ISSN 2078-6220. Мінералогічний збірник. 2013. № 63. Випуск 1. С. 39–51
Mineralogical Review. 2013. N 63. Issue 1. P. 39–51

УДК 553.6(477)

РЕСУРСНИЙ ПОТЕНЦІАЛ КРЕМНІЮ В УКРАЇНІ ТА МОЖЛИВІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ ВІТЧИЗНЯНОГО КРЕМНІЮ У ВІДНОВЛЮВАЛЬНІЙ ЕНЕРГЕТИЦІ

В. Гулій[1], Р. Бочевар[2]

[1]*Львівський національний університет імені Івана Франка,*
вул. Грушевського, 4, 79005 Львів, Україна
E-mail: vgul@ukr.net
[2]*Київський національний університет імені Тараса Шевченка,*
вул. Васильківська, 90, 01022 Київ, Україна
E-mail: ruslana-kra@ukr.net

Видобуток світових викопних паливно-енергетичних ресурсів скорочуватиметься через їхнє виснаження, а тому нині важливим є пошук і впровадження нових джерел енергії. Відновлювальна енергетика набуває щораз більшого значення, поступово витісняючи джерела традиційної енергетики. У багатьох країнах світу є програми збільшення обсягів використання різних відновних джерел енергії, зокрема сонячної.

Оцінено ймовірний ресурсний потенціал природного кремнію України для виготовлення сонячних елементів вітчизняною промисловістю. Проаналізовано світові тенденції використання сонячної енергії, нормативно-правові акти, що регулюють використання різних джерел енергії в Україні, основні джерела для одержання кремнію. Виконано порівняння методів одержання кремнію й оцінено ресурсну базу для виробництва кремнію в Україні.

Наведено результати детальних мінералогічних, петрографічних, технологічних досліджень магнієвих руд базит-ультрабазитових масивів Капітанівського рудного поля – ймовірного джерела отримання кремнію як супутнього компонента в разі переробки таких руд. Визначено основні напрями виробництва дешевого "сонячного" кремнію й названо перспективні об'єкти на кремній в Україні. Підраховано можливі обсяги отримання кремнію з базит-ультрабазитових масивів Капітанівського рудного поля і визначено наявні домішки, що впливають на якість кінцевого продукту. З'ясовано, що на перспективних щодо "сонячного" кремнію об'єктах України потрібні додаткові дослідження щодо геологічної будови та оцінки якості окремих типів руд.

Ключові слова: відновлювальна енергетика, кремній, ресурси, родовище, комплексні руди, технологічна схема переробки руди, Україна.

Світова фінансово-економічна криза сприяла активності в багатьох сферах діяльності людини, оскільки припускають довгий ланцюжок активізації проблем, які за звичних умов мало привертають увагу або ж їх вирішують поступово. Ще на початку 70-х років XX ст. енергетична криза привела до розгортання досліджень у галузі можливих технічних засобів заміни звичних джерел отримання енергії та залучення нових видів паливно-енергетичних ресурсів. Тоді ж зародилась хвиля ентузіазму й успіхів у розробці установок для використання відновних джерел енергії і, передусім, енергії Сонця. Однак поступово економічні, політичні та енергетичні чинники тодішньої кризи притупилися.

© Гулій В., Бочевар Р., 2013

Лише дуже багаті та далекоглядні бізнесові структури й ентузіасти продовжували пошуки ефективних засобів використання відновної енергії. Якщо ж нині тверезо оцінювати перспективи використання викопних джерел енергії та можливості реалізації потенціалу відновних джерел, то стає очевидним, що ера широкого застосування нафти і природного газу завдяки експлуатації традиційних родовищ може скоро закінчитись.

Реалістичні тенденції, які дехто називає песимістичними, прогнозовані свого часу К. Хаббертом [9] для оцінки періоду забезпечення людства нафтою, скоро повинні найчіткіше виявитись. Не за горами 2015–2025 рр., які називав К. Хабберт, коли обсяги видобутку викопних вуглеводнів почнуть лише скорочуватись. І хоча можливі знахідки й відкриття нових багатих родовищ чи навіть цілих провінцій, вони лише віддалять критичні точки тотального дефіциту вуглеводнів, а отже, більш ніж необхідним уже сьогодні є пошук і впровадження нових джерел енергії. Цілком логічно, що людство засвоїло попередні уроки й щораз частіше поглядає, зокрема, на Сонце, яке вчергове повинно допомогти. Що ж для цього потрібно? Відповідь очевидна – інтенсифікувати розробку технічних засобів використання енергії Сонця. Для України ця проблема особливо актуальна, оскільки ресурсна база вуглеводнів видається такою, що вже пережила пік Хабберта. Проте минулі успіхи у виробництві кремнію дають підстави сподіватися на вирішення енергетичних питань за допомогою відродження й розвитку виробництва сонячних елементів на базі вітчизняних потужностей.

Світові тенденції використання енергії. Хоча є всі передумови до благополучного завершення поточної економічної та енергетичної кризи, стає зрозуміло, що на черговому витку подій з'являться нові причини різких коливань цін на вуглеводні, політичні й економічні тиски країн монополістів-власників великих запасів вуглеводнів, спокуси безоглядної витрати викопних ресурсів і збільшення емісії парникових газів, а тому вже нині виявились тенденції до розвитку нових технологій, які б забезпечили використання відновних ресурсів, водневої енергетики, паливних насосів тощо.

