

ӨОЖ 550.84
ҒТАХР 44.09.37

<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2026-23-3-565-572>

¹Нұрбекова Р.Н.,

PhD, ORCID ID: 0000-0001-7804-3949,

e-mail: riza.nurbekova@nu.edu.kz

¹Хазлетт Р.,

PhD, профессор, ORCID ID: 0000-0003-2058-8406,

e-mail: randy.hazlett@nu.edu.kz

^{1,2}Фустич М.,

PhD, қауымдастырылған профессор, ORCID ID: 0000-0001-9815-9279,

e-mail: milovan.fustic@nu.edu.kz

¹Салаудин И.,

PhD, ORCID ID: 0009-0008-2015-8629,

e-mail: ibraheem.salaudeen@nu.edu.kz

¹Қайратова А.,

Бакалавр студенті,

e-mail: a.kairatova@nu.edu.kz

¹Тау-кен ісі және жер туралы ғылымдар мектебі, Назарбаев Университеті,
Астана қ., Қазақстан

²Геоғылымдар департаменті, Калгари университеті, Калгари қ., Канада

ҚАЗАҚСТАНДАҒЫ ТАЗА ЭНЕРГИЯ ӨНДІРУ ЖӘНЕ КӨМІРҚЫШҚЫЛ ГАЗЫН АЗАЙТУ ЖОЛЫ: НЕГІЗДІ ЖӘНЕ УЛЬТРАНЕГІЗДІ ЖЫНЫСТАРДЫ СУТЕГІ ӨНДІРУ МЕН КӨМІРҚЫШҚЫЛ ГАЗЫН СЕКВЕСТРЕУГЕ ПАЙДАЛАНУ

Аңдатпа

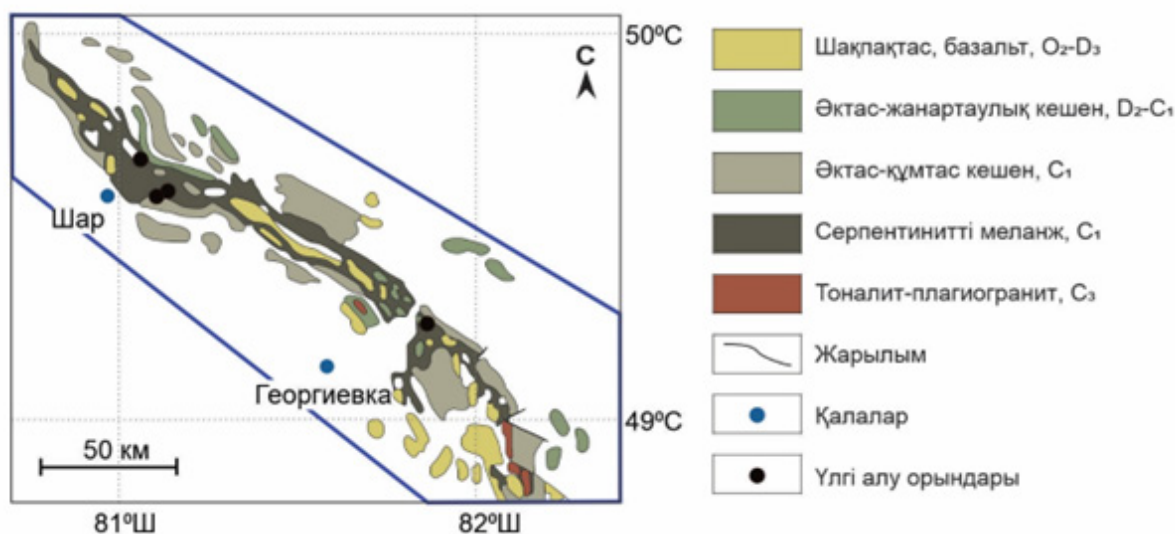
Көмірқышқыл газын (CO_2) ұзақ мерзімге геологиялық ортада сақтау және табиғи сутегі (H_2) сияқты төмен көміртекті энергия көзін игеру көміртегі бейтараптығына өтуге бағытталған зерттеулердің маңызды бөлігіне айналды. Негізді және ультранегізді жыныстар бұл тұрғыдан ерекше қызығушылық тудырады, себебі олардың минералдық құрамы CO_2 -нің карбонат минералдары түрінде байланысуына және H_2 түзілуіне жағдай жасай алады. Дегенмен, бұл екі процестің бір жыныс жүйесінде қалай қатар жүретіні және олардың минералдық құрамға тәуелділігі жеткілікті зерттелмеген. Осы жұмыста Шығыс Қазақстандағы Шар офиолиттік тігіс аймағы мен Батыс Қазақстандағы Кемпірсай ультранегізді массивінен алынған негізді және ультранегізді жыныстар зерттелді. Зерттеу нәтижелері көрсеткендей CO_2 газының минералдану жылдамдығы серпентинге бай ультранегізді үлгілердің құрамында лизардит минералының еруінен бөлінетін Mg^{2+} мөлшеріне тікелей байланысты. Ал магнезиохромит минералының мөлшері жоғары болған үлгілерде реакциядан кейінгі жалпы көміртек мөлшері аз ғана пайызды құрады. H_2 түзілуінің ең жоғары мөлшері Шар аймағының U-2C ультранегізді үлгісінде (0,872 мол.%) және M-1C негізді үлгісінде (0,721 мол.%) байқалды. Кемпірсай массивінен алынған үлгілердің кейбірінде ғана өте аз мөлшерде H_2 тіркелді. CO_2 -нің минералдық байланысуы Mg құрамды фазалардың реакциясымен тығыз байланысты болса, H_2 түзілуінде реакцияға қабілетті Fe құрамды минералдардың рөлі басым болды. Осы айырмашылықтарды ескеру Қазақстандағы офиолиттік кешендерді CO_2 минералдық сақтау және табиғи H_2 іздеу тұрғысынан бағалауда маңызды.

