

О водородной дегазации в зонах современной активизации Украины

В. В. Гордиенко, 2019

Институт геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины, Киев, Украина

Поступила 6 июня 2019 г.

У районах Землі з активними ендегенними режимами часто спостерігається дегазація надр, зазвичай поблизу глибинних розломів. Серед газів, що надходять на поверхню, найбільші концентрації мають водяна пара, вуглекислий газ, азот, сірководень, вуглеводні (переважно метан). Водень поширений значно менше. Однак воднева дегазація Землі може становити практичний інтерес, слугувати джерелом формування родовищ екологічно чистого палива. Таких родовищ поки відомо мало, і відкрито їх випадково. На території України, як і в багатьох інших країнах, виявлено морфологічні ознаки (овальні западини), можливо, пов'язані з виходами водню на поверхню. Вони розміщуються всередині більших зон сучасної активізації, які діагностують за даними комплексу геолого-геофізичних методів. Утім способи визначення найперспективніших ділянок поки не ясні. Розглянуто нечисленні дані щодо поширення глибинного водню в різних регіонах України. Наведено попередні міркування з приводу можливих шляхів конкретизації пошукових критеріїв у платформній частині території країни, у Донбасі, Криму та Карпатах. Становить інтерес вивчення винесення водню термальними водами Закарпаття. В такому випадку можлива експлуатація комбінованого родовища — геотермально-водневого. Проте викладені міркування є попередніми, ґрунтуються на дуже обмеженій інформації. Передусім необхідне нагромадження експериментальних даних щодо потоків водню на відносно невеликих глибинах у підґрунтового шарі зон сучасної активізації поблизу розломів. Інтерес можуть являти собою постгеосинклінальні зони та розташовані на платформі.

Ключові слова: воднева дегазація, критерії пошуку родовищ, зони сучасної активізації.

Введение. Статья посвящена более подробному рассмотрению одной из частей публикации автора "О дегазации Земли". Речь идет о фрагменте проблемы водородной дегазации, широко обсуждаемой в настоящее время перспективе промышленного использования месторождений этого газа [Matthews, 2002 и др.]. Хотя собственно месторождений (т. е. объектов с изученными границами и запасами, для которых доказана рентабельность разработки) еще не существует (см. ниже). Но уже сформулированы существенные ограничения практического использования водорода. Они касаются, прежде всего, не природного газа, а получаемого разными путями из различных исходных материалов.

И связаны главным образом с проблемой его транспортировки [Eschenbach, 2013; Hydrogen ..., 2019; Romm, 2004 и др.]. Под сомнением оказывается и экологичность такого водорода. Сторонники его использования говорят об отсутствии в продукте сгорания (воде) углекислоты, забывая упомянуть о ее выбросе при изготовлении H_2 . Надо отметить, что современное направление в борьбе с глобальным потеплением выглядит странно. Доказано, что природа без помощи человека способна создавать концентрации CO_2 , достижимые только при сжигании всего ископаемого топлива на Земле. Сопоставление изменения температуры и концентрации CO_2 в достаточно большом диапазоне геологического вре-

мени показывает, что вначале меняется температура, т. е. ее изменение — причина роста содержания углекислого газа в атмосфере, а не наоборот [Montañez et al., 2007 и др.]. Роль водяного пара в парниковом эффекте в 3—4 раза больше роли всего углекислого газа, а индустриальные выбросы составляют лишь часть его естественной генерации.

При попытках изучить проявления водорода в полосе предполагаемых месторождений, протягивающейся на востоке США от канадской границы до Канзаса [Matthews, 2002], были обнаружены сравнительно небольшие притоки H_2 [Coveney et al., 1987; Guélard et al., 2017] иногда смешанного происхождения: природного и техногенного [Природные ..., 1978 и др.]. Для месторождений глубинного газа подходящим представляется коровое происхождение, связанное с серпентинизацией мафитов и ультрамафитов и/или сходными по химизму процессами с участием двухвалентного железа. Опробование выходов водорода, с которыми, возможно, могут быть связаны месторождения, продолжается [Zgonnic et al., 2015; Natural ..., 2018 и др.], целенаправленно им с 2012 г. занимается компания Natural Hydrogen Energy LLC. Ее сотрудники ищут (в том числе и по космоснимкам) прежде всего проявления H_2 внутри и поблизости от овальных впадин, встреченных ранее и на Восточно-Европейской платформе [Ларин и др., 2008, 2015; Очерки ..., 2018 и др.]. Предполагается, что эти поверхностные структуры соответствуют выходам "труб дегазации". Восстановительная активность водорода разрушает естественные структуры осадков, способствуя их разрыхлению и оседанию. На сайте компании отмечено, что до сих пор открытия месторождений были случайными (их несколько, наиболее известное — на юге Мали в 2012 г., глубина — десятки метров, содержание H_2 — 98 %). Теперь перед бурением поисковых скважин выделены территории с выходами водорода до нескольких т/сут (площадь не названа). На одном из перспективных участков предполагается про-

бурить скважину глубиной 3—4 км, достичь резервуара водорода, поступающий на поверхность газ поставлять на расположенный неподалеку завод по производству аммиака. Сведения о реализации проекта противоречивы. В местной прессе (The Nebraska Signal от 08.01.2019) сообщается со ссылкой на руководителя фирмы о завершающем этапе работ [Scelli, 2019]. К концу месяца резервуар должен быть достигнут. Через три месяца (16.04.2019) в ежедневнике новостей нефтегазовых компаний Hartenergy говорится, что Natural Hydrogen Energy LLC только планирует бурение поисковой скважины на указанном участке. В сентябре на сайте Natural Hydrogen Energy LLC сообщается об успешном завершении бурения и приобретении ценного опыта, согласно которому "возможна добыча газов водорода и гелия". Со временем ситуация, конечно, прояснится. Но сегодня приходится констатировать, что описание месторождения и его приповерхностных проявлений отсутствует.

Естественно, если исключить информацию вроде: на западе Москвы готовое месторождение водорода с концентрацией 1 мл/л простирается до глубины 65 км [Семенов, 2015]. К сожалению, подобные публикации не единичны.

