



УДК 553.411: 549.08

**Н.А. Зимановская**Восточно-Казахстанский государственный технический университет им. Д. Серикбаева,  
г. Усть-Каменогорск**НАНОЗОЛОТО В УГЛЕРОДИСТО-ЗОЛОТОСУЛЬФИДНЫХ РУДАХ  
МЕСТОРОЖДЕНИЯ БАКЫРЧИК**

В Западно-Калбинском рудном поясе углеродисто-золотосульфидный тип оруденения (бакырчикский) фиксируется в среднегерцинском коллизионном рудоносном уровне ( $C_2$ - $C_3$ ), объединяющем молассовые лимнические толщи буконьской свиты ( $C_{2-3}$ ). В состав уровня входят наземные сероцветные молассы, флювиолимнические и болотные углеродистые черносланцевые литофации, являющиеся благоприятной рудовмещающей средой для концентрации золотого оруденения. Здесь находится одно из крупных месторождений «черносланцевого» типа мирового уровня Бакырчик, описанное в ряде публикаций (Большой Алтай, 2000; Малыгин, Дьячков, 2000; Бакырчик, 2001; Рафаилович, ВострокнUTOва, 2003; Рафаилович, Мизерная, Дьячков, 2011 и др.). Рудовмещающие углеродистые отложения выполняли роль промежуточного коллектора тонкодисперсного металла в области его дальнего переноса [1]. Там, где синседиментационному процессу сопутствовало внедрение малых интрузий и даек плагиогранит-гранодиоритового состава кунушского комплекса ( $C_3$ ), происходило ремобилизационное накопление металла в отдельных горизонтах, дополнительный привнос и формирование оруденения золото-мышьяково-углеродистого состава (бакырчикский тип). Главное отличие заключается в источнике металла, который в месторождениях имеет двойственную природу - осадочно-диагенетическую и гидротермально-ремобилизационную [13].

В размещении золотосульфидных месторождений особую роль играли субширотные зоны смятия и разрывные дислокации, разбивающие регион на серию ступенчатых блоков. Субширотные разломы входят в систему трансрегионального Кызыловско-Серебрянского линиямента, прослеженного В.Н. Любецким в геофизических полях от Горного Алтая до Чингиза. К Кызыловской зоне смятия широтного направления приурочены гигантский Бакырчикский рудный район и само месторождение Бакырчик (рис. 1).

Руды Бакырчика содержат пирит-пирротиную, карбонатно-железистую (сидерит, анкерит) и фосфатную минерализацию. Характерны тектоно-гравитационные микститы – грубокластические, несортированные и нестратифицированные комплексы пород, обломки которых (песчаники, алевролиты, сланцы) сцементированы углисто-глинистым материалом, игравшим роль коллектора и геохимического барьера в формировании и распределении золотой минерализации [1]. В суммарном балансе золота ведущую роль играет прожилково-вкрапленная золотопирит-арсенопиритовая ассоциация (пирит -  $1,5 \div 22,0$  %, арсенопирит -  $3,0 \div 15,0$  %). На верхних горизонтах пирит преобладает над арсенопиритом (соотношение 3,5:1), на средних и глубоких пирит имеет подчиненное развитие (1:3) [12]. Самородное золото имеет пленочную, капельную, шаровую, амeboобразную, комковую, дендритовую, прожилковую формы [12]. Преобладают нано- и субмикроскопические пы-

ле- и амебовидные выделения золота в пирите и арсенопирите.

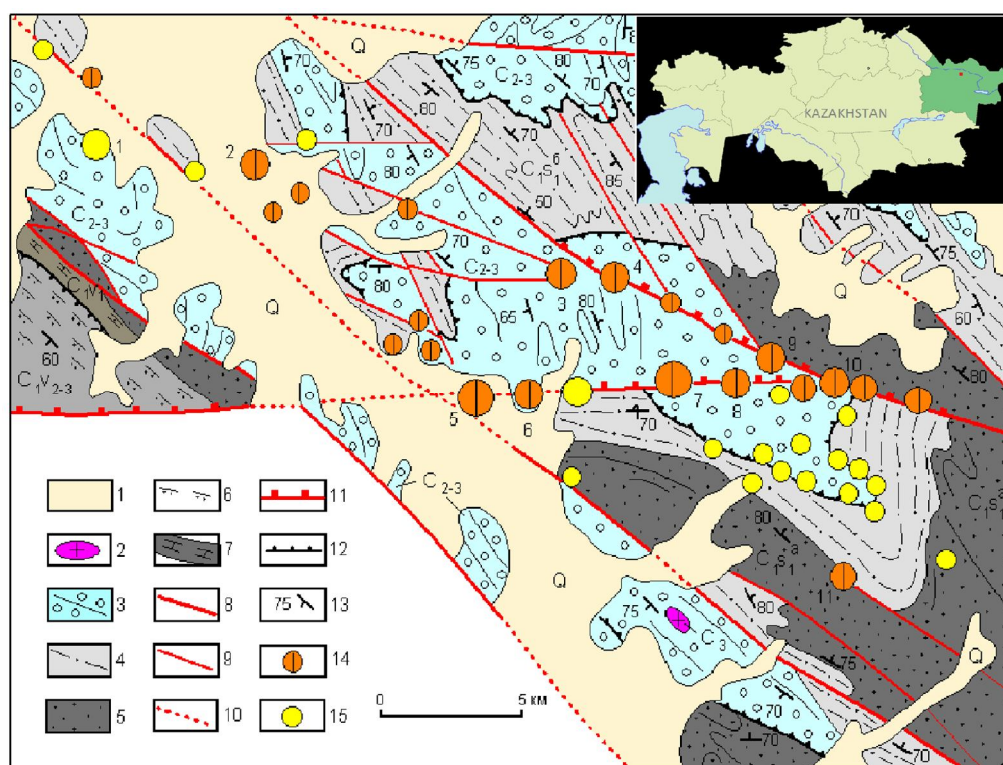


Рисунок 1 - Геологическая карта Бакырчикского рудного поля (с использованием материалов В.И. Тихоненко): 1 – четвертичные отложения; 2-7 – геологические формации: 2 – плагиогранит-гранодиоритовая,  $C_3$ , 3 – молассовая лимническая углеродистая,  $C_{2-3}$ , 4, 5 – граувакковая алевролитно-песчаниковая,  $C_{1s}$  (4 – верхняя песчаниково-алевролитовая и 5 – нижняя песчаниковая подформации), 6 – флишеидная углеродисто-известкисто-терригенная,  $C_{1V_{2-3}}$ , 7 – известняково-песчаниково-алевролитовая,  $C_{1V_1}$ ; 8-11 – разрывные нарушения (8 – глубокие, 9 – мелкие разрывы, 10 – под рыхлыми отложениями, 11 – рудоконтролирующие); 12 – надвиги; 13 – элементы залегания; 14-15 – рудные формации (14 – золотомышьяково-углеродистая, 15 – золотокварцевая). Месторождения: 1 – Эспе, 2 – Костобе, 3 – Дальний I, 4 – Дальний, 5 – Большевик, 6 – Челобай, 7 – Бакырчик, 8 – Глубокий Лог, 9, 10 – Промежуточное, 11 – Бижан

Для создания эффективных технологий извлечения тонкодисперсного (упорного) золота необходима минералогическая информация о рудах и слагающих их минералах, в частности о формах нахождения тонкодисперсного золота и характере его локализации в минералах, а также особенностях состава и строения непосредственно золотосодержащих минералов [3]. Поэтому объектами исследования и явились золотосодержащие сульфиды месторождения Бакырчик.

Изучение нанозолота в углеродисто-золотосульфидных рудах месторождения Бакырчик происходило стадийно, по опыту проведения подобных работ. Во-первых, были выбраны образцы, в которых с наибольшей вероятностью следует ожидать присутствие нанозолота. При этом принимались во внимание формационный тип, возраст оруденения, минеральный и химический состав исследуемых руд.

На следующем этапе осуществлялось непосредственное наблюдение наночастиц золо-

та в сканирующем электронном микроскопе (JSM-6390LV производства японской фирмы JEOL с приставкой энергодисперсионного анализа INCA Energy фирмы OXFORD Instruments). Нами показано, что данная задача вполне корректно решается с применением увеличений порядка 100-300 тысяч раз, что позволяет надежно различать отдельные наночастицы золота размером до 100-80 нм (рис. 2). На данном уровне может быть охарактеризована морфология наночастиц золота и их агрегатов, а также определен гранулометрический состав [10].