Түйін сөздер: ультранегізді жыныстар, серпентиндену, сутегі, көмірқышқыл газы, минералдану.

Кіріспе

Антропогендік CO_2 шығарындыларын азайту көміртегі бейтараптығына қол жеткізудің негізгі міндеттерінің бірі. Бұл бағытта CO_2 -ні геологиялық ортада ұзақ мерзімге сақтау және H_2

сияқты төмен көміртекті энергия көздерін дамыту қатар қарастырылуда. Осы тұрғыдан негізді және ультранегізді тау жыныстары әлемдік ғылыми қауымдастықтың ерекше қызығушылығын тудырып отыр [1–11]. Ультранегізді тау жыныстарында Ca^{2+} , Mg^{2+} және Fe^{2+} көп кездеседі, ал олардың оксидтері жыныс массасының әдетте 45%-дан астамын құрайды. Мұндай құрам CO_2 -нің тұрақты карбонат минералдары түрінде байланысуына қолайлы [1–5]. Алғашқы зерттеулерде ультранегізді жыныстар өткізгіштігі төмен болғандықтан негізгі жыныстарға қарағанда CO_2 газын геологиялық сақтау нысаны ретінде азырақ қарастырылды [6–7]. Кейінірек бұл жыныстарда табиғи H_2 түзілу мүмкіндігі ашылып, оларға деген қызығушылық артты [3–5, 8–21]. Бұған табиғи мысал ретінде Омандағы H_2 табиғи шығуы тіркелген Семаил офиолитін, Ресейдің Орал белдеуін және оның жалғасын, батыс Қазақстандағы Кемпірсай ультранегізді массивін келтіруге болады [16–17, 22–24]. LISZT және ICDP бұрғылау жобалары бұл бағыттағы маңызды зерттеулердің бірі болып табылады [4]. Далалық бақылаулар [4, 16–17, 22–23], зертханалық тәжірибелер [3, 5, 12–13, 15, 21] және геохимиялық модельдеу [8, 10–11, 14] ультранегізді жыныстардың гидратациясы кезінде тұрақты карбонатты минералдар түрінде CO_2 байланысуымен бірге H_2 түзілетінін көрсетті. Осы нәтижелерге сүйене отырып, бұл жұмыста Шығыс Қазақстандағы Шар офиолиттік тігіс аймағының (1-сурет) және Батыс Қазақстандағы Кемпірсай ультранегізді массивінің негізді және ультранегізді жыныстарын зерттеу қарастырылған. Жоғары қысымды CO_2 -су-тау жыныс эксперименттері XRD, SEM-EDS, ICP-OES, GC және жалпы көміртегі (TC) талдауларымен бірге жүргізілді. Зерттеудің негізгі мақсаты тау жыныстарының минералды ерекшеліктерін CO_2 минералдануымен және H_2 түзілуімен салыстыру, осы екі процестің бір геологиялық жүйеде қалай жүретінін бағалау.



Сурет 1 – Шар офиолиттік тігіс аймағының жеңілдетілген геологиялық картасы.
Негізгі литологиялық бірліктер мен сынама алынған нүктелер
көрсетілген ([25] бойынша).