Образование месторождений. В авторской (и не только) концепции возникновения углеводородов начало процесса связывается с образованием водорода при серпентинизации пород коры [Природные ..., 1978; Дмитриев и др., 2000 и др.]. Собственно говоря, этот источник H_2 обосновал еще А. Н. Заварицкий [Заварицкий, 1961]. Более развернутая аргументация приводилась в работах автора последних 10—12 лет [Гордиенко, 2019 и др.]. К использованной в них библиографии можно добавить целую серию работ, освещающих различные стороны вопроса. Не удлинняя существенно список литературы, отметим некоторые из них. Экспериментально подтверждена возможность выделения водорода при контакте флюида и породы в реальном диапазоне составов и *PT*-условий [Janecky et al., 1986; Allen et al., 2003;

Marcaillou et al., 2011], о том же свидетельствуют и результаты моделирования [Wetzel, Shock, 2000]. Выделение водорода в связи с основными и ультраосновными породами фиксируется в активных районах континентов [Neal, Stranger, 1983; Coveney et al., 1987; Abrajano et al., 1990]. Можно констатировать, что эта идея не нуждается в дополнительной аргументации.

Приведенные в перечисленных работах сведения относятся к периодам активизации, когда в кору вторгаются мантийные выплавки, несущие флюиды. Формируются вторичные очаги плавления, генерирующие большее количество флюидов (преимущественно над кровлей нижнего гранулитового слоя коры), в некоторых районах происходит коровая адвекция. Она выводит в верхние горизонты (на глубины 6—10 км) локальные интрузии среднего и кислого состава. Выше могут возникать вулканы и/или зоны гидротермальной циркуляции, сосредоточенные преимущественно в проницаемых разломах.

Согласно представлениям адвекционно-полиморфной гипотезы (АПГ) в расположении возникающих источников флюидов должна быть некоторая упорядоченность. Это утверждение предполагает, что современная активизация содержит черты, присущие рифтогенезу и возможно в некоторых районах является его начальной стадией. Он сопровождается появлением структур, параллельных оси рифта, что особенно хорошо видно на океанической коре. Известны, например, описания полосовых магнитных аномалий и их источников, возникших в экваториальной части Срединно-Атлантического хребта (САХ) [Bonatti, 1976 и др.]. При пересечениях хребта разломами Вима и Романш на значительных фрагментах склонов отсутствует верхний базальтовый слой, развиты вышедшие на поверхность дна протрузии серпентинитов. Они вытянуты вдоль САХ и, скорее всего, пронизывают всю кору. С ними и связаны магнитные аномалии. Дефицит плотности, возникающий при серпентинизации, не позволяет протрузии достичь верхних горизонтов континентальной коры, но продвижение в нижнюю часть переходного слоя вполне вероятно, т. е. верхняя граница генерации водорода окажется в ее середине.

В описанной ситуации "аномальный" водород быстро производится и переносится. По многим признакам можно предполагать существование "фонового" варианта корового водорода [Вовк, 1982 и др.]. Уверенность в его образовании, концентрации и переносе подкрепляют результаты сравнительного изучения водорода газозо-жидких включений в кристаллических породах фундамента разного возраста и образовавшихся за счет их разрушения осадках [Parnell, Blamey, 2017 и др.]. Просматривается связь концентрации водорода с геологическим возрастом пород и содержанием в них калия. Это достаточно убедительно аргументирует радиолитную природу газа, в том числе и перешедшего в порово-трещинное пространство пород при разрушении включений. Естественно ожидать усиления последнего процесса в зонах современной активизации, но, скорее всего, такой источник месторождений, представляющих практический интерес, маловероятен.

Хотя по оценке в работе [Соколов, 1966] кларковое содержание радиоактивных элементов может обеспечить производство в 1 км^3 за 200 млн лет 2—3 млн т водорода, он довольно быстро в основном снова обращается в воду.

Концентрация водорода в "старых" газозо-жидких включениях в среднем составляет 7,5 мл/л, в "молодых" — 0,6 мл/л. Это довольно заметные значения (хотя преувеличивать достоверность результатов данной работы не стоит: выборка невелика для наблюдаемого разброса величин). При переходе материала газозо-жидких включений в порово-трещинное пространство породы раствор неизбежно дополняется водой. Предварительно можно оценить фоновую концентрацию H_2 во флюиде вне твердых частиц пород величинами около десятых или сотых частей мл/л. Конечно, это не мешает прикинуть вынос водорода, например из отдельных шахт

Кривого Рога, в 700—5500 м³/сут [Войтов, 1971]. Обычно в атмосфере водород встречается в концентрации 0,001 мл/л [Природные ..., 1978], для получения которой (при его реальном уходе за пределы атмосферы Земли) примерно достаточно выноса вулканическими извержениями и эксгаляциями.

Вероятно, влияние активизации на освобождение газа очень изменчиво. Оставив в стороне очевидную локальную приуроченность его струй к зонам повышенной проницаемости (резко — на 3 порядка усиливаемой сейсмичностью [Gordienko, 2018 и др.]), следует упомянуть хотя бы существенно большую "водообильность и загазованность" пород фундамента Америки и Африки по сравнению с евразийскими [Вовк, 1982 и др.].

Перемещение водорода к поверхности через формации коры, содержащие углерод, может привести к его участию (при подходящих *РТ*-условиях) в формировании месторождений углеводородов. Логично ожидать, что месторождения будут сопровождаться повышенными концентрациями "неизрасходованного" водорода на приповерхностных глубинах. Для водорода экраны, надолго останавливающие метан, малозаметны [Природные ..., 1978 и др.]. Пример подтверждения такой гипотезы есть в работе [Перевозчиков, 2012]. На месторождении газа Газли в воде наблюдательных скважин на большой территории у активных разломов концентрации водорода достигают 0,3 мл/л. Присутствие водорода заметно и непосредственно над поверхностью Земли. Возможно, это связано с практическим отсутствием в районе месторождения почвенного слоя, в котором может происходить его бактериальное потребление. На урановом месторождении Учкудук отмечены выходы водорода с несколько меньшей концентрацией, но все же вполне заметные. Есть предположение, что без потока водорода невозможно объяснить восстановительную обстановку, способствовавшую осаждению руд [Перевозчиков, 2012].

Регион явно активизирован, здесь силь-

на сейсмичность, в воде обнаружено высокое содержание гелия-3. Тепловой поток превышает 70 мВт/м³ [Карта ..., 1991].

Существенными экранами для водорода оказываются пласты соли, скопления аморфной серы, интрузивные или метаморфические породы. Под ними встречаются резервуары, при вскрытии которых фиксируются выбросы газа со значительными содержаниями Н₂.

Приведенной информации мало для создания схемы выделения перспективных районов для поисков месторождений водорода на Украине. Но можно подобрать некоторый материал, который, возможно, пригодится в случае проведения исследований в этом направлении.