На следующей стадии методами высокоразрешающей просвечивающей электронной микроскопии исследовались кристаллы пирита и арсенопирита, отобранные вручную с помощью бинокулярного стереоскопического микроскопа из гравитационного концентрата. Затем они дезинтегрировались в порошок вручную в агатовой ступке, полученный порошок наносился на углеродную пленку-подложку на медной сетке. Исследования проводились в лаборатории «IPGETAC» ВКГТУ им. Д. Серикбаева, на просвечивающем электронном микроскопе высокого разрешения JEM-2100 (JEOL Ltd., Япония) при ускоряющем напряжении 200 кВ.

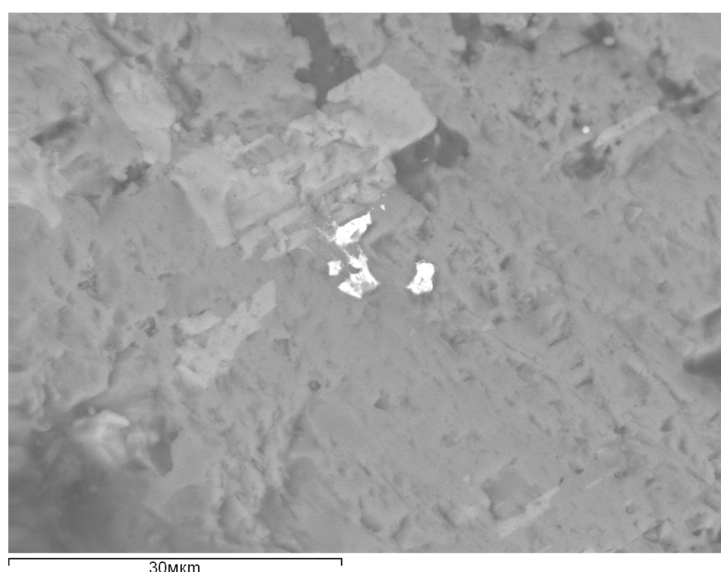


Рисунок 2 - РЭМ- изображение золота (белое) в мышьяковистом пирите (серое) месторождения Бакырчик (проба Л-71)

В рудах месторождения Бакырчик присутствует золото разного размера, ассоциирующее как с сульфидными, так и породообразующими минералами. Видимое золото приурочено в основном к межзерновому пространству, микротрещинам и микродислокационным нарушениям в минералах, имеет округлую изометричную и неправильную форму. Распространение его ограничено. Более широким распространением пользуется тонкодисперсное золото, максимальное содержание которого отмечается в продуктивной минеральной ассоциации, главными рудными минералами которой являются пирит и арсенопирит.

Для золотоносного арсенопирита наиболее характерен тонкоигольчатый и удлиненно-призматический облик кристаллов (рис. 3) и отклонение от стехиометрии кристаллической решетки. Золотоносные пириты имеют пентагондодекаэдрический габитус, который сменяется в слабозолотоносных разностях пентагондодекаэдрами с развитием граней ку-

ба, меньше всего золота в кубической форме [6].

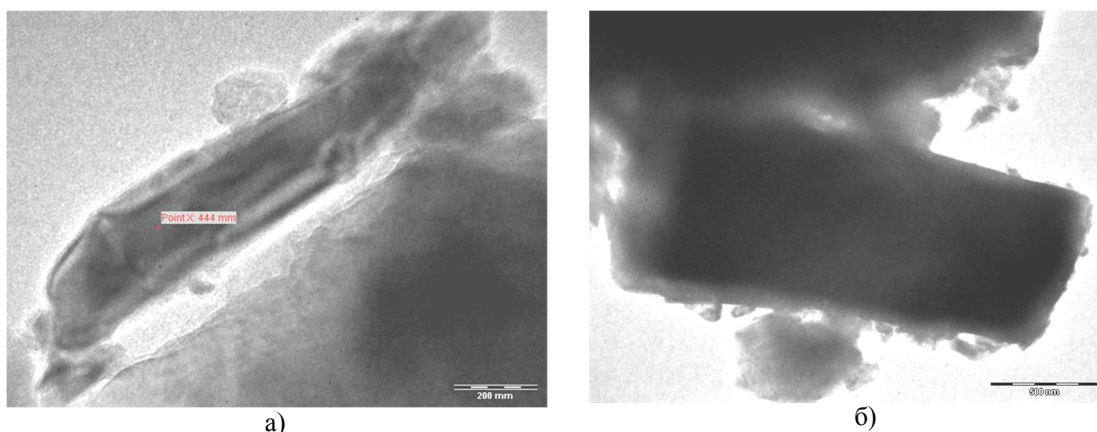


Рисунок 3 - Изображение игольчатого (а) и удлиненно-призматического (б) арсенопирита, просвечивающий электронный микроскоп (ПЭМ)

Еще важной особенностью является присутствие нанозолота в мышьяковистом пирите. Содержание As в золотоносном пирите составляет от 1,2 до 4 % (табл., рис. 2).

Таблица  
*Химический состав золотоносного пирита месторождения Бақырчик*

№ пробы	Содержание, масс. %			
	Fe	S	As	Ag
Л-71(сульфидная руда)	26,15	32,77	2,02	1,12
	22,57	29,76	1,26	1,89
Л-67(Концентрат основной флотации)	19,84	17,01	1,79	
	40,95	46,36	3,12	
	33,23	64,84	1,86	0,02
	45,72	50,04	4,05	0,05
	45,09	50,68	2,89	0,05
	45,40	50,96	2,68	0,04
	44,59	49,94	3,35	0,06
	44,75	50,64	2,44	0,06
Tva 96 (мономинеральная фракция)	41,15	54,31	2,32	
Tva 98 (мономинеральная фракция)	56,93	36,48	3,72	

Локализация золота связана с дефектами кристаллической структуры – дислокациями, границами зерен, двойниковыми и межфазными границами. Дефекты приводят к искажению решетки, при этом в области дефекта чаще всего межатомные расстояния увеличены, что облегчает диффузионный сток атомов золота в эти области как элемента, обладающего большим размерным фактором (рис. 4) [2].

Результаты исследования позволяют сделать заключение, что дефектная подсистема сульфидов является местом локализации золота в различных формах, часть из которых может быть в трудноизвлекаемой форме для существующих технологий. Проведенные исследования целесообразно учитывать при дальнейшей оценке перспектив Бақырчик-

ского месторождения.