Материалдар мен әдістер

Зерттеуде Шығыс Қазақстандағы Шар офиолиттік тігіс аймағынан алынған негізді және ультранегізді жыныстар, сондай-ақ Батыс Қазақстандағы Кемпірсай ультранегізді массивінің бұрғылау ұңғымасынан алынған керн үлгілері пайдаланылды. Үлгілер Retsch MM 400 (Германия) зертханалық диірменінде <25 мкм дейін ұнтақталды. Негізгі элементтік құрам Rigaku ZSX Primus II рентгендік-флуоресценттік спектрометрінде (XRF), минералдық құрам Bruker D2 Phaser (Германия) рентгендік дифрактометрінде (XRD, $\text{Cu-K}\alpha$, $\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$) анықталды. Минералдық фазалар DIFFRAC.EVA бағдарламасымен сәйкестендіріліп, олардың салыстыр-

малы мөлшері TOPAS бағдарламасында есептелді. Меншікті бет ауданы Autosorb iQ (Anton Paar) анализаторында BET әдісімен анықталды.

CO₂–сү–жыныс тәжірибелері 300 мл Рагг жоғары қысымды реакторында жүргізілді. Әр тәжірибеге 1,5 ± 0,05 г жыныс ұнтағы және 100 мл 0,64 M NaHCO₃ + 1 M NaCl ерітіндісі алынды. Реактор вакуумдалып, CO₂ бастапқы қысымы 800 psia-ға жеткізілді. Тәжірибелер 80 және 160–200 °C температурада 7 тәулік жүргізілді.

Реакциядан кейінгі қатты фазалар XRD және ZEISS Crossbeam 540 (Германия) SEM–EDS көмегімен зерттелді. Жалпы көміртек мөлшері UNICUBE (Elementar, Германия) элементтік анализаторында, ерітіндідегі элементтер Thermo Scientific iCAP 6300 DUO ICP–OES спектрометрінде анықталды. H₂ мөлшері Agilent 8890 газ хроматографында (GC) өлшеніп, концентрациясы сертификатталған газ қоспалары бойынша құрылған калибрлеу қисықтары арқылы есептелді.

Нәтижелер мен талқылау

XRF талдауы бойыншы Кемпірсай массиві мен Шар офиолиттік тігіс аймағынан алынған негізді және ультранегізді жыныстардың химиялық құрамында олардың литологиялық ерекшеліктеріне сәйкес айқын айырмашылықтар бар (1-кесте). Кемпірсайдың ультранегізді жыныстарында MgO мөлшері 38,3–51,3 мас.% аралығында өзгерсе, SiO₂ мөлшері 25,6–43,9 мас.% болды. Fe₂O₃ бойынша айырмашылық айтарлықтай үлкен емес (5,8–7,6 мас.%); CaO мен Al₂O₃ мөлшері де жалпы төмен. Бұл қатарда U-4K үлгісінің құрамы өзгеше: Cr₂O₃ мөлшері 25,1 мас.%-ға жетеді. Кейінгі XRD нәтижелері бұл ерекшеліктің үлгідегі магнезиохромиттің жоғары мөлшерімен байланысты екенін көрсетті.

Шар офиолиттік тігісінің ультранегізді U-1C және U-2C үлгілерінде MgO мөлшері бір-біріне жақын, тиісінше 36,5 және 36,7 мас.%. SiO₂ мөлшері де үлкен айырмашылық көрсетпейді (39,3–40,2 мас.%). Кемпірсай үлгілерімен салыстырғанда Fe₂O₃ жоғарырақ және 8,4–10,7 мас.% аралығында өзгереді. M-1C және M-2C негізді үлгілерінің құрамы басқа: SiO₂ 50,6–55,3 мас.%-ға дейін жоғарылайды, ал MgO 19,3–29,8 мас.% құрайды. M-1C үлгісіндегі CaO мөлшерінің 11,09 мас.% болуы да оны қалған үлгілерден ажыратады.