Проявления водородной дегазации на территории Украины и соседних стран. В работах [Войтов, 1971, 1974; Вовк, 1982; Войтов, Рудаков, 2000 и др.] содержатся сведения о содержании водорода в породах коры, подземных водах, воздухе подземных выработок и подпочвенном слое. Это разнородный материал, критерии для суждения о связи месторождений с тем или иным проявлением отсутствуют, как и методика взаимного согласования данных. То же можно сказать и об источниках помех, осложняющих экспериментальные результаты, и способах редукации, т. е. отработка методики исследований (если таковые будут проводиться) еще впереди.

У северной границы Украины на территории Беларуси в подпочвенном воздухе установлено ничтожное (0,003—0,004 мл/л) и стабильное во времени содержание водорода. Пункт измерения находился недалеко от поля развития лампроитовых трубок взрыва герцинского возраста. На южном берегу Крыма (у разлома, обрывающего горное сооружение) получены более высокие и изменчивые значения: 0,03—0,05 в Симеизе и 0,05—0,12 мл/л в Форосе. Вероятно, вариации содержания газа обусловлены активностью разлома, но величины концентраций не позволяют предполагать выхода за пределы фоновых. В таблице приведены данные по шахтам Кривого Рога. Содержания Н₂ в

Содержание водорода в поровых водах двух шахт Кривого Рога [Войтов, 1974]

Горизонт, м	Концентрация, мл/л
610	0,41
750	0,42
830	0,40
410	0,74
490	0,14
570	0,60

этом случае отнесены к объему вмещающей воды. Сравнение состава газов в водах и газовой-жидких включениях пород позволяет считать, что водород попал в воду из них [Войтов, 1974; Вовк, 1982 и др.]. В рассолах фундамента Балтийского щита и Русской плиты Восточно-Европейской платформы (Татарский свод, Московская синеклиза, восточный склон Белорусского массива) ситуация принципиально не отличается от зафиксированной на Украинском щите. Отдельные случаи вторжения флюидов (и газов) с больших глубин после проходки Кольской сверхглубокой скважины можно увязать с "запечатанными" еще в докембрии резервуарами, которые вскрывает бурение [Кольская ..., 1984] или горные выработки шахт.

Некоторые надежды на появление заметных источников водорода, казалось бы, можно связывать с грязевыми вулканами. Но в их водах изредка присутствуют (за пределами Украины) лишь крайне незначительные количества водорода.

На Воронежском кристаллическом массиве сравнительно недалеко от российско-украинской границы при изучении округлых понижений рельефа, ассоциируемых авторами [Ларин и др., 2008, 2015 и др.] с проявлениями водородной дегазации, в почвенном воздухе обнаружены на практически нулевом фоне концентрации 0,7—2,5 мл/л (Липецк) и 0,3—1,2 мл/л (невдалеке от Борисоглебска Воронежской области). Такие значения необычны,

даже без твердых критериев оценки привлекают внимание. В обоих пунктах отмечены значительные концентрации эпицентров землетрясений [Надежка и др., 2008 и др.]. Тепловой поток в обоих пунктах не определялся. Но второй из них находится на периферии аномалии теплового потока [Карта ..., 1987]. Собственно сейсмичность — достаточный признак активизации.

Зона сейсмичности занимает обширную площадь центральной части массива, его западного склона и Донбасса. Ее украинский фрагмент изучен менее детально, здешняя сеть наблюдений не приспособлена к фиксации землетрясений на востоке страны. Тем не менее очевидно продолжение сейсмической активности вплоть до Нагольного кряжа. Этот район отмечен и другими признаками современной активизации: интенсивной мантийной гравитационной аномалией, возмущением теплового потока (более 70 мВт/м²), вытянутым вдоль кряжа и Главной антиклинали Донбасса, аномалиями повышенной проводимости в коре. Здесь находится Бобриковское гидротермальное золото-сульфидное месторождение, поблизости от которого практически на оси одной из антиклинальных складок Нагольного кряжа пробурена скважина глубиной 3,5 км. В процессе проходки зафиксированы значительные концентрации водорода, который авторы [Мурич и др., 1975] считают глубинным. Распределение параметра показано на рис. 1.

Газ фиксируется, начиная с глубины около 250 м, практически до забоя в концентрации около 1 мл/л. В интервале глубин 1,1—1,4 км обнаружено два всплеска интенсивностью около 5,5 мл/л. Они приурочены к трещиноватым зонам, вокруг которых располагаются максимальные скопления сульфидов среди изученных по разрезу скважины.

Интересно отметить, что в газовой-жидких включениях в рудных минералах соседнего Бобриковского месторождения водород не обнаружен [Шумлянский и др., 1994; Цільмак, 2016]. Возможно при фор-

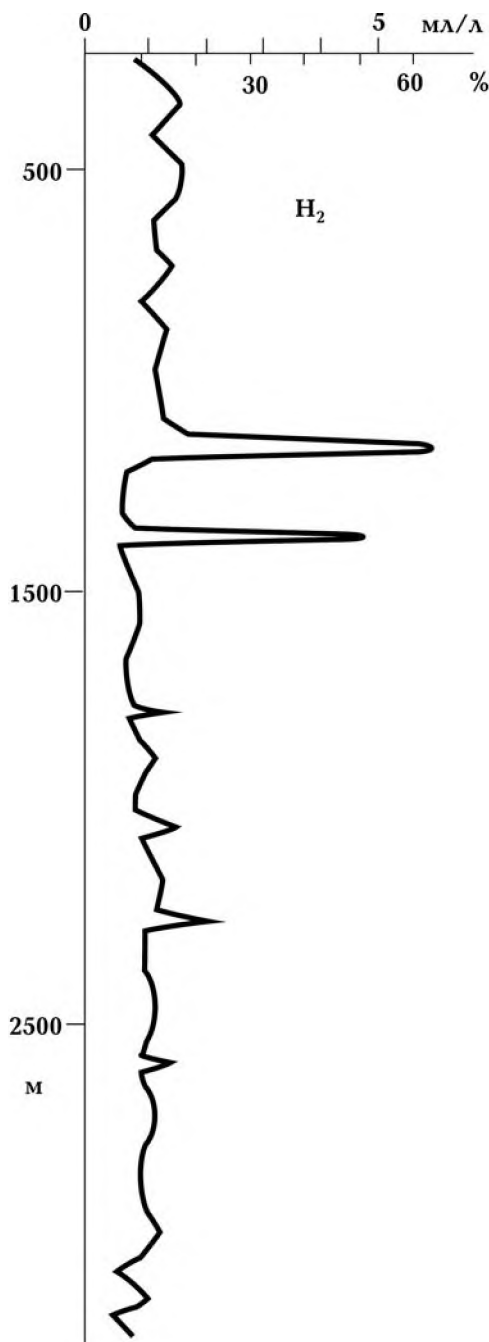


Рис. 1. Концентрация водорода вдоль ствола скв. Бобриково-1.