Зокрема, Єврокомісія ухвалила рішення про суттєве збільшення частки відновних джерел енергії протягом 2010–2030 рр. із задоволенням енергетичних проблем, зобов'язавши країни ЄС довести обсяги енергії з таких джерел до одного порядку з традиційними енергетичними ресурсами. Відомими стали амбіційні проекти компаній з Німеччини та їхніх колег з Іспанії й Алжиру щодо отримання електроенергії з сонячних батарей у Північній Африці та передавання її в Європу. Подібні зрушення простежуються також в енергетичній сфері КНР, Австралії, США й інших країнах, де повідомляють про проекти (вартістю сотні мільярдів доларів) з використання енергії Сонця та інших відновних джерел. Можливо, нині екзотичними виглядають створені кораблі й літаки, яким надають руху завдяки енергії Сонця, та це є яскравим доказом значних змін не тільки в технологіях, а й у людській свідомості. Загалом, за різними оцінками, сьогодні простежується 50 % зростання ролі альтернативної енергетики порівняно з даними 2004 р. За прогнозами Світового енергетичного агентства, до 2030 р. виробництво електроенергії завдяки використанню сонячної енергії зросте в 60 разів!

Численні повідомлення про законодавчі акти, прийняті багатьма країнами з метою створення сприятливих умов для розвитку установок, що використовують відновні джерела енергії, стимулюють бізнесову активність, оскільки передбачають, що попит на первинні матеріали для розвитку таких технологій постійно і багаторазово збільшуватиметься.

Особливо це стосується сировини для виробництва сонячних елементів, передусім – кремнію. Рудні об'єкти, що раніше мали невизначені перспективи, сьогодні переоцінюють, доповнюють новими дослідженнями, беручи до уваги нові технології одержання вихідного кремнію чи кінцевих продуктів його використання. За різними прогнозами, до 2015 р. світовий попит на полікристалічний кремній напівпровідникового сорту збільшуватиметься на 6 % у рік з досягненням сумарного попиту в 63 тис. т. Очевидно, що сучасні тенденції використання викопних вуглеводнів внесуть корективи й у ці цифри.

Нормативно-правові акти, що регулюють використання різних джерел енергії в Україні. Одним із найбільш значимих нині в Україні документів, що визначає розвиток її енергетичної галузі, є "Енергетична стратегія України на період до 2030 року". Одним із ключових напрямів за цією стратегією вважають будівництво нових блоків АЕС, що відображає пріоритетний для авторів стратегії напрям в енергетиці – використання атомної енергії. Розвиток цього напряму передбачає також створення масштабного виробництва цирконію, замкненого циклу з одержання ядерного пального тощо. Водночас на розвиток відновних джерел енергії в Україні стратегією відведено лише перші відсотки, а то й частки відсотка серед інших. Очевидно, що на момент створення й обговорення стратегії ще не зовсім відчувалась актуальність і неминучість розвитку відновної енергетики, проте нагальною є необхідність внесення коректив у пріоритетні напрями майбутнього енергетики в Україні.

Ще один важливий документ, який регламентує безпосередньо розвиток мінерально-сировинної бази країни, – "Загальнодержавна програма розвитку мінерально-сировинної бази України на період до 2030 року", що затверджена Верховною Радою як Закон України і спрямована на розвиток пріоритетних напрямів геологічних досліджень. Однак програма не передбачає масштабних змін у сфері забезпечення вітчизняною сировиною теперішніх та й майбутніх виробників кремнію для сонячних елементів чи інших установок. Водночас відомо, що свого часу Україна посідала провідне місце у виробництві металургійного чистого кремнію.

Наприкінці 2008 р. опубліковано концепцію Державної цільової науково-технічної програми "Створення хіміко-металургійної галузі виробництва чистого кремнію протягом 2009–2012 років", яка схвалена розпорядженням Кабінету Міністрів України (№ 1 317 від 8 жовтня 2008 р.) і передбачає значні кроки з налагодження виробництва вітчизняного чистого кремнію. В концепції стверджено, що наявні сьогодні в Україні виробництва різних форм власності працюють на давальницькій сировині, а отже, потрібно модернізувати старі вітчизняні виробництва, переорієнтувати їх на нові технології, які нині використовують у світі. Вирішення проблеми створення хіміко-металургійної галузі автори не бачать без створення єдиної інтегрованої науково-технологічної інфраструктури виробництва чистого кремнію з використанням вітчизняної мінерально-сировинної бази. Уважаємо, що це має стати важливим вихідним пунктом, оскільки необхідно вивчити, оцінити наявні ресурси й адаптувати їх у виробництво відповідно до нових вимог сучасних технологій. Якими ж ресурсами володіє сьогодні Україна? Щоб відповісти на це питання, спочатку розглянемо основні способи одержання кристалічного кремнію та джерела сировини, які використовують для цього.