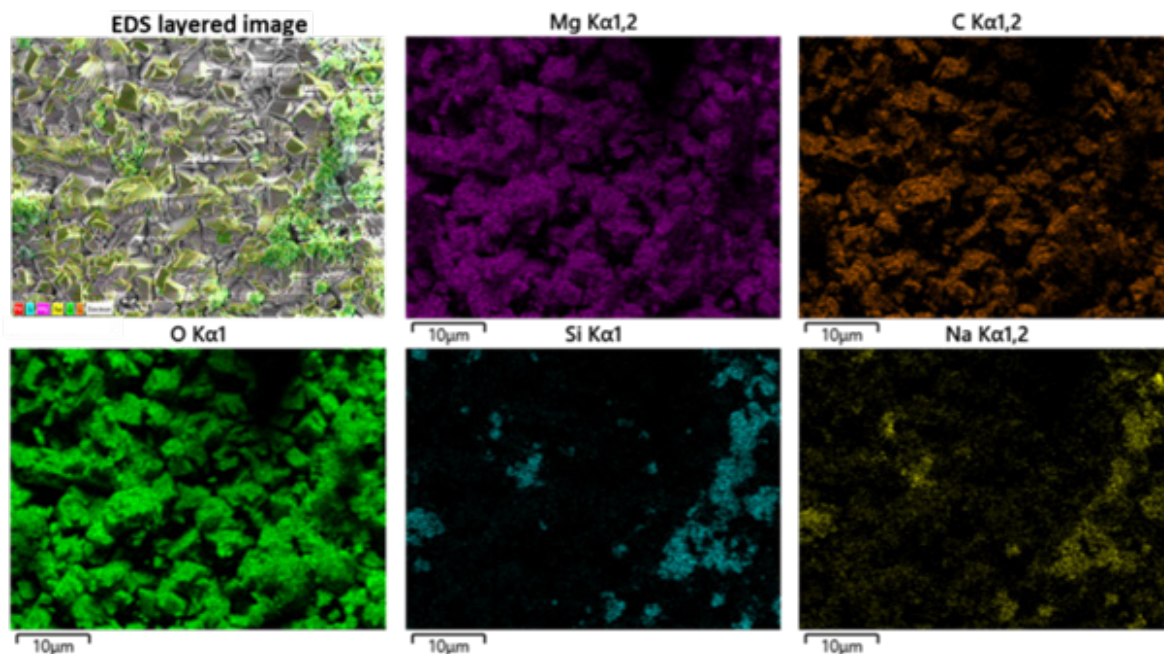
XRD талдауы бұл химиялық айырмашылықтардың минералдық құрамда қалай көрінетінін анықтауға мүмкіндік берді. Кемпірсай үлгілеріндегі ең көп таралған минерал лизардит, оның мөлшері 59,5 пен 83,7% аралығында. Хризотил мен брусит аз мөлшерде кездеседі. U-4K үлгісінде магнезиохромит жалпы құрамның 50,7%-ын, ал лизардит 39,1%-ын құрайды. Шардың U-1C және U-2C ультранегізді үлгілерінде лизардит мөлшері жоғары, 91,5 пен 97,2 мас.% аралығында. Мұндай құрам жыныстардың жоғары дәрежеде серпентинденгенін көрсетеді. Негізді үлгілер өзара да бірдей емес. M-1C құрамында тремолит басым, ал M-2C үлгісінің 85,6 мас.%-ын лизардит құрайды және аз мөлшерде тридимит кездеседі. Сондықтан келесі тәжірибелердің нәтижелерін тек «негізді–ультранегізді» айырмашылығы бойынша емес, әр үлгінің нақты минералдық құрамымен бірге қарастырған дұрыс.

Кесте 1 – Зерттелген тау жыныстары үлгілерінің химиялық құрамы (мас.%)

Үлгі	MgO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	Cr ₂ O ₃	MnO	Co ₂ O ₃	NiO	P ₂ O ₅	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂
U-1K	46.50	43.90	7.60	0.68	0.08	0.32	0.13	0.03	0.25	0.03	0.34	0.00	0.00	0.00
U-2K	50.00	42.10	5.81	0.34	0.51	0.41	0.10	0.03	0.36	0.03	0.24	0.00	0.00	0.00
U-3K	51.30	40.30	6.25	0.28	0.12	0.32	0.10	0.04	0.39	0.03	0.83	0.00	0.00	0.00
U-4K	38.30	25.60	5.83	3.15	0.41	25.10	0.83	0.04	0.22	0.04	0.31	0.00	0.00	0.00
U-1C	36.47	39.29	8.43	0.60	1.05	0.00	0.07	0.00	0.00	0.007	0.00	0.026	0.007	0.000
U-2C	36.69	40.16	10.69	0.29	0.13	0.00	0.06	0.00	0.00	0.004	0.00	0.033	0.005	0.006
M-1C	19.27	55.27	8.24	2.63	11.09	0.00	0.31	0.00	0.00	0.011	0.00	0.917	0.137	0.043
M-2C	29.79	50.60	8.01	0.33	0.31	0.00	0.18	0.00	0.00	0.005	0.00	0.031	0.012	0.001

Ескерту: Үлгі кодтары жыныс түрі мен алынған орнын білдіреді. U, ультранегізді; M, негізді; C, Шар офиолиттік тігісі; K, Кемпірсай массиві.

Экспериментке дейін барлық үлгілердегі жалпы көміртек (ТС) мөлшері анықтау шегінен (<50 ppm) төмен болды. Сондықтан реакциядан кейінгі ТС мөлшерінің артуын тәжірибе барысында CO_2 -нің минералдық формада байланысуымен байланыстыруға болады. Алайда бұл өзгеріс барлық үлгілерде бірдей болған жоқ.



Сурет 2 – Кемпірсай массивінен алынған реакциядан кейінгі ультранегізді UM1 үлгісінің SEM–EDS қабаттасқан кескіні және Mg, C, O, Si мен Na элементтерінің таралу карталары. Жаңадан түзілген минералдық агрегаттарда Mg, C және O элементтерінің бірге шоғырлануы тәжірибелік CO_2 минералдануы барысында екінші реттік магнетиттің түзілгенін көрсетеді.