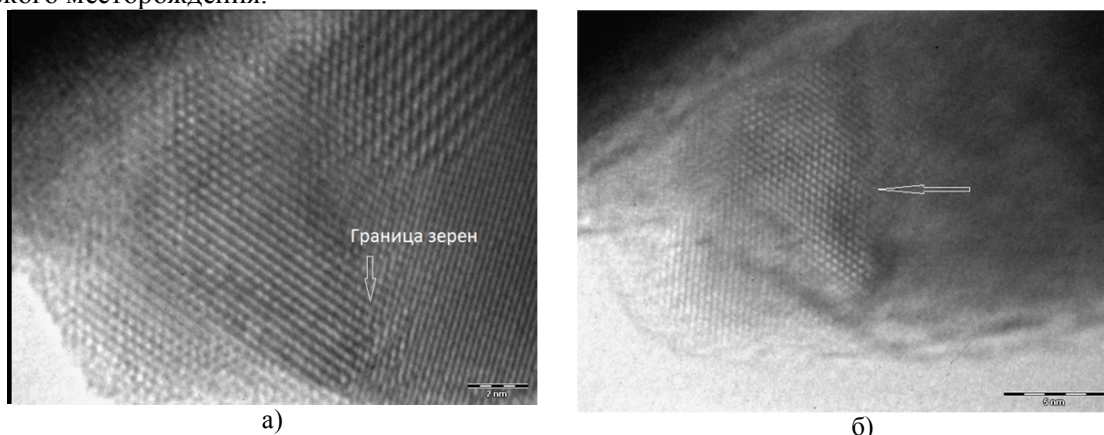


Рисунок 4 - ПЭМ - изображения наночастиц: а) в арсенопирите; б) пирите

#### Список литературы

1. Нарсеев В.А. Бакырчик (Геология, геохимия, оруденение) / В.А. Нарсеев, Ю.В. Гостев, А.В. Захаров и др.; Отв. Ред. В.А. Нарсеев. - М.: ЦНИИГРИ, 2001. - 174 с.
2. Гавриленко О.Д. Дефектная структура природного минерала арсенопирита / О.Д. Гавриленко, С.Я. Мисевра, Н.А. Зимановская и др. // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. - 2013. - № 4(10). - С. 517-522.
3. Касперская А.А. К вопросу переработки упорных сульфидных руд / А.А. Касперская, Е.Ю. Ван, Н.Г. Серба и др. // Тр. XI Междунар. конф. «Ресурсовоспроизводящие, малоотходные и природоохранные технологии освоения недр». - 2012. - С. 186-187.
4. Конеев Р.И. Наноминералогия золота эпitherмальных месторождений Чаткало-Кураминского региона (Узбекистан). - СПб.: DELTA, 2006. - 220 с.
5. Левин Г.В. О связи золота и мышьяка в рудах из минерализованных зон Калбы / Г.В. Левин, В.А. Нарсеев // Вопросы геол. методов разведки местор. тверд. полезн. ископ. Казахстана. - Алма-Ата: КазИМС, 1968. - Вып. 1. - С. 105-115.
6. Марченко Л.Г. Генезис и минеральные ассоциации золота и платиноидов в месторождениях «черносланцевых» типа Казахстана: Дис. ... д-ра геол.-мин. наук. - СПб., 2011. - 242 с.
7. Моисеенко В.Г. Условия формирования сфероидальных наночастиц золота / В.Г. Моисеенко, Е.Н. Кулик // Доклады АН. - Т. 431. - № 1. - 2010. - С. 91-94.
8. Наноминералогия. Ультра- и микродисперсное состояние минерального вещества. - СПб.: Наука, 2005. - 581 с.
9. Ожогин Д.О. Наноминералогические особенности пирита месторождения Сухой Лог (Иркутская область) / Д.О. Ожогин, Л.П. Викулова // Доклады VIII Междунар. конф. «Новые идеи в науках о Земле». - М., 2007. - Т.3. - С. 224-225.
10. Осовецкий В. М. Наноскульптура поверхности золота. - Пермь: Пермский госуниверситет, 2012. - 232 с.
11. Рафаилович М.С. Крупные месторождения золота в черносланцевых толщах: условия формирования, признаки сходства / М.С. Рафаилович, М.А. Мизерная, В.А. Дьячков. - Алматы, 2011. - 271 с.
12. Рафаилович М.С. Золоторудные гиганты в углеродисто-терригенных отложениях Центральной и Северной Азии // Геология и охрана недр. - 2008. - № 2. - С. 31-40.
13. Проведение научного обоснования региональных и локальных критериев прогноза и поиска новых золоторудных месторождений апокربонатного типа в рудоносных структурах Западной Калбы и Чарской зоны: отчет о НИР (заключительный) // ВКГТУ. - В.А. Дьячков, М.С. Рафаилович, Н.А. Зимановская и др. - Усть-Каменогорск, 2013. - 99 с.
14. Cook N., Chrysosoulis S. Concentration of «invisible» gold in the common sulfides // Canad/ Mineralogist. 1990. V.28. P. 1-16.
15. Wu X., Delbove F. Hydrothermal synthesis of gold-bearing arsenopyrite // Econ. Geol. - 1989. - V. 84. - № 7. - P. 2029-2032.
16. Marin I.B. Nanomineralogia und Perspektiven für die Erschließung neuer Lagerstatentypen // Geingenieurwesen 531. - Freiberg. - 2009. - С. 38-42.
17. Hough R.M., Noble R.R.P., Reich M. Natural gold nanoparticles // Ore Geology Re-

Получено 27.01.2014

УДК 669.884.(574)

**Ж.С. Онолбаева, В.И. Самойлов**

Восточно-Казахстанский государственный технический университет им. Д. Серикбаева,  
г. Усть-Каменогорск

**ОЦЕНКА ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК БАВЕНИТА, ЯДАРИТА, ХОЛМКВИСТИТА,  
БИТИИТА И ИХ РЕАКЦИОННОЙ СПОСОБНОСТИ**

В гидрометаллургии бериллия и лития сырьевая база ограничена одним-двумя силикатами, что является недостатком данных производств [1]. Кроме того, в настоящее время практически отсутствуют термодинамические характеристики силикатов бериллия, силикатов лития и комплексных бериллийлитиевых силикатов. Отсутствие данных характеристик затрудняет рациональный подход к выбору минерально-сырьевых источников бериллия и лития. Авторами работы [2] предпринята попытка решить данную проблему.

Данная статья посвящена расчёту основных термодинамических характеристик силикатов бериллия, силикатов лития и комплексных бериллийлитиевых силикатов, а именно: энергии Гиббса образования ( $\Delta G_{f(298)}^\circ$ ), энтальпии образования ( $\Delta H_{f(298)}^\circ$ ), энтропии образования ( $\Delta S_{f(298)}^\circ$ ) и энтропии ( $S_{298}^\circ$ ) этих силикатов. Указанные характеристики ранее были рассчитаны применительно к следующим силикатам [2]: ловдарит –  $\text{Na}_2(\text{BeSi}_3\text{O}_8) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , лейфит –  $\text{Na}_5\text{BeAl}_4\text{Si}_{12}\text{O}_{33}\text{F} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ , соренсенит –  $\text{Na}_4\text{Sn}(\text{Be}_2\text{Si}_6\text{O}_{16})(\text{OH})_4$ , туктупит –  $\text{Na}_4\text{BeAlSi}_4\text{O}_{12}\text{Cl}$ , калькибеборосит –  $\text{CaY}[\text{BeBSi}_2\text{O}_8(\text{OH})_2]$ , гарстигит –  $\text{MnCa}_6\text{Be}_4(\text{SiO}_4)_2(\text{Si}_2\text{O}_7)_2(\text{OH})_2$ , лейкофан –  $\text{NaCaBeSi}_2\text{O}_6\text{F}$ , бреннокит –  $\text{KLi}_3\text{Sn}_2\text{Si}_{12}\text{O}_{30}$ , соколовайт –  $\text{CsLi}_2\text{AlSi}_4\text{O}_{10}\text{F}_2$ , пеццотаит –  $\text{Cs}(\text{Be}_2\text{Li})\text{Al}_2(\text{Si}_6\text{O}_{18})$ . В данной статье рассчитаны основные термодинамические характеристики бавенита –  $\text{Ca}_4(\text{Be}_2\text{Al}_2\text{Si}_9\text{O}_{26})(\text{OH})_2$ , ядарита –  $\text{LiNaSiB}_3\text{O}_7(\text{OH})$ , холмквистита –  $\text{Li}_3\text{Mg}_3\text{Al}_2(\text{Si}_8\text{O}_{22})(\text{OH})_2$ , битиита –  $\text{CaLiAl}_2(\text{Si}_2\text{BeAl})\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ , указанных в источниках [3-5]. Кроме того, рассчитанные значения энергии Гиббса образования указанных силикатов использованы для расширения известных по работам [6, 7] рядов возрастания реакционной способности силикатов.

В данной работе использован приближённый метод расчёта  $\Delta G_{f(298)}^\circ$  указанных минералов, исходя из характеристик силикатных комплексов бериллия, лития и др.; расчёты  $\Delta G_{f(298)}^\circ$  выполнены путём суммирования данных о термодинамических характеристиках силикатных комплексов с учётом их стехиометрических коэффициентов в минерале, например для бавенита:

$$\Delta G_{f(298)}^\circ / \text{Ca}_4[\text{Be}_2\text{Al}_2\text{Si}_9\text{O}_{26}](\text{OH})_2 = \Delta G_{f(298)}^\circ / \text{Be}_2[\text{SiO}_4] + 2 \Delta G_{f(298)}^\circ / \text{Ca}_2(\text{SiO}_4) + \\ + \Delta G_{f(298)}^\circ / \text{Al}_2\text{O}_3 + 6 \Delta G_{f(298)}^\circ / \text{SiO}_2 + \Delta G_{f(298)}^\circ / \text{H}_2\text{O}.$$

С использованием указанного приближённого метода и справочных данных [8-11] определено значение  $\Delta G_{f(298)}^\circ$  для бавенита -13361,9 кДж/моль, и для остальных представленных выше силикатов (табл. 1). Там же приведены известные по работам [2, 6, 7] величины  $\Delta G_{f(298)}^\circ$ , а также  $S_{298}^\circ$ ,  $\Delta S_{f(298)}^\circ$  и  $\Delta H_{f(298)}^\circ$  - для других силикатов.