Основні джерела сировини для одержання кремнію. Нині інтенсивно розробляють нові технології одержання кремнію, придатного для виготовлення сонячних елементів з високим ККД. Очікують, що собівартість такого кремнію сягатиме не більше 15 дол. США/кг за обсягів виробництва 5 000 т/рік [6]. Значне зниження собівартості

кремнію (як необхідна умова для отримання фотоелектричної енергії, яка була б конкурентоспроможною порівняно з іншими джерелами) можливе двома способами: 1) отримання дешевого кремнію чистоти напівпровідників; 2) отримання менш чистого кремнію (і дешевшого), однак придатного для виробництва сонячних елементів – так званого сонячного кремнію. Назва *сонячний кремній* стосується кремнію, придатного для виготовлення сонячних елементів. Він повинен мати суму активних домішок (Al, Fe, Ti, V, P, B) у межах 10^{-5}–10^{-3} ат. % (або 0,1–10 г/т). Такі вимоги до чистоти матеріалу "сонячної" якості суттєво нижчі, ніж до кремнію електронного сорту для мікроелектроніки. З огляду на це нині можна визначити кілька основних напрямів виробництва дешевого "сонячного" кремнію: а) відновлення або піроліз летких сполук кремнію; 2) фторидні методи одержання кремнію високої чистоти; 3) рафінування технічного кремнію для зменшення вмісту активних елементів-домішок; 4) відновлення кварцової сировини підвищеної чистоти вуглецевим відновником з низькою зольністю. Часто процес одержання кремнію високої якості об'єднує кілька ланцюжків унаслідок оптимізації карботермічного процесу, рафінування технічного кремнію.

Крім впливу на якість кінцевого продукту, у разі отримання кремнію важливе значення має якість сировини ще до моменту перших стадій її переробки. Зокрема, повідомляли про виробництво кремнію "сонячної" та "електронної" якості внаслідок переробки алюмосилікатного матеріалу, діатомітів та іншої незвичної сировини [8], що в майбутньому сприятиме здешевленню кінцевого продукту.

Часто вихідний матеріал кварцового складу виглядає як такий, який можна надзвичайно легко розробляти. Це правильно для певних родовищ кварцу, однак загалом матеріал, який містить значну кількість домішок (від 50 до 300 г/т) до високочистих різновидів (< 50 г/т), є проблематичним для розробки. Домішками в кварці звичайно є флюїдні включення (наприклад, у молочному чи "сніжному" кварці), різні мінеральні включення (наприклад, рутилові голки) або ж чужорідні йони (елементи-домішки). Кожний додатковий ступінь очищення від домішок відповідно збільшує кінцеву ціну продукту. Виробнича ціна високоякісного продукту набагато нижча, якщо кварц, який видобувають, має низький вміст домішок. Ці особливості, природно, відображаються у значних цінових коливаннях між кварцом низької якості (з ціною від 15 до 20 дол. за 1 т) і кварцом високої чистоти (ціна якого – від 2 000 дол. за тонну і більше). Важливим постачальником високоякісного кварцового концентрату є Unimin Cooperation (США), яка розробляє поклади в пегматитах Північної Кароліни. Кварцові концентрати, що їх виробляє ця компанія, поділяють на декілька категорій, які стають світовими стандартами високої якості. Обсяг світового ринку оцінюють приблизно в 30 000 т у рік за 99,99 % чи вище чистоти [6].

Основними рудними проявами кварцу високої чистоти є пісок, пісковик, кварцит, гідротермальні жили, кварц із пегматитових порожнин. Немає чітких правил чи загальних положень, як формується кварц високої чистоти і в якому вигляді та де він такий трапляється. Відомими нині родовищами, де розробляють кварц високої чистоти, є пегматити (наприклад, родовища Драг у Норвегії та Спрус Пайн у США) і гідротермальні жили так званого альпійського типу (наприклад, родовище Саранпауль у Росії). У Норвегії є також родовища високоякісного кварцу (нині не розробляють), представлені гідротермальними жилами Сванвік і кіанітовими кварцитами. Звичайно родовища кварцу високої якості розробляють відкритими кар'єрами або неглибокими підземними виробітками в тому разі, якщо є достатній об'єм корисного компонента і він придатний для

апробованої високооб'ємної оцінки. Лабораторні дослідження передбачають визначення хімічної, мінералогічної та фізичної чистоти матеріалу родовища. На підставі цих результатів визначають, який ступінь чистоти можна отримати за розумних цін і яке використання матеріалу буде доцільним. Найбільш вдалу комбінацію техніки видобування і збагачення потрібно визначати для кожного конкретного родовища.

Попереднє очищення кварцу починають з фізичної стадії – дроблення, стирання, збагачення внаслідок флотації чи магнітної або електростатичної сепарації. Хімічне очищення кварцу шляхом очищення середніми чи сильними кислотами за змінної температури допомагає розчиненню польовошпатових вростків, суміші слюд, мінеральних облямівок та матеріалу, який виповнює мікротріщини. Хлорування є найліпшим способом одержання ультрачистого матеріалу завдяки видаленню більшої частини контамінованих елементів. Кварц нагрівають за T = 1 000–1 200 °C у хлорі чи хлориді водню, які виносять луги й перехідні метали. Під час теплової обробки та кальцинації видаляють флюїдні й газові включення. Звичайно після кожної стадії необхідно проводити хімічний аналіз для контролювання ступеня очищення.