Кемпірсай жыныстарының ішінде ең жоғары ТС мөлшері U-1K үлгісінде анықталып, 1,56 мас.% құрады. U-2K және U-3K үлгілерінде бұл көрсеткіш тиісінше 1,01 және 0,64 мас.% болды. Ал магнезиохромит мөлшері жоғары U-4K үлгісінде ТС небәрі 0,27 мас.%-ға жетті. Яғни Кемпірсай үлгілерінің өзінде карбонаттану дәрежесі минералдық құрамға байланысты айтарлықтай өзгерді. Әсіресе лизардитке бай үлгілер мен магнезиохромит басым U-4K арасындағы айырмашылық анық байқалады.

Шар офиолиттік тігісінің үлгілерінде ТС мөлшерінің өсуі негізінен ультранегізді U-1C және U-2C жыныстарында ғана байқалды. Реакциядан кейін олардың ТС мөлшері сәйкесінше 0,45 және 0,56 мас.% болды. Негізгі үлгілерде тұрақты карбонаттардың түзілуі анықталған жоқ. Бұл бақылаулар XRD және SEM–EDS нәтижелерімен де расталды (2-сурет). ICP–OES нәтижелерін талдау кезінде байқалатын басты ерекшелік-жоғары карбонаттылығы бар үлгілерде реакциядан кейін ерітіндідегі Mg концентрациясы да жоғары болады. нәтижелерін талдағанда, басты байқалған ерекшелік ол карбонаттануы жоғары үлгілерде реакциядан кейінгі ерітіндіде Mg концентрациясының да жоғары болуы. Лизардит минералының еруін оның негізгі көзі ретінде қарастыруға болады.

H_2 түзілуі CO_2 минералдануы қарқынды жүретін үлгілермен сәйкес келмеді және оның түзілуі тек 160–200°C температурада жүргізілген тәжірибелерде ғана байқалды. H_2 -нің ең жоғары мөлшері U-2C ультранегізді және M-1C негізді жыныстарында тіркелді (2-Кесте). Кемпірсай Массивінен алынған үлгілерде H_2 мүлде түзілмеді немесе өте аз мөлшерде анықталды. Осы нәтижелерге қарап, H_2 түзілуін тек литологиялық тау жыныстарымен байланыстыруға болмайды. ICP–OES нәтижелері бойынша реакциядан кейінгі ерітінділер құрамындағы Fe концентрациясы H_2 түзілуіне тікелей байланысты.

Кесте 2 – Газдық карбонаттандыру тәжірибелері нәтижесінде алынған газ өнімдерінің мольдік құрамы (мол.%)

Үлгі	CO ₂	H ₂	N ₂
U-1C	99.779	0.221	n.d.
U-2C	98.788	0.872	0.034
M-1C	99.279	0.721	n.d.
M-2C	99.770	0.219	0.011
U-1K	99.989	0.011	n.d.
U-2K	99.989	0.011	n.d.
U-3K	98.876	n.d.	1.124
U-4K	99.880	n.d.	0.120

Жыныстардың CO₂ минералдануы мен H₂ түзілуі әрдайым олардың литологиялық тобына сәйкес өзгерген жоқ. Бір топқа енгізілген үлгілердің өзінде реакциялық белсенділік әр түрлі болды. Мұнымен қоса, негізді M-1C үлгісінде H₂ мөлшерінің жоғары болуы бұл процестің ультраанегізді жыныстармен ғана шектелмейтінін байқатады. Жалпы зерттелген офиолиттік кешендердің CO₂ газын минералдандыру және H₂ түзу қабілеті жоғары және мұндай бағыттарда қолдану үшін әр жыныстың минералдық құрамын жеке қарастыру қажет.

Қорытынды

Бұл жұмыста Шар офиолиттік тігісі мен Кемпірсай массивінен алынған негізді және ультраанегізді тау жыныстарының CO₂ газын минералдандыру және H₂ түзу қабілеттері зерттелді. CO₂ газын минералдандыру қарқыны Кемпірсай массивінен алынған серпентинге бай ультраанегізді үлгілерде ерекше. Зерттеуден кейінгі жалпы көміртек мөлшері мұндай үлгілерде 1,56 мас.%-ға дейін жетеді. Ал магнезиохромит минералының мөлшері жоғары болған үлгілерде жалпы көміртек мөлшері 0,27 мас.% ғана құрады. Шар үлгілерінің ішінде карбонаттану лизардит минералына бай ультраанегізді жыныстарда ғана байқалды. H₂ түзілуінің ең жоғары мөлшері Шар аймағының U-2C ультраанегізді үлгісінде (0,872 мол.%) және M-1C негізді үлгісінде (0,721 мол.%) байқалды. Кемпірсай массивінен алынған үлгілердің кейбірінде ғана өте аз мөлшерде H₂ тіркелді. Кейбір негізді жыныстарда H₂ мөлшерінің жоғары болуы бұл процестің ультраанегізді жыныстармен ғана шектелмейтінін байқатады. Зерттеу нәтижелері Қазақстандағы офиолиттік кешендердің CO₂ газын минералдандыру және H₂ түзу қабілеті жоғары екенін және мұндай бағыттарда қолдану үшін әр жыныстың минералдық құрамын жеке қарастыру қажеттілігін айқындады.