Далее были рассчитаны и приведены в табл. 1 величины энтропии для указанных вы-



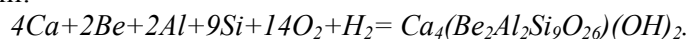
ше силикатов  $S_{298}^{\circ}$ . Для расчёта использован метод Латимера [8] – наиболее распространённый метод приближённого расчёта энтропии кристаллических соединений, основанный на принципе аддитивности. В соответствии с методом Латимера, энтропию соединения рассчитывают через энтропию аниона данного соединения; энтропия аниона, в свою очередь, определяется средней величиной зарядов положительных ионов соединения.

Например, для бавенита  $[\text{Ca}_4(\text{Be}_2\text{Al}_2\text{Si}_9\text{O}_{26})(\text{OH})_2]$  энтропия его комплексных анионов  $([\text{Si}_4\text{O}_{11}](\text{OH})_2)^{2-}$  и  $(\text{SiO}_3)^{2-}$  равна 312,3 Дж/(моль·К) и 46,9 Дж/(моль·К) соответственно [8]. Энтропия бавенита  $S_{298}^{\circ}$ , рассчитанная с использованием метода Латимера и справочных данных [8], определена следующим образом:

$$S_{298}^{\circ} = 4 S_{298}^{\circ}(\text{Ca}) + 2 S_{298}^{\circ}(\text{Be}) + 2 S_{298}^{\circ}(\text{Al}) + S_{298}^{\circ}([\text{Si}_4\text{O}_{11}](\text{OH})_2)^{2-} + 5 S_{298}^{\circ}(\text{SiO}_3)^{2-},$$
$$S_{298}^{\circ} = 0,81 \text{ кДж}/(\text{моль} \cdot \text{К}).$$

По аналогии определены величины  $S_{298}^{\circ}$  для других изученных ранее и изучавшихся в данной работе силикатов (табл. 1).

Стандартная энтропия образования бавенита  $\Delta S_{f(298)}^{\circ}$  определена с использованием уравнения реакции:



После подстановки вычисленного значения энтропии бавенита  $S_{298}^{\circ}$  и справочных данных [8] в выражение:

$$\Delta S_{f(298)}^{\circ} = S_{298}^{\circ} - 4 S_{298}^{\circ}(\text{Ca}) - 2 S_{298}^{\circ}(\text{Be}) - 2 S_{298}^{\circ}(\text{Al}) - 9 S_{298}^{\circ}(\text{Si}) - 14 S_{298}^{\circ}(\text{O}_2) - S_{298}^{\circ}(\text{H}_2),$$
$$\Delta S_{f(298)}^{\circ} = -2,6 \text{ кДж}/(\text{моль} \cdot \text{К}).$$

Аналогичным образом определены величины  $\Delta S_{f(298)}^{\circ}$  для других изученных ранее и изучавшихся в данной работе силикатов (табл. 1).

Величина энтальпии образования бавенита  $\Delta H_{f(298)}^{\circ}$  при стандартной температуре ( $T=298 \text{ К}$ ) рассчитана с использованием уравнения Гиббса-Гельмгольца:

$$\Delta G_{f(298)}^{\circ} = \Delta H_{f(298)}^{\circ} - T \Delta S_{f(298)}^{\circ}.$$

После подстановки в данное уравнение рассчитанных значений энергии Гиббса образования бавенита  $\Delta_f G_{(298)}^{\circ}$  и энтропии образования бавенита  $\Delta S_{f(298)}^{\circ}$  найдена величина энтальпии образования бавенита, равная 14136,7 кДж/моль (табл. 1).

Аналогичным образом рассчитаны и представлены в табл. 1 значения  $S_{298}^{\circ}$ ,  $\Delta S_{f(298)}^{\circ}$ ,  $\Delta H_{f(298)}^{\circ}$  для других силикатов, изученных ранее, а также в данной работе.

Сравнительный анализ рассчитанных в работе [7] термодинамических характеристик отдельных силикатов (фенакита,  $\alpha$ -сподумена, эвкриптита) и их известных (справочных) значений показывает, что они достаточно близки. Отклонения рассчитанных значений от справочных не превышает 8 % [7].

В дальнейшей работе рассчитанные значения  $\Delta G_{f(298)}^{\circ}$  силикатов (табл. 1) использованы для оценки их реакционной способности. Поиск корреляции между энергией образования силикатов бериллия и их химической стойкостью по отношению к реагентам является актуальной задачей в гидрометаллургии бериллия. Решение данной задачи позволяет прогнозировать относительное поведение таких соединений в процессе их перера-

---

ботки и удешевить процесс вскрытия сырья за счёт использования наименее химически стойких силикатов.



Таблица 1

Известные и рассчитанные (выделены) стандартные термодинамические характеристики силикатов

