

ӨОЖ 553.98

FTAXP 31.15.29

DOI: <https://doi.org/10.54859/kjogi108817>

Қабылданды: 30.01.2025.

Мақұлданды: 13.03.2025.

Жарияланды: 30.06.2025.

Ғылыми шолу

Табиғи сутегі: шығу тегі, геологиялық таралуы және анықтау әдістеріне қысқаша шолу

С. Опахай, Қ.А. Күтербеков, К.Ж. Бекмырза, Ә.М. Қабышев, М.М. Кубенова,
Н.К. Айдарбеков, Ж. Жұмаділова, Ж.С. Зейнулла

Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана қаласы, Қазақстан

АННОТАЦИЯ

Табиғи сутегі – төмен көміртекті экономикада маңызды рөл атқара алатын, экологиялық таза және болашағы зор энергия көзі. Бұл мақалада табиғи сутегінің пайда болу тегі, геологиялық таралуы және оны анықтау әдістері қарастырылған. Әдеби деректерді талдау негізінде оның негізгі түзілу көздері: серпентинизация, судың радиолизі, тау жыныстарының механикалық бұзылуы, магманың дегазациясы және жер қыртысының үгілуі болып табылады. Олардың ішінде серпентинизация су мен екі валентті темірдің әрекеттесуінен сутегінің түзілуіне алып келетін орта мұхит жоталары мен субдукция аймақтарында жүретін ең маңызды процесс ретінде ерекшеленеді. Табиғи сутегінің географиялық таралуы мұхиттық спрединг орталықтарын, пассивті шеттерді, субдукция аймақтарын, жарылымдар мен плиталар арасындағы аумақтарды қамтиды. Сутегінің жоғары концентрациялары Сан-Андреас жарылымы және Таудени бассейні сияқты тектоникалық белсенді аймақтарда жиі байқалады. Табиғи сутегіні анықтау изотоптық талдау және H_2/CH_4 қатынастары арқылы жүзеге асырылады, бұл мантиялық текті қыртыстық тектен ажыратуға мүмкіндік береді. Табиғи сутегі кен орындарын зерттеу мен барлау шектеулі болғанына қарамастан, оны өндіру сутегі энергетикасының құнын айтарлықтай төмендетіп, тұрақты энергия көздеріне көшу үдерісін жеделдетуі мүмкін. Зерттеу сутегінің түзілу, жинақталу және миграция механизмдерін, сондай-ақ оны өндіру технологияларын одан әрі зерттеудің маңыздылығын атап көрсетеді. Ұсынылған шолу табиғи сутегі туралы қазіргі білімдерді жүйелеп, осы салада болашақтағы ғылыми және практикалық жұмыстарға негіз болады.

Негізгі сөздер: табиғи сутегі, көміртектік бейтарап, серпентинизация, сутегінің таралуы, сутегі резервуарларын барлау, радиолиз, магманың дегазациясы.

Дәйексөз келтіру үшін:

Опахай С., Күтербеков Қ.А., Бекмырза К.Ж., және т.б. Табиғи сутегі: шығу тегі, геологиялық таралуы және анықтау әдістеріне қысқаша шолу // Қазақстанның мұнай-газ саласының хабаршысы. 2025. 7 том, №2. 106–118 б. DOI: <https://doi.org/10.54859/kjogi108817>.

UDC 553.98

CSCSTI 31.15.29

DOI: <https://doi.org/10.54859/kjogi108817>

Received: 30.01.2025.

Accepted: 13.03.2025.

Published: 30.06.2025.

Review article

Natural Hydrogen: Origin, Geological Distribution, and Detection Methods – A Brief Overview

Serikzhan Opakhai, Kairat A. Kuterbekov, Kenzhebatyr Zh. Bekmyrza, Asset M. Kabyshev, Marzhan M. Kubenova, Nursultan K. Aidarbekov, Zhuldyz Zhumadilova, Zhassulan S. Zeinulla

Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

ABSTRACT

Natural hydrogen represents a sustainable and promising energy source that holds the potential to significantly contribute to a low-carbon economy. This article discusses origins, geological distribution, and methods used for detection of natural hydrogen. Through a review of existing literature, the primary sources of natural hydrogen formation have been identified. These include serpentinization, water radiolysis, disaggregation of rock, magma degassing, and weathering of the Earth's crust. Among these processes, serpentinization is particularly significant as a key phenomenon occurring in mid-ocean ridges and subduction zones. This process involves the interaction of water with divalent iron resulting in the formation of hydrogen. The geographical distribution of natural hydrogen includes oceanic spreading centers, passive margins, subduction zones, faults, and intraplate regions. High concentrations of H₂ are frequently found in tectonically active areas, such as the San Andreas Fault and the Taoudeni Basin. Natural hydrogen can be detected using isotopic analysis and H₂/CH₄ ratios, which help to differentiate between mantle-derived and crustal origins. Despite current limitations in the research and exploration of natural hydrogen deposits, its production could significantly reduce the cost of hydrogen energy and accelerate the transition to sustainable energy. The study emphasizes the necessity for further investigation into the mechanisms of hydrogen generation, accumulation, and migration, as well as the development of extraction technologies. This overview organizes the current understanding of natural hydrogen and serves as a foundation for future scientific and practical advancements in this field.

Keywords: *natural hydrogen; carbon-neutral; serpentinization; hydrogen diffusion; exploration of hydrogen reservoirs; radiolysis; magma degassing.*

To cite this article:

Opakhai S, Kuterbekov KA, Bekmyrza KZ, et al. Natural Hydrogen: Origin, Geological Distribution, and Detection Methods – A Brief Overview. *Kazakhstan journal for oil & gas industry*. 2025;7(2):106–118. DOI: <https://doi.org/10.54859/kjogi108817>.

УДК 553.98
МРНТИ 31.15.29

DOI: <https://doi.org/10.54859/kjogi108817>

Получена: 30.01.2025.
Одобрена: 13.03.2025.
Опубликована: 30.06.2025.

Научный обзор

Природный водород: происхождение, геологическое распространение и методы обнаружения – краткий обзор

С. Опахай, К.А. Кутербеков, К.Ж. Бекмырза, А.М. Кабышев, М.М. Кубенова,
Н.К. Айдарбеков, Ж. Жумадилова, Ж.С. Зейнулла

Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, г. Астана, Казахстан

АННОТАЦИЯ

Природный водород является экологически чистым и перспективным источником энергии, который может сыграть значительную роль в низкоуглеродной экономике. В данной статье рассматриваются происхождение, геологическое распределение и методы идентификации природного водорода. На основе анализа литературных данных выделены основные источники его образования: серпентинизация, радиолиз воды, механическое разрушение пород, дегазация магмы и выветривание земной коры. Среди них серпентинизация выделяется как наиболее значимый процесс, происходящий в зонах срединно-океанических хребтов и субдукции, где взаимодействие воды с двухвалентным железом приводит к образованию водорода. Географическое распределение природного водорода охватывает океанические спрединговые центры, пассивные окраины, зоны субдукции, разломы и внутриплитные области. Высокие концентрации H_2 часто наблюдаются в тектонически активных зонах, таких как разлом Сан-Андреас и бассейн Таудени. Идентификация природного водорода проводится с использованием изотопного анализа и соотношений H_2/CH_4 , что позволяет отличить мантийное происхождение от корового. Несмотря на текущие ограничения в исследованиях и разведке месторождений природного водорода, его добыча может значительно снизить стоимость водородной энергетики и ускорить переход к устойчивым источникам энергии. Исследование подчеркивает необходимость дальнейшего изучения механизмов генерации, накопления и миграции водорода, а также разработки технологий его извлечения. Представленный обзор систематизирует текущие знания о природном водороде и служит основой для дальнейших научных и практических разработок в этой области.

Ключевые слова: природный водород, углеродно-нейтральный, серпентинизация, диффузия водорода, разведка водородных резервуаров, радиолиз, дегазация магмы.

Как цитировать:

Опахай С., Кутербеков К.А., Бекмырза К.Ж., и др. Природный водород: происхождение, геологическое распространение и методы обнаружения – краткий обзор // Вестник нефтегазовой отрасли Казахстана. 2025. Том 7, №2. С. 106–118. DOI: <https://doi.org/10.54859/kjogi108817>.

Кіріспе

Өсіп келе жатқан әлемдік энергия тұтынуы, қазба отындарына тәуелділік және климаттың өзгеруі мен экологиялық мәселелер жаңартылатын энергия көздерін дамытуға деген қызығушылықты арттырды. Осы тәуелділікті алмастыру үшін күн, жел, толқындық, геотермалдық, биомасса және сутегі энергиясы сияқты перспективті баламалы энергия көздері әзірленді. Сутегі – жоғары сапалы отын, оның жану өнімі – су, көміртек шығарындылары нөлге тең болып табылады. Сондықтан сутегі таза және тұрақты энергия көзі ретінде қарастырылады. Бұдан басқа, сутегіні отын элементтері арқылы электр энергиясына айналдыруға болады. Химиялық шикізат ретінде ол аммиак, метанол өндіруде және мұнай өңдеу процестерінде маңызды рөл атқарады [1].