Процес очищення й контролювання якості сировини достатньо складний і тривалий. Прикладом таких досліджень є вивчення кварцу високої чистоти в Норвезькій геологічній службі. Вимоги щодо якості та пропозиції вихідного матеріалу кварцу високої чистоти підвищуються, тому фахівці групи індустріальних мінералів служби впродовж останнього десятиліття проводять систематичні дослідження потенційних родовищ кварцу в Норвегії. Для швидкого з'ясування можливих ресурсів кварцу високої чистоти за допомогою лазерної абляції мас-спектрометрії з індукційно викликаною плазмою в кварці *in situ* визначають структурні домішки Li, Be, B, Na, Mg, Al, P, K, Ca, Ti, Mn, Fe і Ge [10]. Метод очищення необхідний для вилучення твердих і рідких включень інтенсивним збагаченням до хімічного аналізу структурних домішок. Інформацію про петрогенетичну історію кварцу одержують сканувальною електронною катодолюмінесцентою мікроскопією, яку використовують для виявлення зональності росту і структурних змін у кристалах кварцу, щоб виділити кварц різних генерацій кристалізації, що важко визначити за допомогою звичайної оптичної мікроскопії [11].

Крім видимих включень у кварці, важлива також діагностика домішок у вигляді другорядних елементів. Процес контролю за концентраціями, розподілом та видами домішок нормалізований слабко, що, вочевидь, пов'язане зі значними відмінностями в наборі та вмісті елементів-домішок у мінералі з різних родовищ. Зокрема, найбільш звичними елементами-домішками в природному кварці є Al, Ti, Li, H, Na, K, Ca, Fe, P, Ge, Ga, B (за порядком середніх значень варіацій). Вміст цих елементів залежить, головно, від температури кристалізації, тиску та хімічного складу флюїдів або розплавів, з яких кварц кристалізувався. Однак надалі порода могла зазнати метаморфізму, завдяки якому ці домішки змінювались або перерозподілялись – одні елементи виносились, інші – привносились, формувалися дефекти просторових комірок (вакансії кремнію та кисню, зруйновані зв'язки тощо). Загалом уважають, що гідротермальний кварц має переважно низький вміст Ti (< 20 г/т), однак може містити до декількох сотень грам на тонну Al. Кварц, який формувався за температури вище 500 °C, звичайно містить > 50 г/т Ti. Алюміній та його ікомпенсатори Li^+, K^+, Na^+, H^+ можуть вилучатися з кварцу під час метаморфізму за T > 350 °C і P = 1,5 кбар, тоді як структурний Ti у кварці за таких умов переважно зберігається в вузлах.

Наведений далеко не повний перелік досліджень, які проводять для оцінки якості сировини, відображає довгий і необхідний шлях визначення різних аспектів однорідності (чи неоднорідності) вихідного матеріалу для одержання кондиційного кінцевого продукту. Украй необхідними для остаточного вибору схеми переробки цієї сировини є також експериментальні чищення чи плавлення з постійним контролюванням якості продукту.

Ресурсна база для виробництва кремнію в Україні. З наведених вище джерел природної сировини для виробництва кремнію в Україні виявлено всі їхні різновиди. Серед уже наявних виробництв виділимо, передусім, придатні для отримання кристалічного кремнію високоякісні кварцити й пісковики. Особливому сорту в цьому разі відповідають кварцити із вмістом, %: $SiO_2 > 99$; $Al_2O_3 < 0{,}10–0{,}25–0{,}50$; $CaO < 0{,}10$. Навіть у кварцитах для виробництва низькосортного кристалічного кремнію сума зазначених домішок не може перевищувати 1,65–3,00 %, а вміст SiO_2 – не менше 96,5–98,0 %. Таким вимогам можуть відповідати тільки унікальні за якістю кварцити й пісковики.

В Україні для виробництва кремнію раніше використовували кварцити із вмістом SiO_2 понад 96,0 %. Такі породи виявлено в промисловій кількості та якості в геологічних комплексах Українського щита (УЩ) та Дніпровсько-Донецької западини (ДДЗ). За запасами кварцитів Україна посідала третє місце серед республік колишнього СРСР. На державному балансі корисних копалин України обліковано чотири родовища кварцитів (Дніпропетровська, Житомирська, Кіровоградська області) і одне – кварцитоподібних пісковиків (Сумська обл.). Сумарні запаси кварцитів категорій $A+B+C_1$ становлять 174 057 тис. т, категорії C_2 – 7 294 тис. т. На родовищі кварцитоподібних пісковиків запаси категорій $A+B+C_1$ оцінено в 9 579 тис. т, а C_2 – 299 тис. т. Прогнозні ресурси сировини цього типу становлять 2 505 млн т [5].

Кварцити формуються внаслідок метаморфізму осадових кварцових пісків і пісковиків, метаморфізму осадових і вулканогенно-осадових кременистих порід (яшм тощо), унаслідок кислого метасоматозу вулканічних, вулканогенно-осадових та інших порід (вторинні кварцити), метаморфізму деяких магматичних порід (кварцових порфірів та ін.). У природі найбільше поширені кварцити з осадових кварцових пісків і пісковиків, а інші трапляються спорадично.

За складністю геологічної будови, витриманістю й потужністю пластів, якістю сировини родовища кварцових пісковиків і кварцитів поділяють на три основні промислові групи [5]: 1) монолітні поклади з витриманою потужністю та якістю сировини (Овруцьке родовище в Житомирській обл.); 2) низка роз'єднаних покладів мінливої потужності та з різною якістю сировини; 3) поклади складної морфології з різко мінливими потужністю та якістю корисної копалини.

