3 + \text{Pr}_2\text{SnS}_5$ .





**Рис. 7. Ізотермічний переріз системи  $\text{SnS}_2 - \text{Y}_2\text{S}_3 - \text{La}_2\text{S}_3$ : 1 –  $\text{SnS}_2$ ; 2 –  $\text{Er}_2\text{S}_3$ ; 3 –  $\text{La}_2\text{S}_3$ ; 4 –  $\text{La}_2\text{SnS}_5$ ; 5 –  $\text{SnS}_2 + \text{Er}_2\text{S}_3$ ; 6 –  $\text{Er}_2\text{S}_3 + \text{La}_2\text{S}_3$ ; 7 –  $\text{La}_2\text{S}_3 + \text{La}_2\text{SnS}_5$ ; 8 –  $\text{SnS}_2 + \text{La}_2\text{SnS}_5$ ; 9 –  $\text{Er}_2\text{S}_3 + \text{La}_2\text{SnS}_5$ ; 10 –  $\text{SnS}_2 + \text{Er}_2\text{S}_3 + \text{La}_2\text{SnS}_5$ ; 11 –  $\text{Er}_2\text{S}_3 + \text{La}_2\text{S}_3 + \text{La}_2\text{SnS}_5$ .**



**Рис. 8. Ізотермічний переріз системи  $\text{SnS}_2 - \text{Er}_2\text{S}_3 - \text{Pr}_2\text{S}_3$ : 1 –  $\text{SnS}_2$ ; 2 –  $\text{Er}_2\text{S}_3$ ; 3 –  $\text{Pr}_2\text{S}_3$ ; 4 –  $\text{Pr}_2\text{SnS}_5$ ; 5 –  $\text{SnS}_2 + \text{Er}_2\text{S}_3$ ; 6 –  $\text{Er}_2\text{S}_3 + \text{Pr}_2\text{S}_3$ ; 7 –  $\text{Pr}_2\text{S}_3 + \text{Pr}_2\text{SnS}_5$ ; 8 –  $\text{SnS}_2 + \text{Pr}_2\text{SnS}_5$ ; 9 –  $\text{Er}_2\text{S}_3 + \text{Pr}_2\text{SnS}_5$ ; 10 –  $\text{SnS}_2 + \text{Er}_2\text{S}_3 + \text{Pr}_2\text{SnS}_5$ ; 11 –  $\text{Er}_2\text{S}_3 + \text{Pr}_2\text{S}_3 + \text{Pr}_2\text{SnS}_5$ .**