Қаржыландыру туралы ақпарат

Зерттеу AP26102813 жобасы аясында Қазақстан Республикасының Ғылым және жоғары білім министрлігі Ғылым комитетінің қаржыландыруымен жүргізілді.

ӘДЕБИЕТТЕР

- 1 Matter, J.M., and Kelemen, P.B. Permanent storage of carbon dioxide in geological reservoirs by mineral carbonation. *Nature Geoscience*, 2 (12), 837–841 (2009). <https://doi.org/10.1038/ngeo683>
- 2 Oelkers, E.H., Gislason, S.R., and Matter, J. Mineral carbonation of CO₂. *Elements*, 4 (5), 333–337 (2008). <https://doi.org/10.2113/gselements.4.5.333>
- 3 Osselin, F., Pichavant, M., Champallier, R., Ulrich, M., and Raimbourg, H. Reactive transport experiments of coupled carbonation and serpentinization in a natural serpentinite: Implication for hydrogen

production and carbon geological storage. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 318, 165–189 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.gca.2021.11.039>

4 Godard, M., Gouze, P., Pascale, B., Martinez, I., Escario, S., Decrausaz, T., Leprovost, R., Roubinet, D., and Pézard, P. In Situ CO₂ Mineralization in Mantle-Derived Ultramafic Basements: Insights from Laboratory Experiments and Field Studies (Oman Ophiolite). *SSRN Electronic Journal* (2022). <https://doi.org/10.2139/ssrn.4285227>

5 Kularatne, K., Sissmann, O., Kohler, E., Chardin, M., Noirez, S., and Martinez, I. Simultaneous ex-situ CO₂ mineral sequestration and hydrogen production from olivine-bearing mine tailings. *Applied Geochemistry*, 95, 195–205 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2018.05.020>

6 Gislason, S.R., Wolff-Boenisch, D., Stefansson, A., Oelkers, E.H., Gunnlaugsson, E., Sigurdardottir, H., Sigfusson, B., Broecker, W.S., Matter, J.M., and Stute, M. Mineral sequestration of carbon dioxide in basalt: A pre-injection overview of the CarbFix project. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 4 (3), 537–545 (2010). <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2009.11.013>

7 Gislason, S.R., Sigurdardóttir, H., Aradóttir, E.S., and Oelkers, E.H. A brief history of CarbFix: Challenges and victories of the project's pilot phase. *Energy Procedia*, 146, 103–114 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.07.014>

8 McCollom, T.M., and Bach, W. Thermodynamic constraints on hydrogen generation during serpentinization of ultramafic rocks. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 73 (3), 856–875 (2009). <https://doi.org/10.1016/j.gca.2008.10.032>

9 Gadikota, G. Multiphase carbon mineralization for the reactive separation of CO₂ and directed synthesis of H₂. *Nature Reviews Chemistry*, 4 (2), 78–89 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41570-019-0158-3>

10 Klein, F., Bach, W., and McCollom, T.M. Compositional controls on hydrogen generation during serpentinization of ultramafic rocks. *Lithos*, 178, 55–69 (2013). <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2013.03.008>

11 Ely, T., Leong, J., Canovas, P., and Shock, E. Huge variation in H₂ generation during seawater alteration of ultramafic rocks. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 24 (3), e2022GC010658 (2023). <https://doi.org/10.1029/2022GC010658>

12 Wang, J., Watanabe, N., Okamoto, A., Nakamura, K., and Komai, T. Enhanced hydrogen production with carbon storage by olivine alteration in CO₂-rich hydrothermal environments. *Journal of CO₂ Utilization*, 30, 205–213 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2019.02.008>

13 Miller, H.M., Mayhew, L.E., Ellison, E.T., Kelemen, P., Kubo, M., and Templeton, A.S. Low temperature hydrogen production during experimental hydration of partially serpentinized dunite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 209, 161–183 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.gca.2017.04.022>

14 McCollom, T.M., Klein, F., and Ramba, M. Hydrogen generation from serpentinization of iron-rich olivine on Mars, icy moons, and other planetary bodies. *Icarus*, 372, 114754 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2021.114754>