Таза сутегі үлкен мөлшерде жасыл энергияны ұзақ уақыт сақтауға (сығылған сұйық сутегі (CGH_2), сұйық сутегі (LH_2), Металлгидридтер (MgH_2 , LaNi_5H_6 , TiFeH_2), сұйық органикалық сутегі тасымалдаушылары (ЛОНС, мысалы, бензилтолуол) сияқты технологияларды қолдана отырып) мүмкіндік береді, ал оның жасыл туындылары (метанол және аммиак) қымбат ұзақ қашықтықтағы электр желілерінің қажеттілігінен құтқарады. Сонымен қатар, ол су шаруашылығы жүйелері үшін тұрақты электр энергиясының сұранысын қамтамасыз ете алады және мұнай өңдеу процестерінің шикізаты ретінде қолданылады. Сутегі сонымен қатар кеме қозғалтқыштарында, сүңгуір қайықтарда және басқа да суда жүзетін құралдарда қолданылады [2].

Таза сутегі кең қызығушылық тудырды, ал электролиттік су – сутегіні өндірудің ең тиімді әдістерінің бірі. Қазіргі уақытта төрт негізгі технология бар. Біріншісі – сілтілік электролиттік ұяшық (AWE) технологиясы, оның технологиялық жетілуі жоғары және қызмет ету мерзімі ұзақ болады. Екінші технология – протон алмасу мембранасы (PEM), ол жоғары ток тығыздығымен, жоғары жұмыс қысымымен, экологиялық тазалық деңгейімен, ұяшықтың шағын өлшемімен және қуат реттеуінің кең диапазонымен ерекшеленеді, бірақ платина мен иридий сияқты бағалы металдарды пайдалану PEM-нің құнын AWE-ге қарағанда 3–5 есе арттырады [3]. Қатты оксидті электролиттік ұяшық (SOEC) жоғары температурада (500–900°C) жұмыс істейді және сұйық судың орнына буды пайдаланады. Қазіргі зерттеулер оны коммерциаландыруға, модернизациялауға, қызмет ету мерзімін ұзартуға және шығындарды азайтуға бағытталған. Ол негізінен жылу энергиясына бай аймақтарда қолданылады. AWE – салыстырмалы түрде алдыңғы қатарлы технология, ол тезірек жауап береді және ток тығыздығы жоғары, бірақ мембраналық материалдар мен құрылғыларды құрастыру негізінен зертханалық деңгейде қалып отыр [3, 4].

Сутегіні сақтау сутегі энергетикасын дамытудағы басты мәселе болып табылады, сондықтан бұл тақырып бойынша көптеген зерттеулер жүргізілуде. Сутегіні сақтау фазалық күйіне байланысты газ тәрізді сутегіні сақтау болып бөлінеді. Газ тәрізді сутегіні сақтау – сутегіні жоғары қысымды, бакта сығымдау және сақтау болып табылады. Бұл ауқымды және алыс қашықтықтағы қолдану жағдайларына байланысты тұрақты қысымды сақтай отырып қолданылады. Оның артықшылықтарына сутегіні сақтау жылдамдығының жоғары болуы, технологияның салыстырмалы түрде жетілуі, қалыпты температурада жұмыс істеуі және төмен шығындары жатады, алайда сутегі тез таралуға бейім болып табылады. Сондай-ақ, газ тәрізді сутегіні ауқымды сақтау үшін қолайлы, мысалы, пайдаланылмайтын мұнай кен орындарын қолдану арқылы жер асты сақтауы бойынша көптеген зерттеулер бар [5].

Болашақ энергетикалық құрылымдар сутегіні өндірудің неғұрлым экономикалық және қолжетімді төмен көміртекті немесе көміртексіз әдістерін әзірлеуі тиіс. Жер асты табиғи сутегі алдағы энергетикалық өзгерістердің негізгі тірегіне айналуы мүмкін. Қазіргі уақытта сутегі туралы шолулар негізінен оның өндірісі, сақталуы және тасымалдануына бағытталған, ал табиғи сутегі туралы мәліметтер салыстырмалы түрде аз. Алайда, табиғи сутегі қорларын барлау және игеру сутегінің құнын төмендетуге ықпал етуі мүмкін. Сондықтан табиғи сутегінің сипаттамаларын, оның ішінде таралуы, пайда болуы және басқа да мәселелерін түсіну қажет [6].

Соңғы шолулар табиғи сутегінің түзілу механизмдеріне (генезисіне) көбірек бағытталған, ал табиғи сутегінің таралуы бойынша деректер жеткіліксіз. Сондықтан әдебиеттерді кеңінен зерттеу негізінде табиғи сутегінің таралуы, пайда болуы сияқты мәселелер осы шолу мақалада кеңінен қарастырылады. Бұл шолу мақала табиғи сутегіні барлау және игеру саласындағы прогресті жинақтай отырып, табиғи сутегі қорларын барлау үшін нұсқаулық ретінде қызмет етеді.

Негізгі бөлім

Сутегінің таралуы

Абиотикалық сутегі (биологиялық белсенділік нәтижесінде түзілмеген табиғи сутегі газы) субэаралды және суасты орталарында, соның ішінде мұхиттық спрединг орталықтарында, трансформалық жарылымдарда, пассивті шеттерде, конвергенттік шеттерде және плиталар ішіндегі жағдайларда табылды. Табиғи сутегінің бар екендігіне сенімді дәлелдер алғаш рет 1970-жылдары алынған [7]. Бұл ашылулар үшін қолданылған зондтар 1997 жылы Францияның Теңізді Даму Институты жетілдірген, олардың суасты роботтары Атлантика жотасының оңтүстігінде, Азор аралдарының маңында 2300 м тереңдіктегі қара түтіктерді зерттеген. Роботтар

мұхит түбіндегі гидротермалдық көздерді анықтау үшін метан көзін іздеу барысында сутегіге бай гидротермалдық сұйықтықтарды тапқан. Осы жылдар ішінде француздық зерттеушілер Атлантика жотасы бойында табиғи сутегінің жеті шығу нүктесін анықтады.

Америкалық, ресейлік және жапондық ғалымдар басқа аймақтарда ұқсас ашулар жасаған [8]. Сутегінің мұхиттық ультранегізді жыныстармен судың әрекеттесуінен түзілетіні анықталды. Бұл гидротермалдық сұйықтықтар ерте тіршіліктің дамуы үшін ықтимал триггер болуы мүмкін. Мұхит литосферасының көп бөлігі теңіз суымен оңай тотығатын темірге бай минералдарды қамтитын жыныстардан тұрады. Бұл тотығу процесі өте күрделі, себебі гидротермалдық өзгеріс кезіндегі темірдің таралуы $Mg-Fe$ минералдарының бірнеше түрін қамтиды, олардың құрамы температураға, протолитогендік құрамға және су-жыныс арақатынасына байланысты өзгереді.

Серпентинизацияланған перидотит баяу және өте баяу кеңею аймақтарындағы орта-атлантикалық жоталарда магманың шектеулі берілуі жағдайында ең көп таралған гидротермалдық циклді жыныс түрі болып табылады. Серпентинизация нәтижесінде айналып жүретін гидротермалдық сұйықтықтармен байланысты сутегінің жүздеген табиғи ағындары, мысалы, Рейнбоу гидротермалдық көздері (Орта Атлантика жотасы), сондай-ақ мұхит түбіндегі ультрамафикалық жыныстар мен континенттердегі офиолиттерде [9] анықталған.

Сутегінің аномалды концентрациялары жиі жарылым аймақтарынан табылып жатады. Жарылым аймақтары жер қыртысындағы сұйықтықтардың миграциясы үшін қолайлы жолдар болып табылады, себебі жарылым бойында көптеген өзара байланысқан және ашық жарықшақтар орналасқан. Осылайша, жарылымдар сутегінің тереңдегі көздерін жер бетімен байланыстыруы мүмкін. Кейбір зерттеулер сутегіні жердің маңызды геологиялық жарылымдары маңындағы топырақта бақылауға бағытталған, мысалы, Жапонияда [10] және Калифорниядағы Сан-Андреас жарылымы маңында [11]. Ваquita және т.б. зерттеушілер Япониядағы Яманкаси жарылымының маңында топырақ газдарынан сутегіні (3%-ға дейін) анықтады [12]. Бұл ашылу сутегінің ерекше жоғары концентрациялары жер сілкінісі алдындағы белсенді жарылымдардағы топырақтарда анықталғанын растайтын кейінгі зерттеулерге себеп болды.