Овруцьке родовище кварцитів, відкрите 1936 р., представлене вузькою смугою завдовжки 100 км серед відкладів овруцької серії верхньопротерозойського віку. Корисною копалиною є рожеві кварцити товкачівської світи, що залягають у товщі, зім'ятій у пологі складки з кутом падіння переважно 2–3°. Кварцити складають потужні пласти, серед яких трапляються малопотужні прошарки й лінзи пірофілітових та пірофілітовмісних кварцитів і сланців. Вміст SiO_2 у кварцитах становить 96,0–98,7 %. Повна потужність покладів кварцитів сягає близько 900 м, а продуктивної пачки – 38–110 м за середньої потужності 70 м.

Унаслідок аварії на Чорнобильській АЕС родовище зазнало радіоактивного забруднення, як і розташовані поблизу Товкачівське і Білокоровицьке родовища кварцитів (залягають у подібній геологічній ситуації).

Певною компенсацією вибулих потужностей Овруцького родовища може бути Васильківське родовище в Дніпропетровській обл. Воно зосереджене в кварцитах темрюцької світи і представлене пластоподібним крутим покладом (залягає під кутом 50–55°), простеженим за простяганням до 2 км. Потужність пластів становить 100 м, перекривної товщі – 3–10 м. Кварцити світло-сірі й сірі, нерівномірнозернисті, з домішками альмандину і плагіоклазу. Середній вміст SiO_2 в них – до 96,0–96,5 %, FeO – не менше 2,0 %.

Іванівське родовище в Кіровоградській обл. (розташоване на орних землях) представлене крутоспадним пластом світлих кварцитів, що залягають у покрівлі товщі магнетитових кварцитів. Середня потужність пласта – 50–60 м за потужності покрівлі 24–68 м, а в найперспективнішій частині – до 40 м. Запаси підраховано до глибини 70 м: на першочерговій ділянці – близько 100 млн т кварцитів. Якість кварцитів невисока.

З Браницького родовища кварцито-пісковиків (Сумська обл.) постачали сировину на Дніпропетровський алюмінієвий завод для виробництва кристалічного кремнію ще з 1958 р. (по 20–30 тис. т у рік). У 1980–1984 рр. на родовищі виконано розвідку та переоцінку запасів як сировини особливого і першого сорту для виробництва кристалічного кремнію. Річний видобуток становив перші сотні тисяч тонн.

Родовище локалізоване в ДДЗ серед осадових піщаних товщ бучацької світи палеогену. Тут кварцито-пісковики утворюють невеликі поклади завдовжки до 2 км, які залягають горизонтально й мають пластову або лінзоподібну форму. Середня потужність покладів невелика (1–3 м), однак вона змінюється від 0,3 до 18,8 м. Вміст SiO_2 становить 98,4–99,8 %. Потужність перекривних порід – до 13 м.

Подібні тіла є й на інших ділянках, проте умови їхнього залягання складніші. Ліпшим серед них є Мацківське родовище кварцито-пісковиків, розташоване поблизу Браницького родовища; якість кварцитів і порядок запасів аналогічні. Однак складні умови залягання досі стримували його детальніше вивчення.

Ще низка перспективних об’єктів приурочена до Оріхово-Павлоградської шовної зони та розміщена в Овруцькому й Олевському районах Житомирської обл. Перспективна також Севастянівська площа в Південному Донбасі. Очікують відкриття нових родовищ якісних кварцитів у зоні зчленування Донбасу з Приазовським блоком УЩ.

З інших типів кварцової сировини в Україні найдетальніше вивчений кварц камерних пегматитів Волині та кришталеносних жил Донецького басейну [3]. Індивіди кварцу в слюдоносних, рідкіснометалевих і керамічних пегматитах, а також агрегати кварцу з рудоносних жил вивчені значно слабше.

Фактично мало дослідженим є кварц із жил Українського щита. Зокрема, немає сучасних даних, що стосуються мінерального складу жильних утворень, онтогенічних особливостей кварцових агрегатів, складу й розподілу елементів-домішок у кварці, у тім числі летких. Стан термобарогеохімічних досліджень жильного кварцу УЩ на тлі пегматитів украй незадовільний. Досі не з’ясовані чинники, які приводять до утворення великих товщ майже мономінерального кварцу, а тим паче фізико-хімічні умови формування покладів стерильного, без домішок, кварцу, що давало б змогу прогнозувати виявлення тіл, складених високоякісною сировиною.

У межах України докембрійська кварцова мінералізація пов’язана з кварцитами, пегматитами та переважно з мономінеральними гідротермальними жилами УЩ [3, 7]. Молодша мінералізація розвинута у Донецькому басейні, де основними є кварцові, кварц-анкеритові, кварц-сульфідні жильні утворення. Найбільші жили ті, що перерізають за

падінням вмісні породи: їхня довжина за простяганням становить декілька сотень метрів, потужність – декілька метрів. Потужність тіл змінюється від 0,1 до 0,5 м.

У межах УЩ серед гранітоїдів та споріднених з ними метаморфічних порід виявлено велику кількість гідротермально-метаморфогенних кварцових жил, більшість яких виходить на земну поверхню чи залягає на невеликій глибині. Запаси цих жил досить значні, проте їх майже не досліджено. За попередніми даними – прогнозними ресурсами та якістю сировини – найперспективнішими для вирішення проблем забезпечення сировиною є гідротермальні жили щита, серед яких найбільше відомі рудопрояви Ленчинський, Броніславський, Підраслівський, Гута-Бистрицький, Старогутинський, Сосновський (північний захід УЩ), Арсенівський (Інгуло-Інгулецький блок) та Скляна Гора (Приазовський блок). Вони заслуговують на першочергове проведення геологорозвідувальних робіт для підрахунку запасів і з'ясування якості сировини на глибині [3, 7].