15 Ueda, H., Sawaki, Y., and Maruyama, S. Reactions between olivine and CO₂-rich seawater at 300°C: Implications for H₂ generation and CO₂ sequestration on the early Earth. *Geoscience Frontiers*, 8 (2), 387–396 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2016.10.002>

16 Smith, N., Shepherd, T., Styles, M., and Williams, G. Hydrogen exploration: A review of global hydrogen accumulations and implications for prospective areas in NW Europe. *Geological Society, London, Petroleum Geology Conference Series*, 6 (1), 349–358 (2005). <https://doi.org/10.1144/0060349>

17 Neal, C., and Stanger, G. Hydrogen generation from mantle source rocks in Oman. *Earth and Planetary Science Letters*, 66, 315–320 (1983). [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(83\)90144-9](https://doi.org/10.1016/0012-821X(83)90144-9)

18 Osselin, F. Experimental study of the co-valorization of carbon dioxide storage through hydrogen production in ultramafic formations. *American Geophysical Union Fall Meeting Abstracts*, GC31E-1297 (2022). <https://doi.org/10.1002/essoar.10501775.1>

19 Khandoozi, S., Hazlett, R., and Fustic, M. A critical review of CO₂ mineral trapping in sedimentary reservoirs—from theory to application: Pertinent parameters, acceleration methods and evaluation workflow. *Earth-Science Reviews*, 244, 104515 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2023.104515>

20 Klein, F., and McCollom, T.M. From serpentinization to carbonation: New insights from a CO₂ injection experiment. *Earth and Planetary Science Letters*, 379, 137–145 (2013). <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2013.08.017>

21 Neubeck, A., Nguyen, D.T., and Etiope, G. Low-temperature dunite hydration: Evaluating CH₄ and H₂ production from H₂O and CO₂. *Geofluids*, 16 (3), 408–420 (2016). <https://doi.org/10.1111/gfl.12159>

22 Melcher, F., Grum, W., Simon, G., Thallhammer, T.V., and Stumpfl, E.F. Petrogenesis of the ophiolitic giant chromite deposits of Kempirsai, Kazakhstan: A study of solid and fluid inclusions in chromite. *Journal of Petrology*, 38 (10), 1419–1458 (1997). <https://doi.org/10.1093/etroj/38.10.1419>

23 Zgonnik, V. The occurrence and geoscience of natural hydrogen: A comprehensive review. *Earth-Science Reviews*, 203, 103140 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103140>

24 Selyatitskii, A.Y., Reverdatto, V.V., Kuz'Min, D.V., and Sobolev, N.V. Minor elements in unusual olivines from high-pressure peridotites of the Kokchetav Massif (Northern Kazakhstan). *Doklady Earth Sciences*, 445 (2), 1015–1019 (2012). <https://doi.org/10.1134/S1028334X12080235>

25 Kuibida, M.L., Safonova, I.Y., Yermolov, P.V., Vladimirov, A.G., Kruk, N.N., and Yamamoto, S. Tonalites and plagiogranites of the Char suture-shear zone in East Kazakhstan: Implications for the Kazakhstan-Siberia collision. *Geoscience Frontiers*, 7 (1), 141–150 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2015.09.002>

¹Нурбекова Р.Н.,

PhD, ORCID ID: 0000-0001-7804-3949,

e-mail: riza.nurbekova@nu.edu.kz

¹Хазлетт Р.,

PhD, профессор, ORCID ID: 0000-0003-2058-8406,

e-mail: randy.hazlett@nu.edu.kz

^{1,2}Фустич М.,

PhD, ассоциированный профессор, ORCID ID: 0000-0001-9815-9279,

e-mail: milovan.fustic@nu.edu.kz

¹Салаудин И.,

PhD, ORCID ID: 0009-0008-2015-8629,

e-mail: ibraheem.salaudeen@nu.edu.kz

¹Кайратова А.,

Студент бакалавриата,

e-mail: a.kairatova@nu.edu.kz

¹Школа горного дела и наук о Земле, Назарбаев Университет, г. Астана, Казахстан

²Департамент наук о Земле, Университет Калгари, г. Калгари, Канада

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ УЛЬТРАОСНОВНЫХ ПОРОД ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА Н₂ И СЕКВЕСТРАЦИИ СО₂: ПУТЬ К ЧИСТОЙ ЭНЕРГИИ И СНИЖЕНИЮ ВЫБРОСОВ В КАЗАХСТАНЕ