АҚШ-тың Канзас штатындағы топырақ газындағы сутегі бойынша жүздеген өлшеу нәтижелері жарылымдардың сутегінің транзиттік жолдары ретінде басымдыққа ие екенін көрсетеді. Маккарти және әріптестері Канзастағы топырақ газын зерттеу барысында жарылымдар

мен сутегінің құрамының оң корреляциясын анықтады [13]. Украина мен Беларусьте жүргізілген зерттеулер Солтүстік Припять жарылымы аймағында сутегінің ең жоғары концентрациялары байқалғанын көрсетті [14]. Басқа зерттеу жер асты суларындағы сутегі сынамаларын талдаған. Зерттеушілер жер асты суларында, әсіресе терең жарылымдармен байланысты аймақтарда сутегінің концентрациясы қоршаған аудандардағы суға қарағанда екі есе жоғары болғанын анықтады.

Зерттеушілер сутегіні шөгінді бассейндердегі тақтатас пен көмір қабаттарынан тапты. Авторлар тақтатас пен көмірді пиролиздеу бойынша эксперименттер жүргізіп, сутегі мен органикалық зат арасындағы байланысты дәлелдеді [15]. Шөгінді органикалық зат сутегінің маңызды көзі болуы мүмкін. Алайда, шөгінді органикалық заттардағы $C-H$ байланыстарын диссоциациялау арқылы сутегіні алуға қатысты мәліметтер аз. Мальштедт және әріптестері [15] тақтатастар мен супердетриттерді әртүрлі термиялық жетілу және метаморфизм дәрежелерінде ұсақтау кезінде бөлінетін газдың концентрациялары (CO_2 , H_2 және CH_4) қалай өзгередінін зерттеді. Сондай-ақ, олар газ компоненттерінің өзара байланысын түсіну үшін тақтатас пен супердетриттегі CH_4 және H_2 изотоптық құрамдарын талдады. Тақтатас пен метапелиттегі қалдық газдың негізгі компоненттері CO_2 , CH_4 және H_2 болып табылады, бұл шөгінді органикалық заттардың бөліну ретілігімен сәйкес келеді. δ^2H H_2 мәндерінің едәуір төмен болуы сутегінің көміртектес-сутегі байланыстарынан бөлінуімен байланысты изотоптық фракциялану ретінде түсіндірілуі мүмкін. Бұл нәтижелер сутегінің үлкен көлемі шөгінді органикалық заттардан түзілетінін көрсетеді.

Табиғи сутектің шығу тегі және идентификациясы

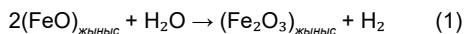
Шығу тегі

Табиғи сутегі соңғы онжылдықтарда, әсіресе орта-теңіз жоталарындағы сутегіге бай флюидтердің ашылуынан кейін кеңінен зерттелді. Бұл аймақтардағы сутегінің негізгі көздеріне мыналар жатады: $Fe(II)$ қамтитын жыныстардың өзгеруі, уран, торий және калийдің радиоактивті ыдырауы нәтижесінде судың радиолізі, дегазацияланған магма, сонымен қатар кремнийді қамтитын жыныстардың механикалық бұзылуы кезінде су мен беткі өркін радикалдардың реакциясы [16].

Серпентинизация

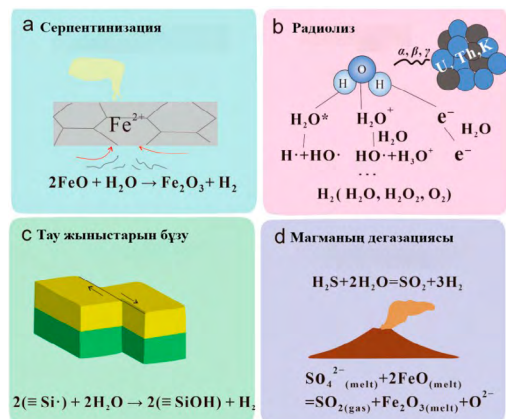
Перидотит баяу және өте баяу кеңейетін мұхитаралық жоталарда магманың берілуі шектеулі болған кезде гидротермиялық айналымдар орналасатын ең кең таралған тау жынысы болып табылады. Перидотиттің гидротермиялық өзгеруі (серпентинизация)

еріту-тұну, тотығу-тотықсыздану реакцияларының және сутегінің түзілуінің өзара байланысты процестеріне әкеледі (сурет 1а). Оливин мен плагиотрофил перидотиттің ең кең таралған минералдары болып табылады, олар гидротермиялық жағдайларда тұрақсыз. Бұл күрделі процестің жалпы сипаттамасы келесідей (1):



мұндағы (FeO) жыныс пиросиликаттардың эквивалентті темірі (Fe^{2+}) компонентін білдіреді. (Fe_2O_3) жыныс өзгерген минералдардан тұрады, олардың құрамында темір (Fe^{3+}) бар.

Серпентиннің құрамындағы басқа да темірге бай екінші реттік минералдар (мысалы, хлорит, феррохромит) сутегі түзілуінде екінші рөл атқарады, бірақ белгілі бір геохимиялық жағдайларда шешуші болуы мүмкін [17].



Сурет 1. Сутегінің негізгі пайда болу көздерін көрсететін сызбанұсқа [17]

Figure 1. Schematic diagram of the primary sources of hydrogen formation [17]

a) серпентинизация / serpentinization; b) радиолиз / radiolysis; c) тау жыныстарын бұзу / disaggregation of rock; d) магманың дегазациясы / magma degassing

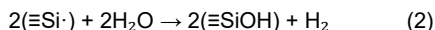
Радиолиз

Радиоактивті элементтердің, мысалы, уранның (^{238}U және ^{235}U), торийдің (^{232}Th) және калийдің (^{40}K), мұхит жыныстарында ыдырауы нәтижесінде бөлінетін сәулелену α -, β - және γ -сәулелерін шығарып, суды қоздырып және иондап, еркін радикалдар түзіп, сутегі өндіреді (сурет 1b). Осылайша, судың H-O байланысы ыдырайды, нәтижесінде сутегі мен гидроксидті радикалдар түзіледі. Кейін екі сутегіден тұратын радикал өзара әрекеттесіп, сутегі молекуласын түзеді: $2\text{H} \cdot \rightarrow \text{H}_2$ [18]. Радиолиз арқылы сутегі өндірісі үшін Жерде және Күн жүйесінің басқа аймақтарында кең таралған қарапайым геохимиялық компоненттер (су мен радионуклидтер) қажет. Сонымен қатар,

радиолиз судың тұрақты күйінде болатын кез келген температура мен қысым жағдайында тіпті су мұз, бу немесе гидратталған тұздар түрінде болса да жүреді [19].

Тау жыныстарының бұзылуы

Тау жыныстарының жарылуы химиялық байланыстарды бұзып, еркін радикалдар түзеді, олар сумен әрекеттесіп сутегі түзеді (2) (сурет 1, c):

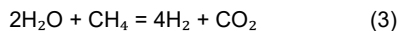


Тектоникалық жарылымдарға байланысты топырақ газдарындағы сутегінің ерекше жоғары концентрациясы жарылымдар қозғалысы кезінде тау жыныстарының ұсақталуымен және соған байланысты еркін радикалдардың түзілуімен түсіндіріледі. Механикалық күштер силикат минералдарындағы Si-O коваленттік байланыстарын бұзып, беткі еркін радикалдарды $\equiv\text{Si}\cdot$ және $\equiv\text{SiO}\cdot$ (гомолиттік), сондай-ақ зарядталған беткі радикалдарды $\equiv\text{Si}^+$ және $-\text{O}-\text{Si}^-$ (гетеролиттік) түзеді. Бұл беттер анықталғаннан кейін олар немесе рекомбинацияланып силиксандық байланыстарды (Si-O-Si) түзеді, немесе сумен әрекеттесіп, келесідей реакцияға түседі: $\text{Si}\cdot + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{SiOH} + \text{H}\cdot$. Мұнда сутегі келесі жанама өнім ретінде бөлінеді: $\text{H}\cdot + \text{H}\cdot \rightarrow \text{H}_2$. Бұл процесс, механикалық немесе медициндік сутегі өндірісі деп аталады, жарылым аймақтарында кең таралуы мүмкін [20].

Жарылымдар орогендік белдеулерде, субдукция аймақтарында, континенттік рифттерде, пассивті шеттерде, спрединг орталықтарында, трансформациялық жарылымдар мен жарылым аймақтарында стандартты геологиялық ерекшеліктер болып табылады. Сутегі бұл жарылымдар белсенді болған кезде түзіледі. Жылжымалы жарылымдарда сутегі өндірісі тұрақты жүруі мүмкін, ал бұғатталған жарылымдарда сутегі өндірісі эпизодтық сипатқа ие болып, жылжу оқиғаларымен шектелуі мүмкін [21].