Найперспективнішим з перелічених уважають Ленчинський рудопрояв, де розвинуті кварцові жили, пов'язані з гранітами осницького комплексу. Тіло розміром 90×50 м вивчене з поверхні, однак на глибину не обстежене. Кварц подекуди молочний, напівпрозорий до склоподібного. Структура кварцу гранобластова. Ресурси Ленчинського прояву становлять 585 тис. т.

Значні ресурси зосереджені також у Броніславському прояві, який представлений комплексом кварцових жил, розташованих у зоні різноорієнтованих розломів. Розмір жил – 50×20×20 м. Прогнозні ресурси тут оцінюють приблизно в 312 тис. т. Кварц здебільшого сірий, склоподібний, непрозорий або напівпрозорий.

Прояв Арсенівський локалізований серед біотитових рапаківіподібних гранітів Корсунь-Новомиргородського плутону. Його протяжність сягає 700 м, глибина – до 50 м. Кварц сірий, ясно-сірий, слабко прозорий, розмір зерен – до 1,5 мм. Як включення діагностовано мусковіт, циркон, монацит, анатаз, апатит, рутил, ільменіт, гранати, сульфіди. Перспективи прояву виявляться після попереднього збагачення. Прогнозні ресурси становлять 2 100 тис. т.

Найбільший у Приазов'ї рудопрояв Скляна Гора представлений великою кварцовою жилою, яку за простяганням простежено на 500 м за середньої потужності 50 м. Кварц містить включення польових шпатів, турмаліну, мусковіту. Прогнозні ресурси оцінено в перші мільйони тонн.

Головним висновком дослідників описуваного типу руд є те, що кварцова сировина в надрах України є, проте її не розвідано, недостатньо й нерівномірно вивчено. Значні перспективи пов'язані з гідротермальними жилами трьох рудопроявів УЩ.

Можливість отримання кремнію з базит-ультрабазитових масивів Капітанівського рудного поля (Голованівська шовна зона). Одними з перспективних об'єктів України на кремній є базит-ультрабазитові масиви (хоча звучить це дуже дивно, оскільки традиційно кремній із серпентинітів не добувають) Капітанівського рудного поля, яке розміщене в центральній частині Побузького рудного району. Масиви складені апоперидотитовими й аподунітовими серпентинітами, серпентинізованими дунітами і перидотитами, піроксенітами, хромітовими рудними тілами і габро-амфіболітами; тіла мають пластоподібну, ізометричну, лінзоподібну форму. Довжина масивів за простяганням змінюється від 150 до 5 000 м, ширина – від 20 до 1 000 м, потужність – від кількох десятків до 1 000 м [4]. У масивах зосереджені такі руди, як хромітові, силікатного нікелю та комплексні магнієві [4].

Ми виконали мінералогічне дослідження хромітових і магнієвих комплексних руд, мікрозондовий аналіз рудних мінералів, статистично-математичне опрацювання отриманого й опублікованого фактичного матеріалу, побудували геологічні розрізи і плани певних зрізів досліджуваної території та геолого-економічні моделі з підрахунком ресурсів та оцінкою комплексних руд базит-ультрабазитових масивів Капітанівського рудного поля.

Магнієві руди, представлені аподунітовими серпентинітами, достатньо перспективні з огляду на їхню комплексність. З них, крім власне магнію, раціонально отримувати чистий кремнезем, оксид заліза, нікель-кобальтовий концентрат, благородні метали [1]. Вміст кремнезему в серпентинітах становить 35,3 %.

За технологічною схемою переробки серпентинітів з вилученням оксиду магнію, розробленою грузинськими науковцями в середині XX ст. [2] і вдосконаленою сьогодні російськими й канадськими вченими, як важливий супутній компонент можливо вилучати аморфний двоокис кремнію і далі переробляти його на чистий кремнезем, придатний для виготовлення сонячних елементів (див. рисунок).