Силикат	$-\Delta G_{f(298)}^{\circ}$ , кДж/моль	$S_{298}^{\circ}$ , Дж/(моль·К)	$-\Delta S_{f(298)}^{\circ}$ , кДж/(моль·К)	$-\Delta H_{f(298)}^{\circ}$ , кДж/моль	Уравнения, использованные для расчёта $\Delta G_{f(298)}^{\circ}$
Ловларит	1793,9	-	-	-	$\text{Be}_2(\text{SiO}_4) + 4\text{H}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{SiO}_3 + \text{Na}_2\text{O} = 2\text{Na}_2(\text{BeSi}_3\text{O}_8) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
Лейфит	8304,2	-	-	-	$4\text{NaAlO}_2 + \text{NaF} + 0,5\text{Be}_2(\text{SiO}_4) + 5\text{H}_2\text{O} + 11,5\text{SiO}_2 =$ $= \text{Na}_3\text{BeAl}_4\text{Si}_{12}\text{O}_{33}\text{F} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$
Чкаловит	1571,3 [6]	-	-	-	$\text{Be}_2(\text{SiO}_4) + 2\text{Na}_2\text{SiO}_3 + \text{SiO}_2 = 2\text{Na}_2(\text{BeSi}_2\text{O}_6)$
Соренсенит	6001,2	-	-	-	$\text{Sn}(\text{OH})_4 + 2\text{Na}_2\text{SiO}_3 + 3\text{SiO}_2 = \text{Na}_4\text{Sn}(\text{Be}_2\text{Si}_6\text{O}_{16})(\text{OH})_4$
Бериллит	5585,0 [6]	342,4 [6]	1,599 [6]	6058,8 [6]	$2\text{Be}_2(\text{SiO}_4) + \text{BeO} + 4\text{H}_2\text{O} = \text{Be}_3(\text{Si}_2\text{O}_7)(\text{OH})_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
Эвклидит	2958,6 [6]	-	-	-	$\text{Be}_2(\text{SiO}_4) + \text{Na}_2\text{SiO}_3 + 4\text{SiO}_2 + \text{H}_2\text{O} = \text{Na}(\text{BeSi}_3\text{O}_7)(\text{OH})$
Даналит	5210,3 [5]	330,9 [6]	1,125 [6]	5545,5 [6]	$3\text{Be}_2(\text{SiO}_4) + 2\text{FeS} + 3\text{Fe}_2\text{SiO}_4 = \text{Fe}_4(\text{BeSiO}_4)_3\text{S}$
Сферобертрандит	5111,0 [6]	263,8 [6]	1,211 [6]	5471,6 [6]	$2\text{Be}_2(\text{SiO}_4) + \text{BeO} + 2\text{H}_2\text{O} = \text{Be}_3(\text{Si}_2\text{O}_7)(\text{OH})_4$
Туктупит	5341,0	463,8	1,190	5695,6	$\text{Be}_2(\text{SiO}_4) + 2\text{NaCl} + \text{Na}_2\text{SiO}_3 + 2\text{NaAlO}_2 + \text{Na}_2\text{O} + 6\text{SiO}_2 =$ $= 2\text{Na}_4\text{BeAlSi}_4\text{O}_{12}\text{Cl}$
Миларит	11594,4 [6]	744,9 [6]	2,871 [6]	12449,7 [6]	$2\text{Be}_2(\text{SiO}_4) + 4\text{CaSiO}_3 + 2\text{K}(\text{AlSiO}_2\text{O}_6) + 14\text{SiO}_2 + \text{H}_2\text{O} =$ $= \text{KCa}_2\text{AlBe}_2(\text{Si}_{12}\text{O}_{30}) \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$
Гентельвин	5537,7 [5]	339,3 [6]	1,175 [6]	5887,8 [6]	$3\text{Be}_2(\text{SiO}_4) + 2\text{ZnS} + 3\text{Zn}_2\text{SiO}_4 = \text{Zn}_4(\text{BeSiO}_4)_3\text{S}$
Гельвин	5661,1 [5]	329,3 [6]	1,147 [6]	6002,9 [6]	$3\text{Be}_2(\text{SiO}_4) + 2\text{MnS} + 3\text{Mn}_2\text{SiO}_4 = \text{Mn}_4(\text{BeSiO}_4)_3\text{S}$
Бертрандит	4299,3 [5]	207,2 [6]	0,922 [6]	4573,5 [6]	$2\text{Be}_2(\text{SiO}_4) + \text{H}_2\text{O} = \text{Be}_4(\text{Si}_2\text{O}_7)(\text{OH})_2$
Эвклаз	2355,0 [5]	99,0 [6]	0,535 [6]	2514,4 [6]	$\text{Be}_2(\text{SiO}_4) + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2 + \text{H}_2\text{O} = 2\text{Al}(\text{BeSiO}_4)(\text{OH})$
Калькибеборосит	4728,2	249,8	1,045	5041,1	$\text{Be}_2[\text{SiO}_4] + \text{Y}_2\text{O}_3 + 2\text{CaSiO}_3 + \text{SiO}_2 + \text{B}_2\text{O}_3 + 2\text{H}_2\text{O} =$ $= 2\text{CaY}[\text{BeBSi}_2\text{O}_8(\text{OH})_2]$
Гарстигит	12099,8	687,8	2,338	12785,2	$2\text{Be}_2[\text{SiO}_4] + \text{Mn}(\text{OH})_2 + 3\text{Ca}_2(\text{SiO}_4) + \text{SiO}_2 =$ $= \text{MnCa}_2\text{Be}_4(\text{SiO}_4)_7(\text{Si}_2\text{O}_7)_2(\text{OH})_2$
<b>Бавенит</b>	<b>13361,9</b>	<b>805,3</b>	<b>2,609</b>	<b>14136,7</b>	<b><math>\text{Be}_2[\text{SiO}_4] + 2\text{Ca}_2(\text{SiO}_4) + \text{Al}_2\text{O}_3 + 6\text{SiO}_2 + \text{H}_2\text{O} = \text{Ca}_4\text{Be}_2\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{26}(\text{OH})_2</math></b>
Барилит	3411,6 [6]	190,1 [6]	0,645 [6]	3605,3 [6]	$\text{Be}_2(\text{SiO}_4) + \text{BaO} + \text{SiO}_2 = \text{BaBe}_2(\text{Si}_2\text{O}_7)$
Фенакит	2028,0 [5]	89,6 [6]	0,359 [6]	2138,9 [6]	Использовано справочное значение $\Delta G_{f(298)}^{\circ} = -2030,5$ кДж/моль
Берилл	8513,0 [5]	400,0 [6]	1,524 [6]	8967,1 [6]	$\text{Be}_2(\text{SiO}_4) + \text{BeAl}_2\text{O}_4 + 5\text{SiO}_2 = \text{Be}_3\text{Al}_2(\text{Si}_6\text{O}_{18})$
Лейкофан	3335,9	205,1	0,651	3729,7	$\text{Be}_2[\text{SiO}_4] + 2\text{CaSiO}_3 + 2\text{NaF} + \text{SiO}_2 = 2\text{NaCaBeSi}_2\text{O}_4\text{F}$
Гюглант	3638,0 [6]	192,6 [6]	0,656 [6]	3834,7 [6]	$\text{Be}_2(\text{SiO}_4) + 3\text{CaSiO}_3 + \text{CaO} = \text{Ca}_2\text{Be}(\text{Si}_2\text{O}_7)$
Силикаты лития					
Кукеит	6622,7 [6]	-	-	-	$2\text{LiAl}(\text{Si}_2\text{O}_6) + 2\text{Al}_2(\text{SiO}_4)\text{O} + 2\text{Al}_2\text{O}_3 + 8\text{H}_2\text{O} = 2\text{LiAl}_4(\text{Si}_3\text{AlO}_{10})(\text{OH})_8$
Бикитаит	2656,9 [6]	181,2 [6]	0,762 [6]	2883,4 [6]	$2\text{LiAl}(\text{Si}_2\text{O}_6) + 2\text{H}_2\text{O} = 2[\text{LiAl}(\text{SiO}_3)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}]$

Окончание табл. 1

Силикат	$-\Delta G_{f(298)}^{\circ}$ , кДж/моль	$S_{298}^{\circ}$ , Дж/(моль·К)	$-\Delta S_{f(298)}^{\circ}$ , кДж/(моль·К)	$-\Delta H_{f(298)}^{\circ}$ , кДж/моль	Уравнения, использованные для расчёта $\Delta G_{f(298)}^{\circ}$
<b>Яларит</b>	<b>3278,5</b>	-	-	-	$\text{Li}_2\text{Si}_2\text{O}_5 + \text{Na}_2\text{O} + 3\text{B}_2\text{O}_3 + \text{H}_2\text{O} = 2\text{LiNaSiB}_3\text{O}_7(\text{OH})$ $2\text{LiAl}(\text{Si}_2\text{O}_6) + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{K}_2\text{O} + 2\text{FeO} + 2\text{SiO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} =$ $= 2\text{KLiFeAl}(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$
Циннвальдит	5032,5 [6]	313,8 [6]	1,214 [6]	5394,3 [6]	$2\text{LiAl}(\text{Si}_2\text{O}_6) + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{K}_2\text{O} + 2\text{FeO} + \text{SiO}_2 + \text{SiF}_4 = \text{KLiFeAl}(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})\text{F}_2$ $3\text{Li}_2\text{Si}_2\text{O}_5 + 4\text{SnO}_2 + \text{K}_2\text{O} + 18\text{SiO}_2 = 2\text{KLi}_3\text{Sn}_2\text{Si}_{12}\text{O}_{30}$
Бреннокит	12470,2	804,9	2,753	13289,7	
Лепидолит	5506,5 [6]	294,3 [6]	1,237 [6]	5874,6 [6]	$2\text{LiAl}(\text{Si}_2\text{O}_6) + \text{Li}(\text{AlSiO}_4) + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{K}_2\text{O} + 2\text{H}_2\text{O} = 2\text{KLi}_{1,5}\text{Al}_{1,5}(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$ $2\text{LiAl}(\text{Si}_2\text{O}_6) + \text{Li}(\text{AlSiO}_4) + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{K}_2\text{O} + \text{SiF}_4 = 2\text{KLi}_{1,5}\text{Al}_{1,5}(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})\text{F}_2$
<b>Холмквистит</b>	<b>11194,4</b>	<b>452,9</b>	<b>2,503</b>	<b>11939,4</b>	$2\text{LiAl}(\text{Si}_2\text{O}_6) + \text{Mg}_2(\text{Si}_2\text{O}_6) + \text{MgO} + 2\text{SiO}_2 + \text{H}_2\text{O} = \text{Li}_2\text{Mg}_2\text{Al}_2(\text{Si}_6\text{O}_{22})(\text{OH})_2$
Соколовант	5697,2	346,6	1,128	6033,9	$2\text{CsF} + 2\text{LiAl}(\text{Si}_2\text{O}_6) + 2\text{LiF} + 4\text{SiO}_2 = 2\text{CsLi}_2\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}\text{F}_2$
Полилитнионит	5700,6 [6]	301,5 [6]	0,115 [6]	5734,9 [6]	$2\text{LiAl}(\text{Si}_2\text{O}_6) + 2\text{LiF} + 2\text{KF} + 4\text{SiO}_2 = 2\text{KLi}_2\text{Al}(\text{Si}_4\text{O}_{10})\text{F}_2$
β-сподумен	2853,4 [6]	153,9 [6]	0,556 [6]	3019,1 [6]	Использовано справочное значение $\Delta G_{f(298)}^{\circ} = -2853,4$ кДж/моль
Эвкрипит	2000,1 [6]	108,4 [6]	0,378 [6]	2113,7 [6]	Использовано справочное значение $\Delta G_{f(298)}^{\circ} = -1998,3$ кДж/моль
Петалит	4580,7 [6]	239,9 [6]	0,918 [6]	4854,3 [6]	$2\text{LiAl}(\text{Si}_2\text{O}_6) + 4\text{SiO}_2 = 2\text{LiAl}(\text{Si}_4\text{O}_{10})$
Тайниолит	5738,4 [6]	317,0 [6]	0,113 [6]	5772,1 [6]	$\text{Mg}_2(\text{Si}_2\text{O}_6) + \text{LiF} + \text{KF} + 3\text{SiO}_2 = \text{KLiMg}_2(\text{Si}_4\text{O}_{10})\text{F}_2$
α-сподумен	2854,9 [6]	119,3 [6]	0,591 [6]	3031,0 [6]	Использовано справочное значение $\Delta G_{f(298)}^{\circ} = -2869,3$ кДж/моль
Бериллийитиевые силикаты					
<b>Битинг</b>	<b>5908,9</b>	-	-	-	$\text{Be}_2(\text{SiO}_4) + \text{Li}_2\text{Si}_2\text{O}_5 + \text{Ca}_2(\text{SiO}_4) + 3\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{H}_2\text{O} =$ $= \text{CaLiAl}_2(\text{Si}_2\text{BeAlO}_{10})(\text{OH})_2$
Пещотаит	8392,1	455,7	1,698	8898,7	$\text{Cs}_2\text{O} + 2\text{Be}_2(\text{SiO}_4) + 2\text{LiAl}(\text{Si}_2\text{O}_6) + \text{Al}_2\text{O}_3 + 6\text{SiO}_2 =$ $= 2\text{Cs}(\text{Be}_2\text{Li})\text{Al}_2(\text{Si}_6\text{O}_{18})$
Сянхуалит	7474,3 [6]	320,0 [6]	1,382 [6]	7886,1 [6]	$\text{Be}_2(\text{SiO}_4) + 2\text{CaSiO}_3 + 2\text{LiF} + \text{BeO} + \text{CaO} = \text{Li}_2\text{Ca}_3(\text{BeSiO}_4)_3\text{F}_2$
Либерит	2589,8 [6]	117,6 [6]	0,175 [6]	2641,1 [6]	$\text{Be}_2(\text{SiO}_4) + 2\text{Li}_2\text{O} + \text{SiO}_2 = 2\text{Li}_2\text{Be}(\text{SiO}_4)$