Магманың дегазациясы

Сутегі сондай-ақ көміртек-оттегі-сутегі (COH) магмалық жүйелерінде кездеседі (3) (сурет 1, d):

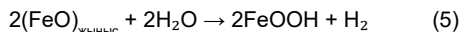
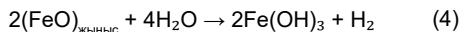


Магмалық температураларда ($\sim 1200^\circ\text{C}$) бұл тепе-теңдік оңға қарай қатты ығысады, бұл сутегінің магманың құрамдас бөлігі болуы мүмкін екенін көрсетеді. Тау жыныстарының атқылауы орта мұхит жоталарынан (MORB) алынған базальттарды қамтиды, олардың газ мөлшері ерекше жоғары, және олар ешқандай дегазация тарихы болмаған лавалар деп есептеледі. Орта Атлант жотасының (MAR) ерте алынған үлгілерінде, драгалау арқылы көтерілгеннен кейін, талдау жасалмай тұрып, кеме палубасына

шашылған фрагменттер болды. Бұл фрагменттер 0,881 мл/г еріген газды қамтыған, оның 26,7%-ы сутегі болды [22].

Қыртыстың үгілуі

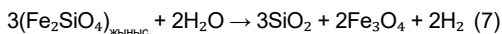
Су салқындап, уақыт өте келе ескірген сайын, мұхиттық қыртыс өзгереді, және төмен температурада (<250°C) келесі реакциялар жүреді (4–6):



Терең теңіз және мұхиттық бұрғылау жобаларынан алынған үлгілер көрсеткендей, қыртыстың үгілуі субтропикалық аймақтарда басталып, қыртыстың жасы шамамен 10–20 млн жылға жеткенге дейін жалғасады. Бұл өзгерістер, әдетте, жарықшақтар мен олардың шеттерімен шектеледі, ал мұхиттық қыртыстың ортаңғы және төменгі қабаттары үгілуге аз дәрежеде ұшырайды. Мысалы, тез кеңейетін жоталардан алынған белсенді тектоникалық жарқабақтардың габбро үлгілері жас болып, әдетте, тотығу дәрежесі 10%-дан төмен. Ал баяу кеңейетін жоталардан және мұхиттық қыртыстың ортаңғы және төменгі қабаттарынан алынған жыныс үлгілері ескі болып, көбірек тотығады (50%) [23].

Базальттың жоғары температурадағы өзгеруі

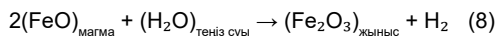
Мұхиттық қыртыстың теңіз суымен жоғары температурада (350–400 °C) өзгеруі темірлі силикаттардың көпшілігін темірлі минералдарға айналдырады. Алайда, олардың аз бөлігі сутегі түзіле отырып, темір құрамындағы минералдарға айналады (7):



Гидротермалдық сұйықтықтардың мұхиттық қыртысқа қаншалықты терең енетіні белгісіз болғанымен, шектеулі үлгілерді зерттеу жоғарғы қыртыстың өзгеріске ұшырайтынын, ал төменгі қыртыстың өзгеріссіз қалатынын көрсетеді [24]. Паске және әріптестері Джибути Рифт аңғарында (Шығыс Африка) табиғи сутегі газын тапқан [25]. Олар аймақтағы өзгерген/жаңа базальтты және газды in situ жағдайында сынама алып зерттеген. Зерттеу орнының бетінде сутегінің аз ғана мөлшері анықталған. Олардың деректері табиғи сутегінің базальттағы темірлі минералдар арқылы және жарық аймақтарында жер қыртысындағы терең сұйықтықтармен жоғары температурада (шамамен 270°C) тасымалданатынын көрсетеді.

Лава мен теңіз суының әрекеттесуі

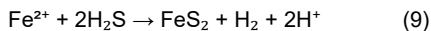
Теңіз суы мен атқылаған лаваның өзара әрекеттесуі сутегін келесі реакция арқылы түзеді (8):



Лаваның теңіз сумен өзара әрекеттесу дәрежесін анықтау қиын міндет болып табылады. Алайда теңіз суының лаваның ағынының бетімен белсенді әрекеттесетіні, фрагменттелген және қатайған қабықтың болуымен расталады [26].

Кристалдану

Кейінгі кристалдану процесінде сутегі келесі реакция арқылы түзіледі: магмадағы еріген су екі валентті темір түрінде тотығады (9–10) [27]:



Идентификациялау

Сутегінің генезисін зерттеуде H₂-мен бірге түзілетін басқа газдардың (мысалы, CH₄ және He) компоненттік құрамы мен изотоптық сипаттамалары кешенді зерттеулер үшін белсенді түрде пайдаланылды. 1980-жылдардың басынан бастап Канзас штатындағы Мидконтинент Рифт жүйесінің жанындағы ұңғымаларда сутегі газы анықталған [29]. 1982–1985 жылдар аралығында екі ұңғыма (CFA Oil Scott #1 және CFA Oil Heins #1) 29–37 молярлық % сутегі берген. 2008 жылы бұрғыланған жаңа ұңғыма (CFA Oil Sue Duroche #2) Пенсильван су қоймасының газдары мен тұзды суының үлгілерін алған. Бұл ұңғыманы 2017 жылы Комбодон және әріптестері зерттеген. Олар негізгі газдар мен инертті газдардың молекулалық және изотоптық құрамын талдап, сутегінің пайда болуы туралы жаңа көзқарастар ұсынды [30].

Ньюэлл және әріптестері Канзас штатындағы Форест-Сити бассейніндегі WTW Operating Wilson #1 ұңғымасында табылған газ туралы хабарлады [29]. Газдың химиялық құрамы Scott #1 және Heins #1 ұңғымаларына ұқсас болды. Құрамы: 17,2% H₂, 34,6% N₂, 45,1% CH₄ және аз мөлшерде гелий мен аргон. Сутегінің δD мәні (орташа -789‰) CET #1 және Scott #1 ұңғымаларындағы төмен δD мәндерімен салыстырмалы болды. CH₄ сипаттамалары (δ¹³C орташа -57‰, δD 362‰) биогендік шығу тегі бар екенін көрсетті. R/Ra (үлгі ³He/⁴He/атмосфералық ³He/⁴He) 0,035 мәні сутегінің негізінен континенттік қыртыс жыныстарынан шыққанын көрсетеді.

Бұл нәтижелер Канзастан алынған сутегінің көздері туралы түпкілікті қорытындылар жасау үшін жеткіліксіз, бірақ ықтимал көздер талқыланды [29]. Авторлар осы газдардың негізгі құрамы офиолиттік ортада анықталғанға ұқсас деген қорытындыға келді, ал ультранегізгі жыныстардың болуы Fe(II)-нің ұзақ мерзімді тотығуымен сутегінің түзілгенін болжауға мүмкіндік береді. Бұл орта континенттік серпентинизация жүретін басқа аймақтарға ұқсас болуы мүмкін. Кимберлитте серпентин құрылымы

және магнетиттің бай шөгінділері бар, бұл Fe(II)-ні қамтамасыз ете алады.

Sue Duroche #2 ұңғымасындағы сутегінің δD мәні қазіргі заманғы болып, -717‰ мен -799‰ аралығында, орташа мәні -760‰ . Scott #1 және Heins #1 ұңғымалары үшін орташа мәндер тиісінше -793‰ және -781‰ құрайды. Heins #1 және Scott #1 ұңғымаларындағы 2008 жылы өлшенген δD H_2 мәндері 1987 жылы өлшенген мәндермен ұқсас болды [31]. $^3\text{He}/^4\text{He}$ қатынасы негізінде ^3He -нің жер қыртысының классикалық мәндерімен салыстырғанда байытылуы мантияның сутегі жинақталуына айтарлықтай үлес қосатынын болжайды. Алайда кейбір сутегі бар табиғи газдарда He мөлшері өте төмен болғандықтан, оның құрамын және изотоптық сипаттамаларын анықтау қиын, бұл сутегінің генезисін анықтауды күрделендіреді. Геологиялық құрылымдардағы табиғи газдағы метан, сутегі және сутегінің изотоптық құрамы дәл өлшенуі мүмкін. Осылайша, әртүрлі геологиялық құрылымдардағы сутегінің изотоптық құрамы жүйелі түрде талданды [32].

Аррувель және әріптестері сутегінің генезисін анықтау үшін H_2 – CH_4 арақатынасы мен сутегінің изотоптық құрамына негізделген әдісті ұсынды [33]. Егер сутегі негізінен қыртыстық шығу тегі бар болса, онда су-жыныс реакциясына қатысатын жыныстар мен су түгелдей қыртыстан келеді. Бұл, әсіресе, шөгінді жыныстардағы радиоактивті заттардың суды энергетикалық ыдыратуымен байланысты болуы мүмкін. Қыртыстық шығу тегі бар сутегінің бастапқы геохимиялық сипаттамалары: сутегінің изотоптық құрамы -700‰ -дан жоғары, ал $\ln(CH_4/H_2)$ мәні -8 -ден аз.