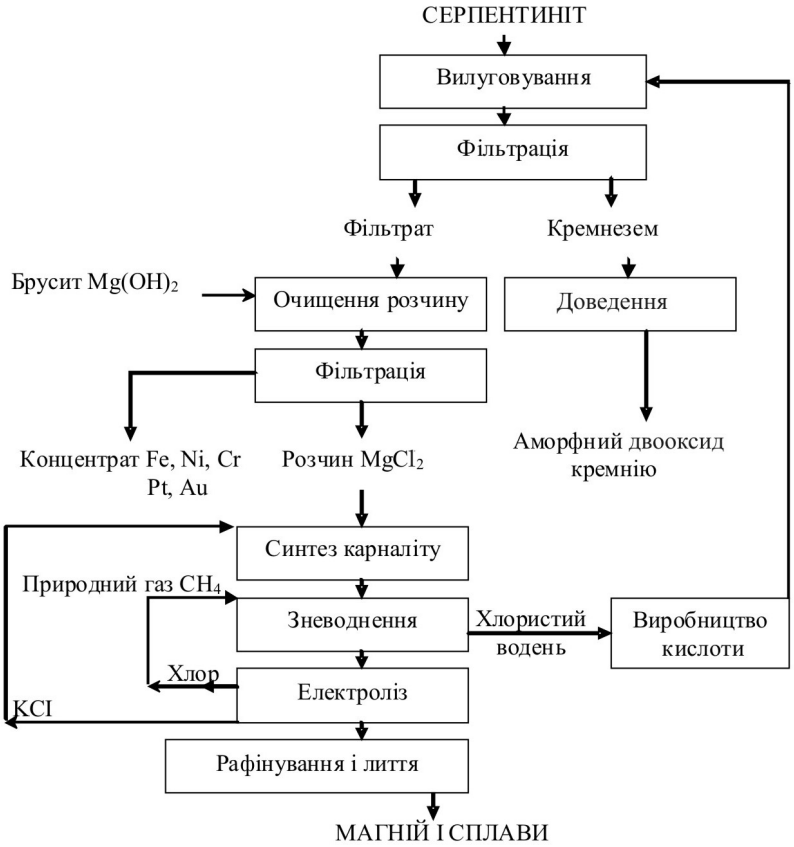
Унаслідок переробки серпентиніту в середньому 50 % породи залишається у вигляді відходів, що є порошком сіруватого кольору з високим вмістом водного кремнезему ($SiO_2 \cdot nH_2O$). Вміст SiO_2 у кремнеземистих відходах сягає 75–80 %, а водного кремнезему – 90–97 %.

Важливим є той факт, що активний кремнезем у відходах становить у середньому 90 % від загального вмісту кремнезему. Крім SiO_2, у кремнеземистих відходах наявні, %: Fe_2O_3 – 3,6–4,0; MgO – 6,8–7,2; NiO – 0,20–0,04; CoO – 0,0010–0,0015; CaO, Al_2O_3 – до 1 % [1].

У 2006 р. Державний науково-дослідний і проектний інститут основної хімії "НІОХІМ" (м. Харків) провів технологічні дослідження серпентинітів південної частини Капітанівського родовища з метою отримання оксиду магнію, однак, на жаль, подальших технологічних досліджень з вилучення супутніх корисних компонентів не виконано (фінансування проекту призупинено). Сьогодні оксид магнію і додаткові супутні компоненти (зокрема кремній) успішно вилучають на підприємстві Magnola Metallurgy Inc. (Канада); у Росії запроектовано побудувати завод з вилучення оксиду магнію і додаткових компонентів з серпентинітів на підприємстві "Уралазбест".

Проблеми реалізації проектів з використання вітчизняної сировини для одержання кремнію, можливі способи вирішення проблем галузі та далекі перспективи. Як засвідчує аналіз наявних ресурсів вітчизняних родовищ та рудопроявів, за наявних загальних обсягів сировини оцінка їхньої якості досить неоднозначна. Передбачене названою вище концепцією розвитку галузі геолого-технологічного забезпечення промислового освоєння родовищ кварцової сировини сьогодні не має нормативно-правових основ.

Незважаючи на наявність загальних ресурсів в обсягах, здатних забезпечити стартовий етап освоєння родовищ і підтримувати їхні розробки тривалий час, наявні об'єкти з огляду на давність і недостатність виконаних раніше геологорозвідувальних робіт не дають достатньої характеристики кількості та якості сировини для сучасних процесів одержання кремнію.



Технологічна схема переробки серпентиніту [11].

Уважаємо, що потрібна докорінна переоцінка геологічної інформації щодо геологічної будови об'єктів та визначення запасів на більшості з них. Там же, де картина однозначна і можливе промислове освоєння сировини, необхідно провести комплекс досліджень для оцінки якості руд у послідовності, детальності та стадійності, яка наведена вище на прикладі норвезьких родовищ. Украй необхідне мінералогічне вивчення вихідного матеріалу і проведення експериментальних плавок для вибору оптимальних схем переробки сировини.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Бочевар Р. О. Геолого-економічна оцінка магнезійних руд та перспективи освоєння Капітанівського родовища / Р. О. Бочевар, Л. М. Коденко // Вісн. Київ. нац. ун-ту імені Тараса Шевченка. Сер. геологія. – 2012. – № 56. – С. 33–36.
2. Гаприндашвили В. Н. Комплексная переработка серпентинитов / В. Н. Гаприндашвили. – Тбилиси, 1970. – 208 с.