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. Kolobov A.V., Tominaga J., Chalcogenides: metastability and phase change phenomena. *Springer Science & Business Media*. 2012. vol. 164.
2. Fu L., Kane C.L., Mele E.J., Topological insulators in three dimensions, *Phys. Rev. Lett.* 2007. V.98.
3. Tritt T.M. Thermal Conductivity: Theory, Properties, and Applications. *Springer Science & Business Media*. 2005. P. 105-121.
4. Eggleton B.J., Luther-Davies B., Richardson K. Chalcogenide photonics. *Nat. Photon.* 2011. V.5. P. 141-148.
5. Mizuguchi Y., Takano Y. Review of Fe chalcogenides as the simplest Fe-based super-conductor. *J. Phys. Soc. Jpn.* 2010. V. 79.
6. Si Q., Yu R., Abrahams E. High-temperature superconductivity in iron pnictides and chalcogenides. *Nat. Rev. Mater.* 2016. V. 1.
7. Spaldin N.A. Magnetic Materials: Fundamentals and Applications. Cambridge University Press. 2010. Second edition.
8. Марчук О.В., Гулай Л.Д. Фазові рівноваги у системах  $\text{La}_2\text{X}_3 - \text{PbX} - \text{SiX}_2$  ( $\text{X} = \text{S}, \text{Se}$ ) за температури 770 К. *Наук. вісн. ВНУ, серія "Хімічні науки"*. 2012. № 17(242). С. 93-97.
9. Noda Y. Masumoto K., Ohba S. Temperature Dependence of Atomic Thermal Parameters of Lead Chalcogenides, PbS, PbSe and PbTe. *Acta Cryst.* 1987. V. 43. P. 1443-1445
10. Skums V.F., Pink R.L., Allasov M.R. Solid solutions of the PbSe – PbS system at high pressures. *Inorg. Materials (USSR)*. 1991. V. 27. P. 1336-1340
11. Schleid T., Lissner F. Einkristalle von A-Nd<sub>2</sub>S<sub>3</sub>, U-Ho<sub>2</sub>S<sub>3</sub>, D-Er<sub>2</sub>S<sub>3</sub> und E-Lu<sub>2</sub>S<sub>3</sub> durch Oxidation reduzierter Chloride der Lanthanide mit Schwefel. *Z. Anorg. Allg. Chem.* 1992.V. 615. P. 19–26
12. Schleid T., Lissner F. A-Pr<sub>2</sub>S<sub>3</sub>, D-Ho<sub>2</sub>S<sub>3</sub> und E-Yb<sub>2</sub>S<sub>3</sub>: Synthese und Einkristalluntersuchungen. *Z. Anorg. Allg. Chem.* 1968. V. 7. P. 2282–2288
13. Gulay L.D., Daszkiewicz M., Shemet V.Ya., Olekseyuk I.D. Crystal structure of the R<sub>6</sub>Pb<sub>2</sub>Se<sub>11</sub> (R = Y, Dy and Ho) compounds. *J. Alloys Compd.* 2005. V. 403. P. 206-210
14. Marchuk O.V., Gulay L.D., Shemet V.Ya., Olekseyuk I. D. Investigation of the Pr<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> – Cu<sub>2</sub>Se – PbSe and Pr<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> – Ag<sub>2</sub>Se – PbSe systems. *J. Alloys Compd.* 2006. V. 416. P. 106-109
15. Sharma R.C., Lin J.C., Chang Y.A. Metall. Trans. Data Base of Diagrams. *Inst. of Chem. Materials Problems*. 1999. V. 237. P. 1987
16. Okamoto H. Pr – S (Praseodymium – Sulfur). *J. Phase Equilib.* 1991. V. 12, № 5. P. 618-619.

17. Смітюх О.В., Марчук О.В., Олексеюк І.Д., Гулай Л.Д. Фазові рівноваги в системі  $PbS - Er_2S_3 - Pr_2S_3$  за температури 770 К. Матеріали XIV всеукраїнської конференції молодих вчених та студентів з актуальних питань сучасної хімії. Дніпропетровськ: 24-26 травня 2016 р., Маторина К.В. Дніпропетровськ: ЛІРА, 2016. С. 90.

18. Zintl E., Loosen K. Siliciumdisulfid, ein anorganischer Faserstoff mit Kettenmolekuelen. *Z. Phys. Chem*, 1935. Vol. 174, pp. 301-311.

#### REFERENCES:

1. Kolobov, A.V., Tominaga, J. (2012). Chalcogenides: metastability and phase change phenom-ena. *Springer Science & Business Media*. vol. 164 [in English].

2. Fu, L., Kane, C.L., Mele, E.J. (2007). Topological insulators in three dimensions, *Phys. Rev. Lett.* V. 98 [in English].

3. Tritt, T.M. (2005). Thermal Conductivity: Theory, Properties, and Applications. *Springer Science & Business Media*, 105-121 [in English].

4. Eggleton, B.J., Luther-Davies, B., Richardson, K. (2011). Chalcogenide photonics. *Nat. Photon*, 5, 141-148 [in English].

5. Mizuguchi, Y., Takano, Y. (2010). Review of Fe chalcogenides as the simplest Fe-based super-conductor. *J. Phys. Soc. Jpn*, 79 [in English].