Мантиядан алынған сутегінің сипаттамалары мүлдем өзгеше. Мұнда су-жыныс реакцияларына қатысатын минералдар негізінен Fe^{2+} бар терең минералдардан алынады, ал су терең геологиялық жағдайлардан келеді. Мантиялық сутегінің бастапқы геохимиялық сипаттамалары: изотоптық құрамы -700‰ -дан төмен, ал $\ln(CH_4/H_2)$ мәні -4 -тен үлкен. CO_2 -ге бай сұйықтықтың бетінде тотығуы нәтижесінде түзілген қалдық сутегі газында сутегі мөлшері аз болады, бірақ метанның тотығуға дейінгі және кейінгі мөлшерінің айырмашылығы мардымсыз. Бұл жағдайда бастапқы геохимиялық сипаттамалар сутегінің изотоптық құрамының δD мәні -700‰ -дан жоғары және $\ln(CH_4/H_2)$ мәні -8 -ден жоғары болатынын көрсетеді. Терең көзден алынған сутегіге бай сұйықтық бетінде тотығуға ұшырағаннан кейін де, сутегі терең көздің сипаттамаларын сақтайды. Алайда сутегінің бір бөлігі тотығып кеткеннен кейін метан мөлшері азаяды, және $\ln(CH_4/H_2)$ мәні төмендейді. Қалған сутегінің δD мәні -700‰ -дан төмен, ал $\ln(CH_4/H_2)$ мәні -4 -тен төмен болады [34].

Талдау және талқылау

Аталған шолу мақалада табиғи сутегінің пайда болуы, таралуы және идентификациясы

қарастырылған, бұл төмен көміртекті экономикаға көшу жағдайында перспективті энергия көзі ретінде қарастырылады. Сутегі – таза, экологиялық тұрақты және жоғары энергетикалық тығыздыққа ие отын ретінде ғалымдар мен инженерлердің ерекше назарын аударуда. Алайда, көптеген зерттеулер сутегінің судың электролизі немесе метанды қайта құру арқылы өндіруге бағытталғанымен, табиғи сутегінің игеру мен пайдалану оның құнын едәуір төмендетіп, тұрақты энергетикалық ауысымға жаңа жолдар ұсына алады.

Шолудың негізгі ерекшеліктерінің бірі – табиғи сутегінің көздерін егжей-тегжейлі талдауы. Авторлар қолда бар деректерді жүйелеп, оның түзілуінің негізгі бірнеше үдерісін атап көрсеткен: серпентинизация, судың радиолізі, тау жыныстарының механикалық бұзылуы, магманың дегазациясы және жер қыртысының үгілуі. Перидотиттің гидротермалдық өзгеруіне байланысты серпентинизация, әсіресе мұхит жоталары мен субдукция аймақтарында сутегі түзілуінің негізгі механизмі ретінде ерекшеленеді. Темірдің эквивалентті тотығуының сумен әрекеттесуі сутегінің түзілуіне әкеледі, бұл үдеріс геологиялық дәуірлер бойы белсенді болып қалады. Серпентинизацияның сутегі теңгерімі үшін маңыздылығы көптеген бақылаулармен, соның ішінде Атлант мұхитындағы «Рейнбоу» сияқты гидротермалдық жүйелердегі H_2 концентрациясының жоғары деңгейлерімен расталады.

Судың радиолізі, уран, торий және калийдің радиоактивті ыдырауының әсерінен пайда болатын үдеріс ретінде, сутегінің әмбебап түзілу механизмі болып табылады. Ол әртүрлі температура мен қысым жағдайларында мүмкін болады, бұл оны жер қыртысы мен мұхиттық литосферадағы сутегінің маңызды көзі етеді. Қызығы, радиоліз тек сутегіні ғана емес, сонымен қатар сутегі пероксиді және оттегі сияқты тотықтырғыштарды да түзе алады, бұл жер қойнауындағы күрделі химиялық әрекеттесулерге ықпал етуі мүмкін.

Тау жыныстарының механикалық бұзылуы, бос радикалдардың түзілуімен қатар жүретін үдеріс, маңызды рөл атқарады. Бұл үдеріс әсіресе тектоникалық белсенді аймақтарда, жарықшақтар мен жарықтардың сутегінің бөлінуіне ықпал ететін жерлерде айқын көрінеді. Авторлар Сан-Андреас және Яманкаси сияқты белсенді тектоникалық аймақтардағы сутегінің жоғары концентрациясы туралы мәліметтер келтіреді, бұл тектоникалық үдерістер мен сутегі түзілуінің тығыз байланысын растайды. Бұл механизм сонымен қатар жер қыртысының терең қабаттарындағы микробтық экожүйелерді қолдауы мүмкін, бұл оны энергетика ғана емес, сондай-ақ биогеохимия тұрғысынан да маңызды етеді.

Магманың дегазациясы мен кристалдану үдерістері СОН жүйесіндегі сутегінің жалпы

үлесін арттырады. Магмалық жүйелер, әсіресе жоғары температураларда, H_2 бөлінуіне ықпал етеді, ал химиялық тепе-теңдік реакциялары сутегінің түзілуіне қарай ығысады. Вулкандық жүйелерден сутегінің дегазациясы мысалдары және магмалық жыныстардың теңіз суымен әрекеттесуі вулкандық белсенділіктің сутегінің тағы бір маңызды көзі екенін дәлелдейді.

Табиғи сутегінің географиялық таралуы оның түзілуі мүмкін геологиялық жағдайлардың кең ауқымын көрсетеді. H_2 -нің мұхиттық спредингтік орталықтарда, пассивті шеттерде, субдукция аймақтарында және плиталар ішіндегі ортада анықталуы бұл құбылыстың ғаламдық сипатын айқын көрсетеді. Авторлар әсіресе Атлант мұхитының Орта жотасында, Малидағы Таудени бассейнінде және Шығыс Африкадағы риф аймақтарында сутегінің анықталуына байланысты зерттеулерді ерекше атап өтеді. Бұл деректер белсенді тектоникасы бар аймақтарда табиғи сутегінің энергия ресурсы ретіндегі елеулі әлеуетін растайды.

Табиғи сутегіні идентификациялау изотоптық құрам мен бірге түзілетін газдардың құрамын талдауды қажет ететін күрделі процесс ретінде сипатталады. Авторлар сутегінің мантиялық және қыртыстық шығу тегін ажырату үшін δD мәндерін және H_2/CH_4 қатынасын қолдануды сипаттайды. Канзастағы бұрғылау ұңғымалары мысалында көрсетілгендей, мұндай талдау әдістері сутегінің көзін анықтап қана қоймай, оның генетикалық сипаттамаларын да бағалауға мүмкіндік береді. Изотоптық талдауды қолдану табиғи H_2 қорларын дәлірек бағалауға жаңа мүмкіндіктер ашады.

Шолу мақалада табиғи сутегіні зерттеудің қазіргі жай-күйі де ерекше атап өтілген. Табиғи сутегі кен орындарын барлау бастапқы сатыда болғанымен, мақала бұл саланың елеулі әлеуетін көрсетеді. H_2 өндіру технологияларын әзірлеу, оның түзілу және жинақталу механизмдерін зерттеу, сондай-ақ қорларды сандық бағалау болашақ зерттеулердің негізгі бағыттары болып табылады. Авторлар табиғи сутегі өндіріс шығындарын төмендетіп, экологиялық таза энергия көзімен қамтамасыз ете отырып, энергетикалық революцияда маңызды рөл атқара алатынын әділ атап өтеді.

Осылайша, ұсынылған жұмыс табиғи сутегі мен оның геологиялық аспектілері туралы ауқымды ақпаратты жүйелейтін құнды ғылыми зерттеу болып табылады. Мақала H_2 табиғи көздерін барлауға және игеруге, сондай-ақ оның жаһандық геохимиялық үдерістердегі рөлін тереңірек түсінуге

бағытталған болашақ зерттеулер үшін негіз ретінде қызмет етеді.

Қорытынды

Табиғи сутегі экологиялық таза және қолжетімді энергия көзі ретінде айтарлықтай әлеуетке ие, ол болашақ төмен көміртекті экономикада маңызды рөл атқара алады. Оның өндірілуі мен пайдаланылуы сутегі энергетикасының құнын едәуір төмендетіп, энергетикалық ауысымды жеделдетуге мүмкіндік береді. Табиғи сутегінің түзілуіне жауапты негізгі үдерістерге серпентинизация, судың радиолізі, тау жыныстарының механикалық бұзылуы, магманың дегазациясы және жер қыртысының үгілуі жатады. Олардың ішінде серпентинизация мұхиттық жоталар мен субдукция аймақтарындағы геологиялық жүйелерде сутегінің ұзақ мерзімді және ауқымды өндірісін қамтамасыз ететін негізгі механизм ретінде ерекшеленеді.

Табиғи сутегінің географиялық таралуы мұхиттық спрединг орталықтарын, пассивті шеттерді, разломдарды, субдукция аймақтарын және плиталар ішіндегі өңірлерді қамтитын кең геологиялық жағдайларды көрсетеді. Тектоникалық белсенді аймақтар, соның ішінде Атлант мұхитының Орта жотасы мен Шығыс Африканың риф аймақтары, сутегінің жиналуы мен бөлінуінің негізгі орындары болып табылады. Бұл мәліметтер табиғи сутегінің ғаламдық таралу сипатын және оның қолжетімділігін айқындайды.