3. Жильний кварц України: мінералогічна характеристика перспективних рудопроявів / В. І. Павлишин, Д. К. Возняк, Ю. А. Галабурда [та ін.] // Минерал. журн. – 2001. – № 23 (1). – С. 11–22.
4. Лепігов Г. Д. Капітанівське родовище нікелевих і хромітових руд / Г. Д. Лепігов, А. П. Василенко // Мін. ресурси України. – 1996. – № 4. – С. 18–19.
5. Металічні і неметалічні корисні копалини України. Т. 2. Неметалічні корисні копалини / [Д. С. Гурський та ін.]. – К.; Львів : Центр Європи, 2006. – 552 с.
6. Немчинова Н. В. Кремний в XXI веке / Н. В. Немчинова, В. Э. Клёц, А. И. Непомнящих // Фундамент. исследования. – 2006. – № 12. – С. 13–16.
7. Черниш Д. С. Мінералогія перспективних рудопроявів жильного кварцу Українського щита : автореф. дис. ... канд. геол. наук / Д. С. Черниш. – К., 2003. – 22 с.
8. High-grade silica refined from diatomaceous earth for solar-grade silicon production / Masahiko Bessho, Yasuhiro Fukunaka, Hiromu Kusuda [et al.] // Energy Fuels. – 2009. – Vol. 23, N. 8. – P. 4160–4165.
9. Hubbert M. K. Oil and gas supply modeling / M. K. Hubbert // U.S. Department of Commerce National Bureau of Standards. – 1982. – Vol. 631. – 90 p.
10. In situ analysis of trace elements in quartz by using laser ablation inductively coupled mass spectrometry / B. Flem, R. B. Larsen, A. Grimstvedt, J. Mansfeld // Chem. Geol. – 2002. – Vol. 182. – P. 237–247.
11. Müller A. Trace elements and growth patterns in quartz: a fingerprint of the evolution of the subvolcanic Podlesí Granite System (Kruone Hory, Czech Republic) / A. Müller, A. Kronz, K. Breiter // Bull. Czech Geol. Surv. – 2002. – Vol. 77, N 2. – P. 135–145.

Стаття: надійшла до редакції 05.06.2013
прийнята до друку 19.06.2013

POTENTIAL OF SILICON RESOURCES IN UKRAINE AND POSSIBILITIES OF DOMESTIC SILICON UTILIZATION IN RENEWABLE ENERGY

V. Guliy[1], R. Bochevar[2]

[1]*Ivan Franko National University of Lviv,*
4, Hrushevskyi St., 79005 Lviv, Ukraine
E-mail: vgul@ukr.net
[2]*Taras Shevchenko National University of Kyiv,*
90, Vasylkivska St., 01022 Kyiv, Ukraine
E-mail: ruslana-kra@ukr.net

Recovering of world fossil fuel-energetic resources has been reduced because their exhaustion, and therefore today exploration and development new sources of energy are very important. Renewable energy became more important and slowly reduces sources of traditional energy. Number of countries started programs to make bigger amount of different sources of renewable energies including solar energy. In this article authors give estimation of resources potential of native silicon of Ukraine for manufacture of solar elements by own industry.

Authors made analysis of world tendencies of utilization of solar energy, low limits which regulate utilization of different sources of energy in Ukraine, main sources of obtaining of silicon. It has been compared different methods of silicon producing as well estimated of resources for manufacturing of silicon in Ukraine. Results of detail mineralogical, petrographic, technological investigations of magnesium ores of basic-ultrabasic massifs of Kapitanivske ore field as a possible source of silicon after reworking of such ores are given in the article. Authors determined main directions of producing of cheap "solar" silicon and suggested perspective objects for such purposes in Ukraine. Possible volumes of the silicon from basic-ultrabasic massifs of Kapitanivske ore field have been calculated and determined of admixtures, which are important for quality of final products.

Taking into consideration these investigation authors made conclusions about necessity to do additional studying of geological structure and estimation of quality of separate kind of ores for perspective on "solar" silicon objects in Ukraine.

Key words: renewable energy, silicon, resources, deposit, complex ores, technological scheme of ore reworking, Ukraine.

РЕСУРСНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ КРЕМНИЯ В УКРАИНЕ И ВОЗМОЖНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОТЕЧЕСТВЕННОГО КРЕМНИЯ В ВОЗОБНОВЛЯЕМОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ

В. Гулий[1], Р. Бочевар[2]

[1]*Львовский национальный университет имени Ивана Франко,*
ул. Грушевского, 4, 79005 Львов, Украина
E-mail: vgul@ukr.net
[2]*Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко,*
ул. Васильковская, 90, 01022 Киев, Украина
E-mail: ruslana-kra@ukr.net

Извлечение мировых ископаемых топливно-энергетических ресурсов будет сокращаться из-за их истощения, поэтому сегодня важным является поиск и внедрение новых источников энергии. Возобновляемая энергетика набирает все большего значения, постепенно вытесняя источники традиционной энергии. В ряде стран существуют программы увеличения объемов использования разных возобновляемых источников энергии, в том числе солнечной. В настоящей статье приведена оценка вероятного ресурсного потенциала природного кремния Украины для изготовления солнечных элементов отечественной промышленностью.

Проанализировано мировые тенденции использования солнечной энергии, нормативно-правовые акты, которые регулируют использование разных источников энергии в Украине, основные источники для получения кремния. Проведено сравнение методов получения кремния и оценено ресурсную базу для производства кремния в Украине.

Приведены результаты детальных минералогических, петрографических, технологических исследований магниевых руд базит-ультрабазитовых массивов Капитановского рудного поля, как вероятного источника получения кремния в качестве попутного компонента при переработке руд. Определены основные направления производства дешевого "солнечного" кремния и указаны перспективные объекты на кремний в Украине. Подсчитаны возможные объемы получения кремния из базит-ультрабазитовых массивов Капитановского рудного поля и определены примеси, которые влияют на качество конечного продукта.

На основании проведенной работы выявлено, что на перспективных объектах Украины на “солнечный” кремний нужны дополнительные исследования геологического строения и оценки качества отдельных типов руд.

Ключевые слова: возобновляемая энергетика, кремний, ресурсы, месторождение, комплексные руды, технологическая схема переработки руды, Украина.