6. Si, Q., Yu, R., Abrahams, E. (2016). High-temperature superconductivity in iron pnictides and chalcogenides. *Nat. Rev. Mater*, 1 [in English].

7. Spaldin, N.A. (2010). Magnetic Materials: Fundamentals and Applications. *Cambridge University Press*. Second edition [in English].

8. Marchuk, O.V., Hulai, L.D. (2012). Fazovi rivnovahy u systemakh  $La_2X_3 - PbX - SiX_2$  (X – S, Se) za temperatury 770 K. *Nauk. visn. VNU, seriya "Khimichni nauky"*. 17(242). 93–97 [In Ukrainian].

9. Noda, Y. Masumoto, K., Ohba, S. (1987) Temperature Dependence of Atomic Thermal Parameters of Lead Chalcogenides,  $PbS$ ,  $PbSe$  and  $PbTe$ . *Acta Cryst.* 43. 1443-1445 [in English].

10. Skums, V.F., Pink, R.L., Allasov, M.R. (1991). Solid solutions of the  $PbSe - PbS$  system at high pressures. *Inorg. Materials (USSR)*. 27. 1336-1340 [in English].

11. Schleid, T., Lissner, F. (1992) Einkristalle von  $A-Nd_2S_3$ ,  $U-Ho_2S_3$ ,  $D-Er_2S_3$  und  $E-Lu_2S_3$  durch Oxidation reduzierter Chloride der Lanthanide mit Schwefel. *Z. Anorg. Allg. Chem*, 615, 19-26 [in English].

12. Schleid, T., Lissner, F. (1968).  $A-Pr_2S_3$ ,  $D-Ho_2S_3$  und  $E-Yb_2S_3$ : Synthese und Einkristalluntersuchungen. *Z. Anorg. Allg. Chem*, 7, 2282-2288 [in English].

13. Gulay, L.D., Daszkiewicz, M., Shemet, V.Ya., Olekseyuk, I.D. (2005). Crystal structure of the  $R_6Pb_2Se_{11}$  (R = Y, Dy and Ho) compounds. *J. Alloys Compd*, 403, 206-210 [in English].

14. Marchuk, O.V., Gulay, L.D., Shemet, V.Ya., Olekseyuk, I.D. (2006). Investigation of the  $Pr_2Se_3 - Cu_2Se - PbSe$  and  $Pr_2Se_3 - Ag_2Se - PbSe$  systems. *J. Alloys Compd*, 416, 106-109 [in English].

15. Sharma, R.C., Lin, J.C., Chang, Y.A. (1999). Metall. Trans. Data Base of Diagrams. *Inst. of Chem. Materials Problems*, 237, 1987 [in English].

16. Okamoto H. (1991). Pr – S (Praseodymium – Sulfur). *J. Phase Equilib.* V. 12, 5. 618-619 [in English].

17. Smitiukh, O.V., Marchuk, O.V., Olekseiuk, I.D., Hulai, L.D. (2016) *Fazovi rivnovahy v systemi  $PbS - Er_2S_3 - Pr_2S_3$  za temperatury 770 K. Materialy XIV vseukrainskoi konferentsii molodykh vchenykh ta studentiv z aktualnykh pytan suchasnoi khimii. Dnipropetrovsk: 24-26 travnia [Phase equilibria in the system  $PbS - Er_2S_3 - Pr_2S_3$  at a temperature of 770 K. Proceedings of the XIV All-Ukrainian Conference of Young Scientists and Students on topical issues of modern chemistry. Dnipropetrovsk: May 24-26]*, Matoryna K. V. D.: LIRA, 2016. S. 90. [in Ukrainian].

18. Zintl E., Loosen K. (1935). Siliciumdisulfid, ein anorganischer Faserstoff mit Kettenmolekuelen. *Z. Phys. Chem*, 174, 301-311 [in German].