Табиғи сутегіні анықтау заманауи талдау әдістерін қолдануды талап етеді, оның ішінде изотоптық зерттеулер мен метан және гелий сияқты қосымша газдарды зерттеу. δD мәндерін және H_2/CH_4 қатынасын қолдану арқылы сутегінің мантиялық немесе қыртыстық шығу тегін ажыратуға болады, бұл оның генезисін түсіну және қорларды бағалау үшін маңызды. Перспективалық мүмкіндіктеріне қарамастан, табиғи сутегіні зерттеу бастапқы кезеңде тұр, ал кен орындарын барлау мен өндіріс технологияларын әзірлеу қосымша күш-жігерді қажет етеді.

Аталған шолу мақалада табиғи сутегі жаһандық энергетикалық жүйеде маңызды рөл атқара алатыны атап көрсетілген, ол арзан әрі экологиялық таза ресурс болып табылады. Дегенмен, оны тиімді игеру үшін түзілу, жиналу және көшу үдерістерін тереңірек зерттеу, сондай-ақ оны өндіру мен сақтауға арналған технологияларды әзірлеу қажет. Ұсынылған шолу мақала табиғи сутегі туралы білімді жүйелеуге елеулі үлес қосады және осы саладағы ғылыми және технологиялық әзірлемелер үшін негіз ретінде септігін тигізеді.

ҚОСЫМША

Қаржыландыру көзі. Зерттеу жұмысы Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігі, Ғылым комитетінің қолдауымен бағдарламалы-нысаналы қаржыландыру жобасы аясында жүзеге асырылды (грант № BR21882359).

ADDITIONAL INFORMATION

Funding source. The research work was supported by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan within the framework of the program funding project (grant number BR21882359).

Мүдделер қайшылығы. Авторлар осы мақаланы жариялауға байланысты айқын және ықтимал мүдделер қайшылығының жоқтығын жариялайды.

Авторлардың қосқан үлесі. Барлық авторлар өздерінің авторлығының ICMJE халықаралық критерийлеріне сәйкестігін растайды (барлық авторлар тұжырымдаманы әзірлеуге, зерттеу жүргізуге және мақаланы дайындауға айтарлықтай үлес қосты, жарияланғанға дейін соңғы нұсқасын оқып, мақұлдады). Ең үлкен үлес келесідей бөлінді: Опахай С. – мәтін жазу, аналитика, дереккөздермен жұмыс, қолжазбаны редакциялау; Кутербеков К.А. – дайындыққа жалпы басшылық жасау, мәтінді құрылымдау; Бекмырза К.Ж. – дереккөздермен жұмыс, әдеби шолуды дайындау; Кабышев А.М. – мәтінді өңдеу; Кубенова М.М. – талдау, әдебиеттер тізімі; Айдарбеков Н.К. – ғылыми мақалаларды талдау; Жумадилова Ж. – мәтінді теру, талдау және қорытынды; Зейнулла Ж.С. – жалпы талдау және әдебиеттерді өңдеу.

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

Authors' contribution. All authors made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the work. The greatest contribution is distributed as follows: Serikzhan Opakhai – writing texts, analytics, working with sources, editing manuscripts; Kairat A. Kuterbekov – general guidance on preparation and structuring of the article; Kenzhebatyr Zh. Bekmyrza – working with literature sources, preparing a literature review; Asset M. Kabyshev – text editing; Marzhan M. Kubenova – analysis, bibliography; Nursultan K. Aidarbekov – analysis of scientific articles; Zhuldyz Zhumadilova – text input, analysis and conclusion; Zhassulan S. Zeinulla – general analysis and review of literature.

ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Hassan Q., Algburi S., Sameen A.Z. Hydrogen as an energy carrier: properties, storage methods, challenges, and future implications // *Environment Systems and Decisions*. 2024. Vol. 44, N 2. P. 327–350. doi: [10.1007/s10669-023-09932-z](https://doi.org/10.1007/s10669-023-09932-z).
2. Zhang B., Zhang S.-X., Yao R., et al. Progress and prospects of hydrogen production: Opportunities and challenges // *Journal of Electronic Science and Technology*. 2021. Vol. 19, N 2. doi: [10.1016/j.jnlest.2021.100080](https://doi.org/10.1016/j.jnlest.2021.100080).
3. Jolaoso L.A., Bello I.T., Ojelade O.A., et al. Operational and scaling-up barriers of SOEC and mitigation strategies to boost H₂ production – a comprehensive review // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2023. Vol. 48, N 85. P. 33017–33041. doi: [10.1016/j.ijhydene.2023.05.077](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.05.077).
4. Zheng Y., Chen Z., Zhang J. Solid oxide electrolysis of H₂O and CO₂ to produce hydrogen and low-carbon fuels // *Electrochemical Energy Reviews*. 2021. Vol. 4. P. 508–517. doi: [10.1007/s41918-021-00097-4](https://doi.org/10.1007/s41918-021-00097-4).
5. Hassan I.A., Ramadan H.S., Saleh M.A., Hissel D. Hydrogen storage technologies for stationary and mobile applications: Review, analysis and perspectives // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021. Vol. 149. doi: [10.1016/j.rser.2021.111311](https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111311).
6. Boretti A., Pollet B.G. Hydrogen economy: Paving the path to a sustainable, low-carbon future // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2024. Vol. 93. P. 307–319. doi: [10.1016/j.ijhydene.2024.10.350](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.10.350).
7. Welhan J.T., Craig H. Methane and hydrogen in East Pacific Rise hydrothermal fluids // *Geophysical Research Letters*. 1979. Vol. 6. P. 829–831. doi: [10.1029/GL006i011p00829](https://doi.org/10.1029/GL006i011p00829).
8. Sudarikov S., Narkevsky E., Petrov V. Identification of two new hydrothermal fields and sulfide deposits on the Mid-Atlantic Ridge as a result of the combined use of exploration methods: Methane detection, water column chemistry, ore sample analysis, and camera surveys // *Minerals*. 2021. Vol. 11, N 7. doi: [10.3390/min11070726](https://doi.org/10.3390/min11070726).
9. Liu J., Liu Q., Xu H., et al. Genesis and energy significance of natural hydrogen // *Unconventional Resources*. 2023. Vol. 3. P. 176–182. doi: [10.1016/j.uncres.2023.01.002](https://doi.org/10.1016/j.uncres.2023.01.002).
10. Sugisaki R., Ido M., Takeda H., et al. Origin of hydrogen and carbon dioxide in fault gases and its relation to fault activity // *Journal of Geology*. 1983. Vol. 91. P. 239–258. <http://www.jstor.org/stable/30062111>.
11. Mathur Y., Awosiji V., Mukerji T., et al. Soil geochemistry of hydrogen and other gases along the San Andreas fault // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2024. Vol. 50. P. 411–419. doi: [10.1016/j.ijhydene.2023.09.032](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.09.032).
12. Wakita H., Nakamura Y., Kita I., et al. Hydrogen release: New indicator of fault activity // *Science*. 1980. Vol. 210. P. 188–190. doi: [10.1126/science.210.4466.188](https://doi.org/10.1126/science.210.4466.188).
13. McCarthy J.H.Jr., Cunningham K.I., Roberts A.A., Dietrich J.A. Soil Gas Studies around Hydrogen-Rich Natural Gas Wells in Northern Kansas. Reston, VA, USA: United States Department of The Interior Geological Survey; 1986. Open-file Report 86-4641.
14. Niviv V.A., Pukha V.V., Mokrushina O.D., Mikhailova J.A. The Molecular Weight Distribution of Occluded Hydrocarbon Gases in the Khibiny Nepheline–Syenite Massif (Kola Peninsula, NW Russia) in Relation to the Problem of Their Origin // *Geosciences*. 2022. Vol. 12, N 11. doi: [10.3390/geosciences12110416](https://doi.org/10.3390/geosciences12110416).
15. Mahlstedt N., Horsfield B., Weniger P., et al. Molecular hydrogen from organic sources in geological systems // *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2022. Vol. 105. doi: [10.1016/j.jngse.2022.104704](https://doi.org/10.1016/j.jngse.2022.104704).
16. Zhang T., Zhang Y., Katterbauer K., et al. Deep learning-assisted phase equilibrium analysis for producing natural hydrogen // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2024. Vol. 50. P. 473–486. doi: [10.1016/j.ijhydene.2023.09.097](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.09.097).
17. Klein F., Bach W., McCollom T.M. Compositional controls on hydrogen generation during serpentinization of ultramafic rocks // *Lithos*. 2013. Vol. 178. P. 55–69. doi: [10.1016/j.lithos.2013.03.008](https://doi.org/10.1016/j.lithos.2013.03.008).
18. Macdonald D.D., Engelhardt G.R., Petrov A.A. A critical review of radiolysis issues in water-cooled fission and fusion reactors: Part I, assessment of radiolysis models // *Corrosion and Materials Degradation*. 2022. Vol. 3, N 3. P. 470–535. doi: [10.3390/cmd3030028](https://doi.org/10.3390/cmd3030028).