Аннотация

Переход к углеродно-нейтральной экономике требует не только долговременного геологического хранения антропогенного углекислого газа (СО₂), но и поиска новых низкоуглеродных источников энергии, к числу которых относится природный водород (Н₂). Среди потенциальных геологических сред особое место занимают ультраосновные породы, поскольку они способны одновременно обеспечивать минерализацию СО₂ и образование природного Н₂. Однако взаимосвязь этих процессов, а также возможность их проявления в основных породах до настоящего времени изучены недостаточно. В данной работе исследованы основные и ультраосновные породы Чарской офиолитовой зоны Восточного Казахстана и Кемпирсайского ультраосновного массива Западного Казахстана, чтобы оценить их потенциал к минерализации СО₂ и генерации природного Н₂. Наиболее интенсивное связывание СО₂ наблюдалось в серпентинсодержащих ультраосновных породах. Растворение лизардита сопровождалось высвобождением Mg²⁺, что создавало условия для образования вторичного магнезита и фиксации СО₂ в устойчивой минеральной форме. В образцах, обогащённых магнезиохромитом, карбонатизация протекала значительно слабее. Распределение природного Н₂ оказалось иным. Максимальные концентрации зарегистрированы в ультраосновных (0,872 мол.%) и основных (0,721 мол.%) породах Чарской офиолитовой зоны, тогда как в образцах Кемпирсайского массива выявлены лишь следовые количества Н₂. Сопоставление экспериментальных данных показало, что минерализация СО₂ и образование природного Н₂ контролируются разными минералогическими факторами. Для долговременного связывания СО₂ наиболее благоприятны серпентинсодержащие ультраосновные породы, тогда

как генерация природного H_2 определяется прежде всего реакционной способностью Fe-содержащих минералов. Это объясняет высокие концентрации H_2 в отдельных образцах Чарской офиолитовой зоны при сравнительно низких значениях в породах Кемпирсайского массива. Офиолитовые комплексы Казахстана могут рассматриваться как перспективные геологические объекты как для долговременного минералогического хранения CO_2 , так и для дальнейших поисков природного водорода.

Ключевые слова: ультраосновные породы, серпентинизация, водород, углекислый газ, минерализация CO_2 .

¹Nurbekova R.N.,

PhD, ORCID ID: 0000-0001-7804-3949,

e-mail: riza.nurbekova@nu.edu.kz

¹Hazlett R.D.,

PhD, professor, ORCID ID: 0000-0003-2058-8406,

e-mail: randy.hazlett@nu.edu.kz

^{1,2}Fustic M.,

PhD, associate professor, ORCID ID: 0000-0001-9815-9279,

e-mail: milovan.fustic@nu.edu.kz

Salaudeen, I.,

PhD, ORCID ID: 0009-0008-2015-8629,

e-mail: ibraheem.salaudeen@nu.edu.kz

¹Kairatova A.

Bachelor's student,

e-mail: a.kairatova@nu.edu.kz

¹School of Mining and Geosciences, Nazarbayev University, Astana, Kazakhstan

²Department of Geosciences, University of Calgary, Calgary, Canada

UTILIZING ULTRAMAFIC ROCKS FOR H_2 PRODUCTION AND CO_2 SEQUESTRATION: A PATHWAY TO CLEAN ENERGY AND EMISSIONS REDUCTION IN KAZAKHSTAN

Abstract

Permanent geological storage of anthropogenic CO_2 and the development of low-carbon energy resources, including natural hydrogen (H_2), have become two key components of carbon-neutrality strategies. Ultramafic rocks are increasingly recognized as promising geological media because they can support both mineral carbonation and natural H_2 generation. However, the relationship between these processes, and the extent to which similar reactions occur in mafic rocks, remain poorly understood. Mafic and ultramafic rocks from the Charsk Ophiolite (eastern Kazakhstan) and the Kempirsai Ultramafic Massif (western Kazakhstan) were investigated under experimental conditions to evaluate their potential for CO_2 mineralization and natural H_2 generation. Serpentine-rich ultramafic rocks displayed the highest carbonation potential. Dissolution of lizardite released Mg^{2+} ions that promoted secondary magnesite precipitation and efficient mineral trapping of CO_2 . Carbonation was substantially weaker in magnesiochromite-rich ultramafic rocks. Natural H_2 generation followed a different pattern. The highest H_2 concentrations were measured in ultramafic (0.872 mol%) and mafic (0.721 mol%) rocks from the Charsk Ophiolite, whereas only trace amounts were detected in samples from the Kempirsai Massif. CO_2 mineralization and natural H_2 generation were controlled by different mineralogical factors. Serpentine-rich ultramafic rocks were most favorable for long-term CO_2 immobilization through mineral carbonation, whereas Fe-bearing mafic and ultramafic rocks with high reaction potential were more favorable for natural H_2 generation. Kazakhstan's ophiolitic complexes therefore represent promising geological targets for both permanent CO_2 storage and natural hydrogen exploration.

Keywords: ultramafic rocks, serpentinization, hydrogen, carbon dioxide, mineral carbonation.

Received August 18, 2026; accepted August 21, 2026