мировании рудной залежи он туда и попал, но не сохранился.

Наблюдаемые повышенные температуры и тепловой поток в районе бурения (и во многих других местах антиклиналей Донбасса, а также районов современной активизации в других регионах Украины)

объясняются циркуляцией нагретого флюида по зонам разломов повышенной проницаемости [Gordienko, 2018 и др.]. Это — составная часть процесса современной активизации.

Циркуляция горячих флюидов. Описанное проявление водорода и сопутствующие ему гидротермальные процессы едва ли сами по себе представляют месторождение, но все же заслуживают более подробного рассмотрения. Современные нагретые флюиды практически безрудны (везде на Украине, кроме Карпат [Gordienko, 2018]). Следовательно, выявленные трещины маркируют предшествующий период активизации — постгерцинский, с которым связаны донецкие проявления золото-сульфидной и ртутной минерализации. В литературе есть довольно обширная информация о PT -условиях возникновения рудных скоплений и вмещающих пород, находящихся на разных стадиях ката- и метagenеза в Донбассе [Курило, 1980, 2005; Зациха, 1989; Шумлянский и др., 1994; Александров и др., 1996; Цільмак, 2016 и др.]. Поэтому можно представить распределение температуры (T) того периода, когда активность циркуляции (и вынос водорода?) были выше (рис. 2). Расчетная модель строилась в предположении, что на подошве такой ячейки располагалась локальная интрузия кислого или среднего состава, в которой еще сохранился расплав и температура кровли была около $600\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Современные T под аномалиями теплового потока во многих районах Донбасса (и в скв. Бобриково-1, см. рис. 2) оказываются близкими к существовавшим в предшествующий рудогенезу этап — период завершения герцинского геосинклинального процесса в Донбассе [Gordienko, 2018]. Незначительное различие вполне объясняется более высокими T поверхности в мезозое. Фиксируемое совпадение случайно. Подобные распределения T в гидротермальных ячейках Украинского щита и Карпат накладываются на другой фон.

Экспериментальные данные на рис. 2 представляют собой искусственное объединение результатов использования раз-

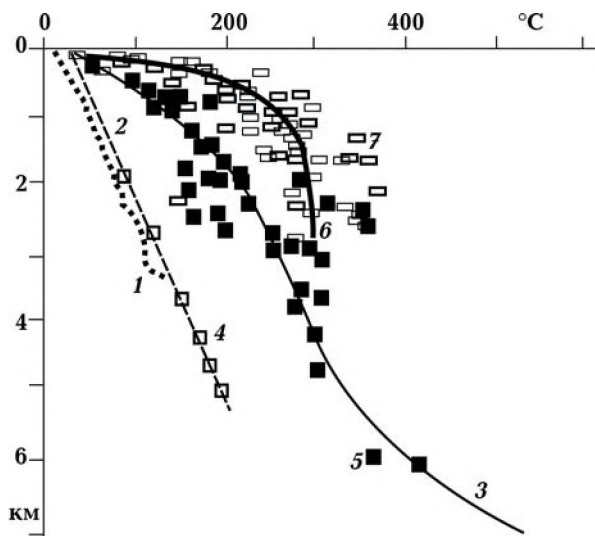


Рис. 2. Расчетные и экспериментальные тепловые модели верхней части земной коры: 1 — измеренные T в скважине Бобриково-1; расчетные тепловые модели: 2 — Главной антиклинали и Нагольного кряжа в районах современных «термальных куполов» (поднятий перегретых вод по проницаемым зонам разломов); 3 — для посттерцидного «термального купола» (200—240 млн лет назад); 6 — для свободной конвекции в обширной проницаемой области; данные геологических термометров: 4 — для посттерцидного времени вне «термального купола», 5 — в «термальном куполе», 7 — в зоне свободной конвекции.

личных геотермометров, привязанных к одной поверхности, положение которой учитывает величину эрозионного среза за последние примерно 200 млн лет. Фиксируемые температуры катаганеза и рудообразования могут быть обусловлены наложением нескольких событий. Формирование месторождений Донбасса было не одномоментным, между фазами гидротермальной активности (в том числе и на одном месторождении) проходили десятки млн лет [Шумлянский и др., 1994]. Поэтому наблюдаемый разброс значений на одной глубине неудивителен. Несмотря на это, общая тенденция изменения T с глубиной не оставляет сомнений в том, что процесс представляет конвективный теплоперенос с глубины около 7 км в довольно узкой (дайкообразной) ячейке. Это точно соответствует прогнозной модели по АПГ (см. рис. 2). Подобранная ши-

рина канала — около 200 м. В пористом резервуаре большой площади перепад T в верхней погранзоне много больше, а в ядре ячейки распределение практически не отличается от адиабаты. Для такой конструкции также подобраны экспериментальные данные [Gordienko, 2018].

Очевидно, описанной ячейке рудогенеза должен соответствовать существенно более высокий тепловой поток, примерно 130 мВт/м^2 и более. Именно такие величины установлены в некоторых районах Закарпатского прогиба и Паннонской впадины. С ними связаны молодые золото-сульфидные месторождения и выходы термальных вод. Имеющиеся данные геологических термометров подтверждают близость тепловых моделей постальпийских месторождений Закарпатья и посттерцидных Донбасса. Однако сохранились ли условия максимальной интенсивности процесса по прошествии пусть небольшого, но геологически значимого времени после появления верхнего этажа современной активизации, неясно. Прямых измерений на достаточно больших глубинах мало, но в нескольких точках на глубине 1 км измерены T около 90°C . Если учесть мезозойскую температуру поверхности, то получим примерное соответствие величинам на рис. 2. В какой-то мере на поставленный вопрос может ответить и расчет современных глубинных температур по концентрации кремнезема в термальных водах Закарпатья. Расчет можно провести по общепринятому выражению $T = (1051 / (4,65 - \lg \text{SiO}_2)) - 273$, где концентрация кремнезема в мг/л. Полученные температуры отнесены к глубинам водоносных горизонтов, вскрытых добывающими термальные воды скважинами (600—1200 м). Конечно, не исключена необходимость внесения поправок на CO_2 по Дислеру, но в целом не вызывает сомнений близость расчетных величин к данным рис. 2 при учете различий в T поверхности.