19. Binder J., Dabrowska A.K., Tokarczyk M., et al. Epitaxial hexagonal boron nitride for hydrogen generation by radiolysis of interfacial water // *Nano Letters*. 2023. Vol. 23, N 4. P. 1267–1272. doi: [10.1021/acs.nanolett.2c04434](https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.2c04434).
20. Xu Q., Tian A., Luo X., et al. Chemical damage constitutive model establishment and the energy analysis of rocks under water–rock interaction // *Energies*. 2022. Vol. 15, N 24. doi: [10.3390/en15249386](https://doi.org/10.3390/en15249386).
21. Zhan S., Zeng L., Al-Yaseri A., et al. Geochemical modelling on the role of redox reactions during hydrogen underground storage in porous media // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2024. Vol. 50. P. 19–35. doi: [10.1016/j.ijhydene.2023.06.153](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.06.153).
22. Combaudon V., Moretti I., Kleine B.I., Stefansson A. Hydrogen emissions from hydrothermal fields in Iceland and comparison with the Mid-Atlantic Ridge // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2022. Vol. 47, N 18. P. 10217–10227. doi: [10.1016/j.ijhydene.2022.01.101](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.01.101).
23. Gordienko V.V. On the circulation of hydrogen in the atmosphere and the Earth's crust // *Geofizicheskiy Zhurnal*. 2021. Vol. 43, N 5. P. 35–59. doi: [10.24028/gzh.v43i5.244051](https://doi.org/10.24028/gzh.v43i5.244051).
24. Poli S., Franzolin E., Fumagalli P., Crottini A. The transport of carbon and hydrogen in subducted oceanic crust: An experimental study to 5 GPa // *Earth and Planetary Science Letters*. 2009. Vol. 278, N 3–4. P. 350–360. doi: [10.1016/j.epsl.2008.12.022](https://doi.org/10.1016/j.epsl.2008.12.022).
25. Pasquet G., Houssein H.R., Sissmann O., et al. An attempt to study natural H₂ resources across an oceanic ridge penetrating a continent: The Asal–Ghoubbet Rift (Republic of Djibouti) // *Geosciences*. 2021. Vol. 12, N 1. doi: [10.3390/geosciences12010016](https://doi.org/10.3390/geosciences12010016).
26. Worman S.L., Pratson L.F., Karson J.A., Schlesinger W.H. Abiotic hydrogen (H₂) sources and sinks near the Mid-Ocean Ridge (MOR) with implications for the seafloor biosphere // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2020. Vol. 117, N 24. P. 13283–13293. doi: [10.1073/pnas.2002619117](https://doi.org/10.1073/pnas.2002619117).
27. Charnoz S., Falco A., Tremblay P., et al. The effect of a small amount of hydrogen in the atmosphere of ultrahot magma-ocean planets: Atmospheric composition and escape // *Astronomy & Astrophysics*. 2023. Vol. 674. doi: [10.1051/0004-6361/202245763](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202245763).
28. Pokrovski G.S., Blanchard M., Saunier G., Poitras F. Mechanisms and rates of pyrite formation from hydrothermal fluid revealed by iron isotopes // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2021. Vol. 304. P. 281–304. doi: <https://doi.org/10.1016/j.gca.2021.03.006>.
29. Newell K.D., Doveton J.H., Merriam D.F., et al. H₂-rich and hydrocarbon gas recovered in a deep Precambrian well in northeastern Kansas // *Natural Resources Research*. 2007. Vol. 16. P. 277–292. doi: <https://doi.org/10.1007/s11053-007-9052-7>.
30. Combaudon V. Mechanism and quantification of natural hydrogen generation within intracratonic areas: The case of the Mid-Rift System (Kansas, USA): dissertation. Université de Pau et des Pays de l'Adour; 2023.
31. Goebel E.D., Coveney R.M.J., Angino E.E., et al. Geology, composition, isotopes of naturally occurring H₂/N₂ rich gas from wells near Junction City, Kansas // *Oil & Gas Journal*. 1984. Vol. 82, N 19. P. 215–222.
32. Quesnel B., Scheffer C., Beaudoin G. The light stable isotope (hydrogen, boron, carbon, nitrogen, oxygen, silicon, sulfur) composition of orogenic gold deposits. In: Huston D., Gutzmer J., editors. *Isotopes in Economic Geology, Metallogensis and Exploration*. Cham : Springer International Publishing, 2023. P. 283–328.
33. Arrouel C., Prinzhofer A. Genesis of natural hydrogen: New insights from thermodynamic simulations // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2021. Vol. 46, N 36. P. 18780–18794. doi: [10.1016/j.ijhydene.2021.03.057](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.03.057).
34. Klein F., Tamas J.D., Bach W. Abiotic sources of molecular hydrogen on Earth // *Elements*. 2020. Vol. 16, N 1. P. 19–24. doi: [10.2138/gselements.16.1.19](https://doi.org/10.2138/gselements.16.1.19).

REFERENCES

1. Hassan Q., Algburi S., Sameen A.Z. Hydrogen as an energy carrier: properties, storage methods, challenges, and future implications. *Environment Systems and Decisions*. 2024;44(2):327–350. doi: [10.1007/s10669-023-09932-z](https://doi.org/10.1007/s10669-023-09932-z).
2. Zhang B, Zhang S-X, Yao R, et al. Progress and prospects of hydrogen production: Opportunities and challenges. *Journal of Electronic Science and Technology*. 2021;19(2). doi: [10.1016/j.jnlest.2021.100080](https://doi.org/10.1016/j.jnlest.2021.100080).
3. Jolaoso LA, Bello IT, Ojelade OA, et al. Operational and scaling-up barriers of SOEC and mitigation strategies to boost H₂ production – a comprehensive review. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2023;48(85):33017–33041. doi: [10.1016/j.ijhydene.2023.05.077](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.05.077).
4. Zheng Y, Chen Z, Zhang J. Solid oxide electrolysis of H₂O and CO₂ to produce hydrogen and low-carbon fuels. *Electrochemical Energy Reviews*. 2021;4:508–517. doi: [10.1007/s41918-021-00097-4](https://doi.org/10.1007/s41918-021-00097-4).
5. Hassan IA, Ramadan HS, Saleh MA, Hissel D. Hydrogen storage technologies for stationary and mobile applications: Review, analysis and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021;149. doi: [10.1016/j.rser.2021.111311](https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111311).
6. Boretti A, Pollet BG. Hydrogen economy: Paving the path to a sustainable, low-carbon future. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2024;93:307–319. doi: [10.1016/j.ijhydene.2024.10.350](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.10.350).
7. Welhan JT, Craig H. Methane and hydrogen in East Pacific Rise hydrothermal fluids. *Geophysical Research Letters*. 1979;6:829–831. doi: [10.1029/GL006i011p00829](https://doi.org/10.1029/GL006i011p00829).
8. Sudarikov S, Narkevsky E, Petrov V. Identification of two new hydrothermal fields and sulfide deposits on the Mid-Atlantic Ridge as a result of the combined use of exploration methods: Methane detection, water column chemistry, ore sample analysis, and camera surveys. *Minerals*. 2021;11(7). doi: [10.3390/min11070726](https://doi.org/10.3390/min11070726).
9. Liu J, Liu Q, Xu H, et al. Genesis and energy significance of natural hydrogen. *Unconventional Resources*. 2023;3:176–182. doi: [10.1016/j.uncres.2023.01.002](https://doi.org/10.1016/j.uncres.2023.01.002).
10. Sugisaki R, Ido M, Takeda H, et al. Origin of hydrogen and carbon dioxide in fault gases and its relation to fault activity. *Journal of Geology*. 1983;91:239–258. <http://www.jstor.org/stable/30062111>.
11. Mathur Y, Awosiji V, Mukerji T, et al. Soil geochemistry of hydrogen and other gases along the San Andreas fault. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2024;50:411–419. doi: [10.1016/j.ijhydene.2023.09.032](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.09.032).
12. Wakita H, Nakamura Y, Kita I, et al. Hydrogen release: New indicator of fault activity. *Science*. 1980;210:188–190. doi: [10.1126/science.210.4466.188](https://doi.org/10.1126/science.210.4466.188).