В работах [6, 12], пользуясь известными из литературы и рассчитанными значениями энергии Гиббса образования силикатов, сравнивали термодинамические характеристики силикатов бериллия и установили их связь с реакционной способностью данных силикатов (аналогичные исследования в работах [6, 12] выполнены также в отношении сульфидов меди, серебра, железа, молибденита и дисульфида рения, оксидов меди, минералов урана, др.).

При оценке реакционной способности минералов Х.К. Оспанов [6, 12-16] исходил из положения, что изучавшиеся им минералы (силикаты, сульфиды, оксиды и др.) сильно отличаются по атомному составу. Поэтому он счёл целесообразным пользоваться величинами  $\Delta G_{f(298)}^\circ$ , отнесёнными к числу атомов, из которых состоит простейшая формула минерала, чтобы говорить о некотором «среднем» вкладе атомов, так как точный вклад каждого из них неизвестен. Оказалось, что средние атомные энергии Гиббса образования минералов  $\overline{\Delta G}_f^\circ$ , выраженные в кДж/моль·атом, закономерно меняются при переходе от даналита к бериллу [6]. Такой же вывод был сделан в отношении составленных в работе [6] рядов сульфидов, оксидов и др. однотипных минералов. В частности, сравнительный анализ  $\overline{\Delta G}_f^\circ$ , силикатов бериллия показывает, что с энергетической точки зрения их реакционная способность должна изменяться в ряду от берилла (наименьшая) к даналиту (наибольшая) при прочих равных условиях: берилл < фенакит < эвклаз < берtrandит < гельвин < гентгельвин < даналит.

Экспериментальная проверка ориентировочной оценки реакционной способности силикатов бериллия на основе величин  $\Delta G_{f(298)}^\circ$  показала [6, 12], что при кипячении в течение 30 мин в 8 %-ном растворе соляной кислоты извлечение бериллия из минералов при переходе от даналита к бериллу закономерно уменьшается. Следовательно, изменение степени извлечения бериллия из его силикатов соляной кислотой при одинаковых условиях в ряду от даналита до берилла и ход изменений их средней атомной энергии Гиббса образования совпадают. Экспериментально установлено [6, 12], что в ряду от берилла к даналиту константа скорости реакции ( $K_c$ ) закономерно возрастает: берилл < фенакит < эвклаз < берtrandит < гельвин < гентгельвин < даналит. Эти данные подтверждены результатами извлечения бериллия из вышеуказанных силикатов при одинаковых условиях в растворе бифторида калия в кислой среде. В этом случае величина  $K_c$ , также закономерно возрастает в ряду от берилла к даналиту: берилл < фенакит < эвклаз < берtrandит < гельвин < гентгельвин < даналит.

Таким образом, в работе [6] установлена неизвестная ранее закономерность – скорость растворения минералов в комплексобразующих растворах возрастает с увеличением их средней атомной энергии Гиббса образования\*.

Подход, предложенный в работе [6], подтверждается результатами исследований процесса вскрытия силикатов бериллия серной кислотой. Так, по результатам лабораторных опытов [1] берилл вскрывается 93 %-й серной кислотой при 250÷300 °С за 5 ч лишь на ~25 %, тогда как фенакит в подобных условиях в лабораторном и промышленном мас-

---

\* Международная ассоциация авторов научных открытий и Международная академия авторов научных открытий и изобретений выдали Оспанову Х.К. диплом на научное открытие № 238 (2003 г.) «Закономерность изменения скорости растворения труднорастворимых минералов в комплексобразующих растворах и окислительных средах» («Казахстанская правда», № 197 за 2005 г.).

штабах вскрывается на 95 % [1, 17], а промышленно-приемлемое вскрытие берtrandита серной кислотой на заводе фирмы «Браш Веллман» (США) обеспечивается всего при 95 °С [1]. Эти данные подтверждают, что реакционная способность силикатов снижается при переходе от берtrandита к фенакиту и далее к бериллу.

Несмотря на привлекательность данного подхода к оценке реакционной способности силикатов бериллия, экспериментальная его проверка практически реализована на ограниченном круге минералов бериллия. Представляет несомненный интерес попытка применить указанный подход для более широкого ряда силикатов бериллия. В работе [7] ряд возрастания реакционной способности силикатов бериллия, предложенный Х.К. Оспановым был дополнен чкаловитом, бериллитом, эвдимитом, сфероберtrandитом, миларитом, барилитом и гюгиантом. В статье [2] полученный в работе [7] расширенный ряд возрастания реакционной способности силикатов бериллия дополнен ловдаритом, лейфитом, соренсенитом, туктупитом, калькибебороситом, гарстигитом и лейкофаном. В данной статье, полученный в работе [2] расширенный ряд возрастания реакционной способности силикатов бериллия дополнен бавенитом (табл. 2).