Выводы. Приведенная подборка данных по изучению проявлений водорода на территории Украины позволяет констатировать следующее.

1. Имеющаяся информация недостаточна для достоверной оценки перспективности такого исследования.

2. Очевидными объектами начального этапа работы могут стать выделенные по геологическим признакам [Очерки ..., 2018 и др.] фрагменты зон современной активизации, где можно провести разноглубинную (для отработки методики) подпочвенную водородную съемку. Отработка методики должна (после исключения влияния техногенных источников) касаться не только очевидных помех на глубине наблюдения, но и факторов, способных приводить, например, к сокращению потока водорода при восстановлении трехвалентного железа, сульфатов, включений органики в породу и т. п.

3. Интересным представляется изучение выноса водорода термальными водами Закарпатья и Паннонии. В этом случае возможна эксплуатация комбинированного месторождения. Добываемая с относительно небольших глубин вода нагревает в теплообменнике рабочую жидкость, которая затем догревается до температуры,

необходимой для паровой турбины электростанции (~210 °С), при сжигании водорода (и, возможно, метана).

4. Возможно проведение поиска водорода в водах восходящих источников и гидронаблюдательных скважин Крыма, ДДВ и Донбасса в районах, где установлены высокие тепловые потоки и аномальная изотопия гелия [Гордиенко, Тарасов, 2001].

5. Неопределенность в возрасте мантийного и корового этажей зон активизации заставляет искать геофизические признаки районов, максимально пригодных для решения поставленной задачи. Скорее всего, к ним относятся участки с сохранившимися (еще не остывшими до кристаллизации) линзами подкоровых мантийных пород под такими же коровыми. Их можно обнаружить по наличию соответствующих проводящих зон, выявленных глубинной геоэлектрикой. В этом смысле, например, район юго-западнее Бобриково у южного краевого разлома Донбасса представляется более перспективным, чем Нагольный кряж, хотя здесь и отсутствует высокий тепловой поток [Гордиенко и др., 2015].

Список литературы

- Александров А. Л., Гордиенко В. В., Деревская Е. И., Земсков Г. А., Иванов А. П., Панов Б. С., Шумлянский В. А., Эпов О. Г. Глубинное строение, эволюция флюидно-магматических систем и перспективы эндогенной золотоносности юго-восточной части Украинского Донбасса. Киев: Изд. ИФИ УНА, 1996. 74 с.
- Вовк И. Ф. Рассолы кристаллического фундамента щитов. Киев: Наук. думка, 1982. 163 с.
- Войтов Г. І. До оцінки інтенсивності газового обміну на щитах (на прикладі Українського щита). *Геол. журн.* 1974. № 2. С. 68—82.
- Войтов Г. И. О химическом составе газов Кривого Рога. *Геохимия.* 1971. № 11. С. 1324—1331.
- Войтов Г. И., Рудаков В. П. Водород атмосферы подпочвенных отложений, его мониторинг и прикладные возможности. *Физика Земли.* 2000. № 6. С. 83—91.
- Гордиенко В. В. О дегазации Земли. *Геофиз. журн.* 2019. Т. 41. № 3. С. 18—45. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v41i3.2019.172420>.
- Гордиенко В. В., Гордиенко И. В., Завгородняя О. В., Логвинов И. М., Тарасов В. Н. Донбасс (геофизика, глубинные процессы). Киев: Логос, 2015. 123 с.
- Гордиенко В. В., Тарасов В. Н. Современная активизация и изотопия гелия территории Украины. Киев: Знання, 2001. 102 с.
- Дмитриев Л. В., Базылев Б. А., Борисов М. В., Буго А., Силантьев С. А., Соколов С. Ю. Об-

- разование водорода и метана при серпентинизации мантийных гипербазитов океана и происхождение нефти. *Российский журнал наук о Земле*. 2000. Т. 1. № 6. С. 511—519.
- Заварицкий А. Н. Изверженные горные породы. Москва: Изд-во АН СССР, 1961. 480 с.
- Зацеха Б. В. Кристаллогенезис и типоморфные особенности минералов ртутного и флюоритового оруденений Украины. Киев: Наук. думка, 1989. 192 с.
- Карта теплового потока Европейской части СССР. 1 : 5 000 000. Ред. В. В. Гордиенко, У. И. Моисеенко. Москва: Мингео СССР, 1987.
- Карта теплового потока территории СССР. 1 : 5 000 000. Ред. В. В. Гордиенко, У. И. Моисеенко. Москва: Мингео СССР, 1991.
- Кольская сверхглубокая. Ред. Е. А. Козловский. Москва: Недра, 1984. 492 с.
- Курило М. В. Условия формирования полиметаллической минерализации Нагольного кряжа в Донбассе: Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Киев, КГУ, 1980. 25 с.
- Курило М. В. Стадіальні зміни порід та мінералогія ртутних руд Донбасу. *Вісник КНУ. Геологія*. 2005. № 33. С. 30—33.
- Ларин В. Н., Ларин Н. В. Водородная дегазация на Русской платформе. В кн.: *Дегазация Земли: геодинамика, геофлюиды, нефть, газ и их парагенезы*. Москва: ГЕОС, 2008. С. 267—269.
- Ларин Н. В., Ларин В. Н., Згонник В. А. Глубинный водород и продукты гидрогенизации — нефть и газ: *Материалы 4-х Кудрявцевских чтений. Всерос. конф. по глубинному генезису нефти*. Москва, ЦГЭ, 19—21 октября 2015.
- Мурич А. Т., Резников А. Л., Абражевич Е. В., Сердюков В. В. Результаты глубокого бурения в центральной части Донбасса. *Советская геология*. 1975. № 8. С. 125—131.
- Надежка Л. И., Геншафт Ю. С., Салтыковский А. Я., Семенов А. Е., Ишполитов О. М., Пивоваров С. П., Сафронич И. Н. Некоторые глубинные неоднородности литосферы и современная сейсмичность Воронежского кристаллического массива: *Материалы XIV Международной конференции "Связь поверхностных структур земной коры с глубинными"*, Петрозаводск, 27—31 октября 2008 г. Петрозаводск: Изд. КарНЦ РАН, 2008. С. 70—73.
- Очерки дегазации Земли. Ред. В. М. Шестопалов. Киев: Итек сервис, 2018. 632 с.
- Перевозчиков Г. В. Поле водорода на месторождении Газли по данным геохимических исследований в нефтегазоносном регионе Средней Азии. *Нефтегазовая геология. Теория и практика*. 2012. Т. 7. № 1. С. 1—13.
- Природные газы осадочных толщ. Ред. В. П. Якуцени. Ленинград: Недра, 1978. 344 с.
- Семенов С. Перспективы водородной энергетики. *Электрик*. 2015. № 12. С. 20—25. <http://electrician.com.ua/files/1452871190.pdf>.
- Соколов В. А. Геохимия газов земной коры и атмосферы. Москва: Недра, 1966. 297 с.
- Цільмак О. В. Мінералого-геохімічна модель Бобріківського золоторудного родовища. Дис. ... канд. геол. наук. Львів, ЛНУ ім. Івана Франка, 2016. 217 с.
- Шумлянский В. А., Демихов Ю. Н., Деревская Е. И., Дудар Т. В., Зеленский С. А., Зинчук И. Н., Ивантишина О. И., Курило М. В., Сынгаевский Е. Д. Геолого-генетическая модель Бобриковского золото-полиметаллического месторождения. *Геол. журн*. 1994. № 3. С. 95—106.
- Abrajano, T., Sturchio, N., Kennedy, B., & Lyon, G. (1990). Geochemistry of reduced gas related to serpentinization of the Zambales ophiolite, Philippines. *Applied Geochemistry*, 5(5-6), 625—630. doi: 10.1016/0883-2927(90)90060-I.
- Allen, D., & Seyfried, W. (2003). Compositional controls on vent fluids from ultramafic—hosted hydrothermal systems at mid-ocean ridges: An experimental study at 400 °C, 500 bars. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67(8), 1531—1542. doi: 10.1016/S0016-7037(02)01173-0.