13. McCarthy JH.Jr., Cunningham KI, Roberts AA, Dietrich JA. Soil Gas Studies around Hydrogen-Rich Natural Gas Wells in Northern Kansas. Reston, VA, USA: United States Department of The Interior Geological Survey; 1986. Open-file Report 86-4641.
14. Nivin VA, Pukha VV, Mokrushina OD, Mikhailova JA. The Molecular Weight Distribution of Occluded Hydrocarbon Gases in the Khibiny Nepheline–Syenite Massif (Kola Peninsula, NW Russia) in Relation to the Problem of Their Origin. *Geosciences*. 2022;12(11):416. doi: [10.3390/geosciences12110416](https://doi.org/10.3390/geosciences12110416).
15. Mahlstedt N, Horsfield B, Weniger P, et al. Molecular hydrogen from organic sources in geological systems. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2022;105:104704. doi: [10.1016/j.jngse.2022.104704](https://doi.org/10.1016/j.jngse.2022.104704).
16. Zhang T, Zhang Y, Katterbauer K, et al. Deep learning–assisted phase equilibrium analysis for producing natural hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2024;50:473–486. doi: [10.1016/j.ijhydene.2023.09.097](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.09.097).
17. Klein F, Bach W, McCollom TM. Compositional controls on hydrogen generation during serpentinization of ultramafic rocks. *Lithos*. 2013;178:55–69. doi: [10.1016/j.lithos.2013.03.008](https://doi.org/10.1016/j.lithos.2013.03.008).
18. Macdonald DD, Engelhardt GR, Petrov AA. A critical review of radiolysis issues in water-cooled fission and fusion reactors: Part I, assessment of radiolysis models. *Corrosion and Materials Degradation*. 2022;3(3):470–535. doi: [10.3390/cmd3030028](https://doi.org/10.3390/cmd3030028).
19. Binder J, Dabrowska AK, Tokarczyk M, et al. Epitaxial hexagonal boron nitride for hydrogen generation by radiolysis of interfacial water. *Nano Letters*. 2023;23(4):1267–1272. doi: [10.1021/acs.nanolett.2c04434](https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.2c04434).
20. Xu Q, Tian A, Luo X, et al. Chemical damage constitutive model establishment and the energy analysis of rocks under water–rock interaction. *Energies*. 2022;15(24):9386. doi: [10.3390/en15249386](https://doi.org/10.3390/en15249386).
21. Zhan S, Zeng L, Al-Yaseri A, et al. Geochemical modelling on the role of redox reactions during hydrogen underground storage in porous media. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2024;50:19–35. doi: [10.1016/j.ijhydene.2023.06.153](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.06.153).
22. Combaudon V, Moretti I, Kleine BI, Stefansson A. Hydrogen emissions from hydrothermal fields in Iceland and comparison with the Mid-Atlantic Ridge. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2022;47(18):10217–10227. doi: [10.1016/j.ijhydene.2022.01.101](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.01.101).
23. Gordienko VV. On the circulation of hydrogen in the atmosphere and the Earth's crust. *Geophysical Journal*. 2021;43(5):35–59. doi: [10.24028/gzh.v43i5.244051](https://doi.org/10.24028/gzh.v43i5.244051).
24. Poli S, Franzolin E, Fumagalli P, Crottini A. The transport of carbon and hydrogen in subducted oceanic crust: An experimental study to 5 GPa. *Earth and Planetary Science Letters*. 2009;278(3–4):350–360. doi: [10.1016/j.epsl.2008.12.022](https://doi.org/10.1016/j.epsl.2008.12.022).
25. Pasquet G, Houssein HR, Sissmann O, et al. An attempt to study natural H₂ resources across an oceanic ridge penetrating a continent: The Asal–Ghoubbet Rift (Republic of Djibouti). *Geosciences*. 2021;12(1):16. doi: [10.3390/geosciences12010016](https://doi.org/10.3390/geosciences12010016).
26. Worman SL, Pratson LF, Karson JA, Schlesinger WH. Abiotic hydrogen (H₂) sources and sinks near the Mid-Ocean Ridge (MOR) with implications for the seafloor biosphere. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2020;117(24):13283–13293. doi: [10.1073/pnas.2002619117](https://doi.org/10.1073/pnas.2002619117).
27. Charnoz S, Falco A, Trembling P, et al. The effect of a small amount of hydrogen in the atmosphere of ultrahot magma-ocean planets: Atmospheric composition and escape. *Astronomy & Astrophysics*. 2023;674:A224. doi: [10.1051/0004-6361/202245763](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202245763).
28. Pokrovski GS, Blanchard M, Saunier G, Poitrasson F. Mechanisms and rates of pyrite formation from hydrothermal fluid revealed by iron isotopes. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2021;304:281–304. doi: [10.1016/j.gca.2021.03.006](https://doi.org/10.1016/j.gca.2021.03.006).
29. Newell KD, Doveton JH, Merriam DF, et al. H₂-rich and hydrocarbon gas recovered in a deep Precambrian well in northeastern Kansas. *Natural Resources Research*. 2007;16:277–292. doi: [10.1007/s11053-007-9052-7](https://doi.org/10.1007/s11053-007-9052-7).
30. Combaudon V. *Mechanism and quantification of natural hydrogen generation within intracratonic areas: The case of the Mid-Rift System (Kansas, USA)* [dissertation]. Université de Pau et des Pays de l'Adour; 2023.
31. Goebel ED, Covey RMJ, Angino EE, et al. Geology, composition, isotopes of naturally occurring H₂/N₂ rich gas from wells near Junction City, Kansas. *Oil & Gas Journal*. 1984;82(19):215–222.
32. Quesnel B, Scheffer C, Beaudoin G. *The light stable isotope (hydrogen, boron, carbon, nitrogen, oxygen, silicon, sulfur) composition of orogenic gold deposits*. In: Huston D., Gutzmer J., editors. *Isotopes in Economic Geology, Metallogenesis and Exploration*. Cham: Springer International Publishing; 2023. P. 283–328.
33. Arrouel C, Prinzhofer A. Genesis of natural hydrogen: New insights from thermodynamic simulations. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2021;46(36):18780–18794. doi: [10.1016/j.ijhydene.2021.03.057](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.03.057).
34. Klein F, Tarnas JD, Bach W. Abiotic sources of molecular hydrogen on Earth. *Elements*. 2020. Vol. 16, N 1. P. 19–24. doi: [10.2138/gselements.16.1.19](https://doi.org/10.2138/gselements.16.1.19).

АВТОРЛАР ТУРАЛЫ АҚПАРАТ

***Опахай Серікжан**

PhD

ORCID [0000-0001-6789-4844](https://orcid.org/0000-0001-6789-4844)

e-mail: serikjan_0707@mail.ru.

Кутербеков Қайрат Атажанұлы

физ.-мат. ғылым. докт., профессор

ORCID [0000-0001-5421-271X](https://orcid.org/0000-0001-5421-271X)

e-mail: kkuterbekov@gmail.com.

Бекмырза Кенжебатыр Жағыпарұлы

PhD, доцент

ORCID [0000-0001-8902-8736](https://orcid.org/0000-0001-8902-8736)

e-mail: kbekmyrza@yandex.kz.

Қабышев Әсет Маратұлы

PhD

ORCID [0000-0003-1472-4045](https://orcid.org/0000-0003-1472-4045)

e-mail: assetenu@gmail.com.

AUTHORS' INFO

***Serikzhan Opakhai**

PhD

ORCID [0000-0001-6789-4844](https://orcid.org/0000-0001-6789-4844)

e-mail: serikjan_0707@mail.ru.

Kairat A. Kuterbekov

Doct. Sc. (Physics and Mathematics), Professor

ORCID [0000-0001-5421-271X](https://orcid.org/0000-0001-5421-271X)

e-mail: kkuterbekov@gmail.com.

Kenzhebatyr Zh. Bekmyrza

PhD, Associate Professor

ORCID [0000-0001-8902-8736](https://orcid.org/0000-0001-8902-8736)

e-mail: kbekmyrza@yandex.kz.

Asset M. Kabyshev

PhD

ORCID [0000-0003-1472-4045](https://orcid.org/0000-0003-1472-4045)

e-mail: assetenu@gmail.com.

Кубенова Маржан Маликқызы

PhD

ORCID [0000-0003-2012-2702](https://orcid.org/0000-0003-2012-2702)e-mail: kubenova.m@yandex.kz.**Айдарбеков Нұрсұлтан Көпжасарұлы**

PhD

ORCID [0000-0002-1981-5416](https://orcid.org/0000-0002-1981-5416)e-mail: nursultan02_22.10.92@mail.ru.**Жұмаділова Жұлдыз**ORCID [0000-0002-5982-8983](https://orcid.org/0000-0002-5982-8983)e-mail: zhumadilovaz@gmail.com.**Зейнулла Жасұлан Серікұлы**ORCID [0000-0002-5339-3165](https://orcid.org/0000-0002-5339-3165)e-mail: zeizhaser@mail.ru.**Marzhan M. Kubenova**

PhD

ORCID [0000-0003-2012-2702](https://orcid.org/0000-0003-2012-2702)e-mail: kubenova.m@yandex.kz.**Nursultan K. Aidarbekov**

PhD

ORCID [0000-0002-1981-5416](https://orcid.org/0000-0002-1981-5416)e-mail: nursultan02_22.10.92@mail.ru.**Zhuldyz Zhumadilova**ORCID [0000-0002-5982-8983](https://orcid.org/0000-0002-5982-8983)e-mail: zhumadilovaz@gmail.com.**Zhassulan S. Zeinulla**ORCID [0000-0002-5339-3165](https://orcid.org/0000-0002-5339-3165)e-mail: zeizhaser@mail.ru.

*Автор, ответственный за переписку/Corresponding Author