Таблица 2

*Энергетические параметры образования силикатов бериллия, лития и комплексных бериллийлитиевых силикатов (выделены рассчитанные в данной работе характеристики); содержание BeO (Li<sub>2</sub>O) в силикатах*

Название силиката	Формула	$-\Delta G_{f(298)}^{\circ}$ , кДж/моль	$-\Delta \bar{G}_f^{\circ}$ , кДж/моль·атом	Содержание BeO (Li <sub>2</sub> O) в силикатах [3-5]
Силикаты бериллия				
Ловдарит	Na <sub>2</sub> (BeSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub> )·2H <sub>2</sub> O	1793,9	89,7	6,0÷7,0
Лейфит	Na <sub>5</sub> BeAl <sub>4</sub> Si <sub>12</sub> O <sub>33</sub> F·5H <sub>2</sub> O	8304,2	118,6	1,4÷2,9
Чкаловит	Na <sub>2</sub> (BeSi <sub>2</sub> O <sub>6</sub> )	1571,3	151,9	11,3÷12,9
Соренсенит	Na <sub>4</sub> Sn(Be <sub>2</sub> Si <sub>6</sub> O <sub>16</sub> )(OH) <sub>4</sub>	6001,27	162,2	8,02
Бериллит	Be <sub>3</sub> (Si <sub>2</sub> O <sub>7</sub> )(OH) <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O	5585,0	199,5	40,0
Эвдимит	Na(BeSi <sub>3</sub> O <sub>7</sub> )(OH)	2958,6	211,3	10,1÷12,2
Даналит	Fe <sub>4</sub> (BeSiO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> S	5210,3	226,5	12,1÷14,7
Сфероберtrandит	Be <sub>3</sub> (Si <sub>2</sub> O <sub>7</sub> )(OH) <sub>4</sub>	5111,0	232,2	45,2
Туктупит	Na <sub>4</sub> BeAlSi <sub>4</sub> O <sub>12</sub> Cl	5341,0	232,2	5,4
Миларит	KCa <sub>2</sub> AlBe <sub>2</sub> (Si <sub>12</sub> O <sub>30</sub> )·0,5H <sub>2</sub> O	11594,4	234,2	3,5÷6,2
Гентгельвин	Zn <sub>4</sub> (BeSiO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> S	5537,7	240,7	12,0÷12,7
Гельвин	Mn <sub>4</sub> (BeSiO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> S	5661,1	246,1	8,9÷14,9
Берtrandит	Be <sub>4</sub> (Si <sub>2</sub> O <sub>7</sub> )(OH) <sub>2</sub>	4299,3	252,9	39,5÷42,6
Эвклаз	Al(BeSiO <sub>4</sub> )(OH)	2355,0	261,1	17,0÷21,8
Калькибеборосит	CaY[BeBSi <sub>2</sub> O <sub>8</sub> (OH) <sub>2</sub> ]	4728,2	262,7	5,2
Гарстигит	MnCa <sub>6</sub> Be <sub>4</sub> (SiO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (Si <sub>2</sub> O <sub>7</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>2</sub>	12099,8	281,4	11,4÷11,6
<b>Бавенит</b>	<b>Ca<sub>4</sub>[Be<sub>2</sub>Al<sub>2</sub>Si<sub>9</sub>O<sub>26</sub>](OH)<sub>2</sub></b>	<b>13361,9</b>	<b>284,3</b>	<b>6,3÷7,7</b>
Барилит	BaBe <sub>2</sub> (Si <sub>2</sub> O <sub>7</sub> )	3411,6	284,3	15,5÷16,0
Фенакит	Be <sub>2</sub> (SiO <sub>4</sub> )	2028	290,0	41,1÷45,5
Берилл	Be <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> (Si <sub>6</sub> O <sub>18</sub> )	8513,0	294,0	10,5÷14,3
Лейкофан	NaCaBeSi <sub>2</sub> O <sub>6</sub> F	3535,9	294,7	10,0÷12,0
Гюгиант	Ca <sub>2</sub> Be(Si <sub>2</sub> O <sub>7</sub> )	3638,0	303,2	9,5
Силикаты лития				
Кукеит	LiAl <sub>4</sub> (Si <sub>3</sub> AlO <sub>10</sub> )(OH) <sub>8</sub>	6622,7	189,2	(0,8÷4,3)
Бикитаит	LiAl(SiO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·H <sub>2</sub> O	2656,9	204,4	(6,5)
<b>Ядарит</b>	<b>LiNaSiB<sub>3</sub>O<sub>7</sub>(OH)</b>	<b>3278,5</b>	<b>218,6</b>	<b>(3,2*)</b>
Циннвальдит	KLiFeAl(AlSi <sub>3</sub> O <sub>10</sub> )(F,OH) <sub>2</sub>	5032,5	240,3	(1,0÷5,0)

Бреннокит	$\text{KLi}_3\text{Sn}_2\text{Si}_{12}\text{O}_{30}$	12470,2	259,8	(4,0)
-----------	--	---------	-------	-------

Окончание таблицы 2

Название силиката	Формула	$-\Delta G_f^{\circ} (298)$ , кДж/моль	$-\Delta \bar{G}_f^{\circ}$ , кДж/моль·атом	Содержание BeO (Li <sub>2</sub> O) в силикатах [3-5]
Лепидолит	$\text{KLi}_{1,5}\text{Al}_{1,5}(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{F},\text{OH})_2$	5506,5	262,9	(1,2÷5,9)
<b>Холмквистит</b>	<b><math>\text{Li}_2\text{Mg}_3\text{Al}_2(\text{Si}_8\text{O}_{22})(\text{OH})_2</math></b>	<b>11194,4</b>	<b>273,0</b>	<b>1,1*</b>
Соколоваит	$\text{CsLi}_2\text{AlSi}_4\text{O}_{10}\text{F}_2$	5697,2	284,9	(6,2*)
Полилитионит	$\text{KLi}_2\text{Al}(\text{Si}_4\text{O}_{10})\text{F}_2$	5700,6	285,0	(3,7÷7,7)
β-сподумен	β- $\text{LiAl}(\text{Si}_2\text{O}_6)$	2853,4	285,3	(5,9÷7,6)
Эвкрипит	$\text{Li}(\text{AlSiO}_4)$	2000,1	285,4	(6,1)
Петалит	$\text{LiAl}(\text{Si}_4\text{O}_{10})$	4580,7	286,3	(6,1)
Тайниолит	$\text{KLiMg}_2(\text{Si}_4\text{O}_{10})\text{F}_2$	5738,4	286,9	(2,4÷3,8)
α-сподумен	α - $\text{LiAl}(\text{Si}_2\text{O}_6)$	2854,9	286,9	(5,9÷7,6)
Бериллийлитиевые силикаты				
<b>Битит</b>	<b><math>\text{CaLiAl}_2(\text{Si}_2\text{BeAl})\text{O}_{10}(\text{OH})_2</math></b>	<b>5908,9</b>	<b>268,6</b>	<b>2,3 (1,8)*</b>
Пецотаит	$\text{Cs}(\text{Be}_2\text{Li})\text{Al}_2(\text{Si}_6\text{O}_{18})$	8392,1	279,7	7,5 (2,3)*
Сянхуалит	$\text{Li}_2\text{Ca}_3(\text{BeSiO}_4)_3\text{F}_2$	7474,3	299,0	15,8÷16,3 (5,8)
Либерит	$\text{Li}_2\text{Be}(\text{SiO}_4)$	2589,8	323,7	25,47 (23,4)

\* Теоретическое содержание.

Для расчётов величин  $\Delta G_f^{\circ} (298)$  данных силикатов использованы: указанный выше приближённый метод определения этих величин и справочные значения  $\Delta G_f^{\circ} (298)$  соединений [6, 8-11], использованных для расчёта (табл. 1). Полученный по результатам этой работы ряд возрастания реакционной способности силикатов бериллия имеет следующий вид: гюгант < лейкофан < берилл < фенакит < барилит < **бавенит** < гарстигит < калькибебросит < эвклаз < бертрандит < гельвин < гентгельвин < миларит < туктупит = сферобертрандит < даналит < эвидимит < бериллит < соренсенит < чкаловит < лейфит < ловдарит.

Принимая во внимание, что фенакит глубоко вскрывается серной кислотой, он и силикаты, стоящие правее его в составленном ряду силикатов бериллия (смеси таких силикатов) не требуют их дорогостоящей активации и могут быть вскрыты серной кислотой их непосредственной сульфатизацией.

В работе [2] был также расширен известный ряд [7] возрастания реакционной способности силикатов лития; известный ряд дополнен бреннокитом и соколоваитом. В данной статье полученный в работе [2] расширенный ряд возрастания реакционной способности силикатов лития дополнен ядаритом и холмквиститом (табл. 2).