- Bonatti, E. (1976). Serpentinite protrusions in the oceanic crust. *Earth and Planetary Science Letters*, 32(2), 107—113. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(76\)90048-0](https://doi.org/10.1016/0012-821X(76)90048-0).
- Coveney, R., Goebel, E., Zeller, E., & Dreschhoff, G. (1987). Serpentinization and the Origin of Hydrogen Gas in Kansas. *AAPG Bulletin*, 71(1). doi: 10.1306/94886D3F-1704-11D7-8645000102C1865D.
- Eschenbach, W. (2013). Drilling For Hydrogen. Watts Up With That? The world's most viewed site on global warming and climate change. Retrieved from <https://wattsupwiththat.com/2013/07/01/drilling-for-hydrogen/>.
- Gordienko, V. (2018). Gold-bearing sulphide deposits associated with deep-seated processes. *NCGT Journal*, (2), 254—270.
- Guélard, J., Beaumont, V., Rouchon, V., Guyot, F., Pillot, D., Jézéquel, D., Ader, M., Newell, D., & Deville, E. (2017). Natural H₂ in Kansas: deep or shallow origin? *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 18(5), 1841—1865. <https://doi.org/10.1002/2016GC006544>.
- Hartenergy. (2019). Retrieved from <https://www.hartenergy.com/activity-highlights>.
- Hydrogen economy. From Wikipedia. (2019). Retrieved from https://en.wikipedia.org/wiki/Hydrogen_economy.
- Janecky, D., & Seyfried, W. (1986). Hydrothermal serpentinization of peridotite within the oceanic crust: Experimental investigations of mineralogy and major element chemistry. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 50(7), 1357—1378. doi: 10.1016/0016-7037(86)90311-X.
- Marcaillou, C., Munoz, M., & Vidal, O. (2011). Mineralogical evidence for H₂ degassing during serpentinization at 300 °C/300bar. *Earth and Planetary Science Letters*, 303(3-4), 281—290. doi: 10.1016/j.epsl.2011.01.006.
- Matthews, R. (2002). Hydrogen found in Earth's crust is "limitless fuel supply. Retrieved from [https://www.telegraph.co.uk/news/science/science-news/3293426/Hydrogen-found-in-](https://www.telegraph.co.uk/news/science/science-news/3293426/Hydrogen-found-in-Earths-crust-is-limitless-fuel-supply.html)
- [Earths-crust-is-limitless-fuel-supply.html](https://www.telegraph.co.uk/news/science/science-news/3293426/Hydrogen-found-in-Earths-crust-is-limitless-fuel-supply.html).
- Moñtacez, I.P., Tabor, N.J., Niemeier, D., DiMichele, W.A., Frank, T.D., Fielding, C.R., Isbell, J., Birgenheier, L., & Rygel, M. (2007). CO₂-Forced Climate and Vegetation Instability During Late Paleozoic Deglaciation. *Science*, 315(5808), 87—91. doi: 10.1126/science.1134207.
- Natural hydrogen start up is looking for investors to extract geological carbon-free H₂. (2018). Retrieved from <https://www.h2euro.org/latest-news/natural-hydrogen-start-up-is-looking-for-investors-to-extract-geological-carbon-free-h2/>.
- Neal, C., & Stanger, G. (1983). Hydrogen generation from mantle source rocks in Oman. *Earth and Planetary Science Letters*, 66, 315—320. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(83\)90144-9](https://doi.org/10.1016/0012-821X(83)90144-9).
- Parnell, J., & Blamey, N. (2017). Global hydrogen reservoirs in basement and basins. *Geochemical transactions*, 18, 2. doi: 10.1186/s12932-017-0041-4.
- Romm, J. (2004). *The Hype about Hydrogen*. Island Press, 215 p.
- Scelli, G. (2019). Natural Hydrogen Energy drilling in Fillmore County. The Nebraska signal. http://thenebraskasignal.com/index.php?option=com_content&view=article&id=4524:natural-hydrogen-energy-drilling-in-fillmore-county&catid=35&Itemid=54.
- Wetzel, L., & Shock, E. (2000). Distinguishing ultramafic from basalt-hosted submarine hydrothermal systems by comparing calculated vent fluid compositions. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 105(B4), 8319—8340. <https://doi.org/10.1029/1999JB900382>.
- Zgonnik, V., Beaumont, V., Deville, E., Larin, N., Pillot, D., & Farrell, K. (2015). Evidence for natural molecular hydrogen seepage associated with Carolina bays (surficial, ovoid depressions on the Atlantic Coastal Plain, Province of the USA). *Progress in Earth and Planetary Science*, 2(31). <https://doi.org/10.1186/s40645-015-0062-5>.