Расширенный ряд имеет следующий вид: α-сподумен = тайниолит < петалит < эвкрипит < β-сподумен < полилитионит < соколоваит < **холмквистит** < лепидолит < бреннокит < циннвальдит < **ядарит** < бикитаит < кукеит (в данный ряд введён β-сподумен на основании приведённой в работах [7, 8] его величины  $\Delta G_f^{\circ} (298)$  (см. табл. 1). Учитывая, что β-сподумен, получаемый в гидрометаллургии лития в результате декрипτιрующего обжига природной α-модификации сподумена, глубоко вскрывается серной кислотой [18], силикаты, стоящие правее β-сподумена в составленном ряду силикатов лития (смеси таких силикатов), не требуют их дорогостоящей активации и могут быть вскрыты серной кислотой их непосредственной сульфатизацией. Обоснованность положения кукеита, циннвальдита, лепидолита и β-сподумена относительно α-сподумена в составленном ряду силикатов лития подтверждают литературные данные [18, 19], согласно которым кукеит, циннвальдит, лепидолит и β-сподумен взаимодействуют с серной кислотой, а α-сподумен - нет (прямое вскрытие лепидолита серной кислотой долгое время

применялось в гидрометаллургии лития на фабрике Шеринга в Берлине). Подтверждением положения петалита относительно  $\beta$ -сподумена в составленном ряду силикатов лития служат данные источников [18, 19], согласно которым  $\beta$ -сподумен глубоко вскрывается серной кислотой, а петалит не взаимодействует с ней.

В работах [2, 7] составлен ряд возрастания реакционной способности комплексных бериллийлитиевых силикатов: либерит < сянхуалит < пеццотайт. В данной статье указанный ряд дополнен битиитом: либерит < сянхуалит < пеццотайт < **битиит** (табл. 2).

Следует отметить, что реакционная способность минералов при их вскрытии определяется термодинамикой протекания данного процесса (необходимое, но не достаточное условие вскрытия) и его кинетикой. Термодинамические параметры системы характеризуют её термодинамические возможности, а кинетические параметры системы, являясь управляемыми параметрами (например, методом обновления реакционной поверхности), показывают насколько умело использованы эти возможности при проведении эксперимента.

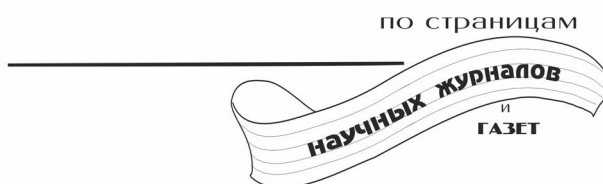
Полученные значения средней атомной энергии Гиббса образования силикатов бериллия, силикатов лития и бериллийлитиевых силикатов представляют интерес не только для дальнейшего изучения реакционной способности этих минералов по отношению к однотипным реагентам, но позволяют уже сейчас прогнозировать различия реакционной способности этих силикатов. Кроме того, составленные по термодинамическим параметрам минералов ряды указывают на возможность повышения экономической эффективности гидрометаллургии бериллия, гидрометаллургии лития за счёт вовлечения в переработку силикатов с промышленно-приемлемым содержанием оксида бериллия, оксида лития (табл. 2), имеющих более высокую реакционную способность по сравнению с реакционной способностью используемых сегодня силикатов. Одновременно показано, за счёт каких силикатов целесообразно расширять сырьевые базы бериллия и лития.

#### Список литературы

1. Самойлов В.И. Экспериментальная разработка перспективных химических методов извлечения бериллия и лития из минерального сырья. – Усть-Каменогорск: Медиа-Альянс, 2006. – 551 с.
2. Оналбаева Ж.С. Оценка термодинамических характеристик силикатов бериллия, силикатов лития, комплексных бериллийлитиевых силикатов и их реакционной способности / Ж.С. Оналбаева, Е.Н. Хлебникова, В.И. Самойлов и др. // Вестник ВКГТУ. – 2012. – № 3. – С. 59–67.
3. Месторождения литофильных редких металлов / Под ред. Л.Н. Овчинникова, Н.А. Солодова. – М.: Недра, 1980. – 559 с.
4. Stanley, C.J., Jones, G.C., Rumsey, M.S., Blake, C., Roberts, A.C., Stirling, J.A.R., Carpenter, G.J.C., Whitfield, P.S., Grice, J.D., LePage, Y. (2007): Jadairite,  $\text{LiNaSiB}_3\text{O}_7(\text{OH})$ , a new mineral species from the Jadar Basin, Serbia. *European Journal of Mineralogy*, 19, 575–580.
5. Булах А.Г. Общая минералогия. – СПб: Изд-во СПб. ун-та, 1999. – 354 с.
6. Оспанов Х.К. Термодинамика и кинетика гетерогенных процессов. – Алма-Ата: КазГУ, 1990. – 156 с.
7. Куленова Н.А. Сравнительная оценка реакционной способности силикатов бериллия, силикатов лития, комплексных бериллийлитиевых силикатов и определение их термодинамических характеристик / Н.А. Куленова, В.И. Самойлов, З.В. Шерегедя и др. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – М., 2010. – № 12. – С. 287–296.
8. Наумов Г.Б. Справочник термодинамических величин / Г.Б. Наумов, Б.Н. Рыженко, И.Л. Ходаковский. – М.: Атомиздат, 1976. – 240 с.
9. Булах А.Г. Физико-химические свойства минералов и компонентов гидротермальных растворов / А.Г. Булах, К.Г. Булах. – Л.: Недра, 1978. – 167 с.
10. Карапетьянц М.Х. Основные термодинамические константы неорганических и органических веществ / А.Г. Булах, К.Г. Булах. – М.: Химия, 1968. – 470 с.
11. Горонковский И.Т. Краткий справочник по химии / И.Т. Горонковский, Ю.П. Назаренко, Е.Ф. Некряч. – Киев: Изд-во АН УССР, 1962. – 660 с.
12. Оспанов Х.К. Обоснование последовательности растворения минералов бериллия //

- Журнал неорганической химии. – 1983. – Т. 28. – Вып. 2. – С. 324–328.
13. Оспанов Х.К. Физико-химические основы избирательного растворения минералов. – М.: Недра, 1993. – 174 с.
  14. Оспанов Х.К. Теория управления физико-химическими процессами, протекающими на границе раздела твердое тело – жидкость и перспективы ее использования. – Алматы: Комплекс, 2004. – 133 с.
  15. Ospanov Kh.K. Physical and chemical foundations for selective dissolution of minerals. – London: Flint river, 1993. – 167 p.
  16. Ospanov Kh.K. Theory of controlling a physioco-chemical process-taking place at the interface solid-liquid. – London: Flint river, 2004. – 124 p.
  17. Зазубин А.И. Исследование некоторых физико-химических свойств бериллиевого минерала фенакита / А.И. Зазубин, Ю.А. Катков, В.Г. Степура и др. // Отчёт о НИР КазИМО (тема 34, разд. III). – Алма-Ата: КазИМО, 1964. – 54 с.
  18. Плюшев В.Е. Химия и технология соединений лития, рубидия и цезия / В.Е. Плюшев, В.Д. Степин. – М.: Химия, 1970. – 408 с.
  19. Остроушко Ю.И. Литий, его химия и технология / Ю.И. Остроушко, П.И. Бучихин, В.И. Алексеева и др. – М.: Атомиздат, 1960. – 200 с.

Получено 04.02.2014



## ГЭС В КОНТЕЙНЕРЕ

Автономную мобильную гидроэлектростанцию, размещенную внутри стандартного морского контейнера, разработали и внедряют в производство специалисты НИИЭС «РусГидро». Новинка предназначена для самых разных потребителей, удаленных от линий централизованного энергоснабжения: отдаленных фермерских хозяйств, лесозаготовок, золотодобывающих и рыболовных артелей, небольших населенных пунктов. Главное, чтобы рядом была река. В зависимости от пожеланий потребителя мобильная ГЭС может быть оснащена генератором на 10, 30 или 60 кВт. В отличие от классических «больших» гидростанций, контейнерный энергоагрегат построен на базе ортогональной турбины, обычно применяемой в приливных электростанциях. Она конструктивно проста, не требует обслуживания, а главное – способна работать при небольших напорах воды. Для того, чтобы энергоагрегат вышел на расчетную мощность, достаточно перепада всего в 2-4 метра, что позволяет обходиться без высоких дорогостоящих плотин. Такую ГЭС можно установить рядом с существующей плотиной неэнергетического назначения либо на простейшей деривационной трубе в излучине реки или даже прямо в русле, увеличив напор при помощи каменно-земляной дамбы, возведенной бульдозером с двух сторон от контейнера. Автономность и небольшая масса (всего 3,5 тонны) энергоустановки позволяют легко перевозить и устанавливать такую ГЭС на новом месте.

«Наука и жизнь» № 7, 2013