On hydrogen degassing in the areas of recent activation of Ukraine

V. V. Gordienko, 2019

In areas of the Earth with active endogenous regimes, degassing of the interior is often observed, usually confined to deep faults. Among the gases arriving at the surface, the highest concentrations are water vapor, carbon dioxide, nitrogen, hydrogen sulfide, and hydrocarbons (mainly methane). But hydrogen degassing of the Earth may be of practical interest, serve as a source for the formation of environmentally friendly fuel deposits. Such deposits are still little known. They are discovered by chance. In the territory of Ukraine, as in many other countries, morphological features (oval depressions), possibly related to the outcrops of hydrogen to the surface, were found. They are located within the larger areas of modern revitalization. They are diagnosed according to the complex of geological and geophysical methods. But the ways of identifying the most promising areas are still unclear. The article discusses few data on the distribution of deep-seated hydrogen in different regions of Ukraine. Preliminary considerations are given on possible ways to specify search criteria in the platform part of the country, in the Donbas, the Crimea and the Carpathians. It is interesting to study hydrogen in thermal waters of Transcarpathia. In this case, exploitation of a combined geothermal-hydrogen deposits is possible. However, the above considerations are only preliminary. They are based on very limited information. First of all, the accumulation of experimental data on hydrogen fluxes at relatively shallow depths in the subsoil layer in the fracture parts of zones of modern activation is necessary. Of interest may be postgeosynclinal zones and those ores located on the platform.

Key words: hydrogen degassing, search criteria for deposits zones of recent activation.

References

- Aleksandrov, A.L., Gordienko, V.V., Derevskaya, E.I., Zemskov, G.A., Ivanov, A.P., Panov, B.S., Shumlyansky, V.A., & Epov, O.G. (1996). *Deep structure, evolution of fluid-igneous systems and prospects for the endogenous gold-bearing capacity of the south-eastern part of the Ukrainian Donbass*. Kiev: IFI UNA Publ., 74 p. (in Russian).
- Vovk, I.F. (1982). *Brines of crystalline basement shields*. Kiev: Naukova Dumka, 163 p. (in Russian).
- Voytov, G.I. (1974). To assess the intensity of gas on the shields (on the butt of the Ukrainian Shield). *Geologicheskii zhurnal*, (2), 68—82 (in Ukrainian).
- Voytov, G.I. (1971). On the chemical composition of gases Krivoy Rog. *Geokhimiya*, (11), 1324—1331 (in Russian).
- Voytov, G.I., & Rudakov, V.P. (2000). Hydrogen of the atmosphere of subsurface sediments, its monitoring and application possibilities. *Fizika Zemli*, (6), 83—91 (in Russian).
- Gordienko, V.V. (2019). About degassing of the Earth. *Geofizicheskiy zhurnal*, 41 (3), 18—45. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v41i3.2019.172420> (in Russian).
- Gordienko, V.V., Gordienko, I.V., Zavgorodnyaya, O.V., Logvinov, I.M., & Tarasov, V.N. (2015). *Donbass (geophysics, deep-seated processes)*. Kiev: Logos, 123 p. (in Russian).
- Gordienko, V.V., & Tarasov, V.N. (2001). *Recent activation and helium isotopy on the territory of Ukraine*. Kiev: Znannya, 102 p. (in Russian).
- Dmitriev, L.V., Bazylev, B.A., Borisov, M.B., Bugo, A., Silantyev, S., & Sokolov, S. (2000). Formation of hydrogen and methane during oceanic serpentization of mantle hyperba-

- sites and the origin of oil. *Rossiyskiy zhurnal nauk o Zemle*, 1 (6), 511—519 (in Russian).
- Zavaritsky, A.N. (1961). *Igneous rocks*. Moscow: Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 480 p. (in Russian).
- Zatsikha, B.V. (1989). *Crystallogenesis and typomorphic features of the minerals of mercury and fluorite mineralization of Ukraine*. Kiev: Naukova Dumka, 192 p. (in Russian).
- Gordienko, V.V., & Moiseenko, S. (1984). *Heat flow map of the European part of the USSR. 1 : 5 000 000*. Moscow: Publ. House of the Ministry of Geology of the USSR (in Russian).
- Gordienko, V.V., & Moiseenko, U.I. (Eds.). (1991). *Map of the heat flow of the USSR. 1 : 5 000 000*. Moscow: Publ. House of the Ministry of Geology of the USSR (in Russian).
- Kozlovsky, E.A. (Ed.). (1984). *Kola superdeep*. Moscow: Nedra, 492 p. (in Russian).
- Kurilo, M.V. (1980). The conditions for the formation of polymetallic mineralization of the Nagolny ridge in the Donbass. *Extended abstract of candidate's thesis*. Kiev, Kiev State University, 25 p. (in Russian).
- Kurilo, M.V. (2005). Staging of the rock evolution and mineralogical mercury ore of the Donbas. *Visnyk KNU. Heologiya*, (33), 30—33 (in Ukrainian).
- Larin, V.N., & Larin, N.V. (2008). Hydrogen degassing on the Russian platform. In *The Earth degassing: geodynamics, geofluids, oil, gas and their parageneses* (pp. 267—269). Moscow: GEOS (in Russian).
- Larin, N.V., Larin, V.N., & Zgonnik, V.A. (2015). Depth hydrogen and hydrogenation products — oil and gas: *Proc. of 4 Kudryavtsev readings. All-Russian Conference on the Deep Genesis of Oil. Moscow, Central Geophysical Expedition, October 19—21, 2015*.
- Murich, A.T., Reznikov, A.L., Abrazhevich, E.V., & Serdyukov, V.V. (1975). The results of deep drilling in the central part of the Donbass. *Sovetskaya geologiya*, (8), 125—131 (in Russian).
- Nadezhka, L.I., Genshaft, Yu.S., Saltykovsky, A.Ya., Semenov, A.E., Ippolitov, O.M., Pivovarov, S.P., & Safronich, I.N. (2008). Some deep inhomogeneities of the lithosphere and modern seismicity of the Voronezh crystalline massif: *Proc. of the XIV Int. Conf. "Communication of the surface structures of the crust with the deep"*, Petrozavodsk, October 27—31, 2008 (pp. 70—73). Petrozavodsk: Publ. House Karelian Science Center RAS (in Russian).
- Shestopalov, V.M. (Ed.). (2018). *Essays degassing the Earth*. Kiev: Itek servis, 632 p. (in Russian).
- Perevozchikov, G.V. (2012). Geochemical research on hydrogen accumulation in the Gazli gas field. Oil and gas geology. *Neftegazovaya geologiya. Teoriya i praktika*, 7 (1), 1—13 (in Russian).
- Yakutseni, V.P. (Ed.). (1978). *Natural gases sedimentary strata*. Leningrad: Nedra, 344 p. (in Russian).
- Semenov, S. (2015). Prospects for hydrogen energy. *Elektrik*, (12), 20—25. <http://electrician.com.ua/files/1452871190.pdf>.
- Sokolov, V.A. (1966). *Geochemistry of the Earth's crust and atmosphere gases*. Moscow: Nedra, 297 p. (in Russian).
- Tsilmak, O.V. (2016). Mineral-geochemical model of the Bobrikivsky gold-bearing deposit: *Candidate's thesis*. Ivan Franko National University of Lviv, 217 p. (in Ukrainian).
- Shumlyansky, V.A., Demikhov, Yu.N., Derevskaia, E.I., Dudar, T.V., Zelensky, S.A., Zinchuk, I.N., Ivantishina, O.I., Kurilo, M.V., & Syngaevsky, E.D. (1994). Geological and genetic model of the Bobrikovskiy gold-polymetallic deposit. *Geologicheskii zhurnal*, (3), 95—106 (in Russian).
- Abrajano, T., Sturchio, N., Kennedy, B., & Lyon, G. (1990). Geochemistry of reduced gas related to serpentinization of the Zambales ophiolite, Philippines. *Applied Geochemistry*, 5 (5-6), 625—630. doi: 10.1016/0883-2927(90)90060-I.
- Allen, D., & Seyfried, W. (2003). Compositional controls on vent fluids from ultramafic—hosted hydrothermal systems at mid-ocean ridges: An experimental study at 400 °C, 500 bars.

- Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67(8), 1531—1542. doi: 10.1016/S0016-7037(02)01173-0.
- Bonatti, E. (1976). Serpentinite protrusions in the oceanic crust. *Earth and Planetary Science Letters*, 32(2), 107—113. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(76\)90048-0](https://doi.org/10.1016/0012-821X(76)90048-0).
- Coveney, R., Goebel, E., Zeller, E., & Dreschhoff, G. (1987). Serpentinization and the Origin of Hydrogen Gas in Kansas. *AAPG Bulletin*, 71(1). doi: 10.1306/94886D3F-1704-11D7-8645000102C1865D.
- Eschenbach, W. (2013). Drilling For Hydrogen. Watts Up With That? The world's most viewed site on global warming and climate change. Retrieved from <https://wattsupwiththat.com/2013/07/01/drilling-for-hydrogen/>.
- Gordienko, V. (2018). Gold-bearing sulphide deposits associated with deep-seated processes. *NCGT Journal*, (2), 254—270.
- Guélard, J., Beaumont, V., Rouchon, V., Guyot, F., Pillot, D., Jézéquel, D., Ader, M., Newell, D., & Deville, E. (2017). Natural H₂ in Kansas: deep or shallow origin? *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 18(5), 1841—1865. <https://doi.org/10.1002/2016GC006544>.
- Hartenergy. (2019). Retrieved from <https://www.hartenergy.com/activity-highlights>.
- Hydrogen economy. From Wikipedia. (2019). Retrieved from https://en.wikipedia.org/wiki/Hydrogen_economy.
- Janecky, D., & Seyfried, W. (1986). Hydrothermal serpentinization of peridotite within the oceanic crust: Experimental investigations of mineralogy and major element chemistry. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 50(7), 1357—1378. doi: 10.1016/0016-7037(86)90311-X.
- Marcaillou, C., Munoz, M., & Vidal, O. (2011). Mineralogical evidence for H₂ degassing during serpentinization at 300 °C/300 bar. *Earth and Planetary Science Letters*, 303(3-4), 281—290. doi: 10.1016/j.epsl.2011.01.006.
- Matthews, R. (2002). Hydrogen found in Earth's crust is "limitless fuel supply. Retrieved from <https://www.telegraph.co.uk/news/science/science-news/3293426/Hydrogen-found-in-Earths-crust-is-limitless-fuel-supply.html>.
- Moñtacez, I.P., Tabor, N.J., Niemeier, D., DiMichele, W.A., Frank, T.D., Fielding, C.R., Isbell, J., Birgenheier, L., & Rygel, M. (2007). CO₂-Forced Climate and Vegetation Instability During Late Paleozoic Deglaciation. *Science*, 315(5808), 87—91. doi: 10.1126/science.1134207.
- Natural hydrogen start up is looking for investors to extract geological carbon-free H₂. (2018). Retrieved from <https://www.h2euro.org/latest-news/natural-hydrogen-start-up-is-looking-for-investors-to-extract-geological-carbon-free-h2/>.
- Neal, C., & Stanger, G. (1983). Hydrogen generation from mantle source rocks in Oman. *Earth and Planetary Science Letters*, 66, 315—320. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(83\)90144-9](https://doi.org/10.1016/0012-821X(83)90144-9).
- Parnell, J., & Blamey, N. (2017). Global hydrogen reservoirs in basement and basins. *Geochemical transactions*, 18, 2. doi: 10.1186/s12932-017-0041-4.
- Romm, J. (2004). *The Hype about Hydrogen*. Island Press, 215 p.
- Scelli, G. (2019). Natural Hydrogen Energy drilling in Fillmore County. The Nebraska signal. http://thenebraskasignal.com/index.php?option=com_content&view=article&id=4524:natural-hydrogen-energy-drilling-in-fillmore-county&catid=35&Itemid=54.
- Wetzel, L., & Shock, E. (2000). Distinguishing ultramafic from basalt-hosted submarine hydrothermal systems by comparing calculated vent fluid compositions. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 105(B4), 8319—8340. <https://doi.org/10.1029/1999JB900382>.
- Zgonnik, V., Beaumont, V., Deville, E., Larin, N., Pillot, D., & Farrell, K. (2015). Evidence for natural molecular hydrogen seepage associated with Carolina bays (surficial, ovoid depressions on the Atlantic Coastal Plain, Province of the USA). *Progress in Earth and Planetary Science*, 2(31). <https://doi.org/10.1186/s40645-015-0062-5>.