

УДК: 661.931(571.65)

«ЗЕЛЁНЫЙ» ВОДОРОД – НОВЫЙ ВИД КРИОГЕННОГО РЕСУРСА В ГОРНЫХ РАЙОНАХ СЕВЕРО-ВОСТОКА РОССИИ

Глотов В. Е.¹ , Абукова Л. А.²

¹ФГБУН Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт
им. Н. А. Шило ДВО РАН, г. Магадан

²ФГБУН Институт проблем нефти и газа РАН, г. Москва
Email: geocol@neisri.ru; abukova@ipng.ru

В статье обоснованы перспективы освоения новой разновидности искусственного криогенного ресурса – «зелёного» водорода, получаемого путем использования природных криогенных ресурсов. Сырьём для него являются ультрапресные, часто бесхлорные воды горных водотоков, формирование которых предопределено питанием атмосферными осадками, распространением сплошной криолитозоны, отсутствием водорастворимых пород, активным водообменом и его малой мощностью. Для электролиза воды целесообразно использовать электроэнергию солнечных электростанций (СЭС) в континентальных районах и/или ветровых электростанций (ВЭС) на морских побережьях. В континентальных условиях Северо-Востока России (СВР) с апреля по сентябрь преобладает ясная погода, среднегодовая скорость ветра менее 3 м/с. Годовая сумма прямой солнечной радиации при ясной погоде достигает 9433–9824 МДж/м². Важно, что 82–85 % радиации приходится на апрель–сентябрь. Поэтому СЭС региона, работая полгода, выработают электричество в количестве, равном годовой работе СЭС стран с теплым климатом. На морских побережьях из-за повышенной облачности работа СЭС непродуктивна. Господствующая здесь среднегодовая скорость ветра более 4 м/с оптимальна для работы ВЭС. В статье дано обоснование реальности организации в условиях СВР коммерчески наиболее выгодного производства «зеленого» водорода и подчеркивается необходимость проведения детальных научных исследований его подземного хранения.

Ключевые слова: Северо-Восток России, криогенный ресурс, «зеленый» водород, ультрапресная вода для электролиза, ветровые электростанции, солнечные электростанции.

DOI: 10.34078/1814-0998-2025-3-52-65

ВВЕДЕНИЕ

Криософия – новое научное направление междисциплинарных исследований формирования криогенного геологического мира, а также природной среды жизнедеятельности людей в условиях холодного климата. Академик РАН В. П. Мельников, стоящий у истоков его создания, рассматривает в составе криогенных природных ресурсов потенциальные минерально-энергетические и водные богатства севера нашей страны (Мельников, 2014; Мельников и др., 2013, 2021). Понятие *криогенные ресурсы* (КР) раскрыто В. Р. Алексеевым (2011). Этот учёный считает, что «криогенный ресурс – часть природных ресурсов, материальные объекты и силы природы, происхождение и развитие которых обусловлено сферой холода (температура ниже 0 °С)». При

этом он различает естественные КР, созданные природными процессами, и искусственные, произведенные человеком с использованием естественных КР. Полагаем, что разновидностью искусственных КР в горных районах криолитозоны может быть признан «зелёный» водород. Его получают методом электролиза воды с использованием природных восполняемых энергетических ресурсов (ВЭР) для выработки электричества. Перспективность производства «зеленого» водорода в горных районах Северо-Востока России показана ранее (Глотов, 2023; Глотов, Абукова, 2024).

Правительством Российской Федерации поставлена научно-техническая задача последовательного замещения водородом ископаемых видов топлива (угля, торфа, углеводородов), которые эффективнее использовать в химической промышленности без выброса углекислого газа в атмосферу (Концепция..., 2021). Предполагает-

ся, что к 2050 г. во всем мире будут производить и потреблять не менее 500 млн т водорода, что покрывает около 24 % энергетической потребности мировой экономики (Аналитический..., 2022).

В настоящее время в мире производят за год около 120 млн т водорода, в т. ч. в России до 9.5 млн т. Большой частью его получают методом паровой конверсии метана («голубой» водород). В европейских странах, где метан не является доступным и дешевым сырьем, развивают технологию получения «зелёного» водорода, себестоимость которого в 4–5 раз больше себестоимости «голубого». Есть мнение, что способы электролизной генерации водорода за счет совершенствования производства существенно увеличат свою производительность с 5-кратным уменьшением себестоимости (Перспективы..., 2021; Мионов, 2023). Поэтому уже сейчас в период востребованности на мировых рынках угля, нефти и газа необходимо в России приступить к созданию инфраструктуры производства «зелёного» водорода с себестоимостью ниже, чем в других странах.

Цель данной статьи – показать, что в горных районах Северо-Востока России сложился комплекс природных криогенных ресурсов, благоприятных для производства искусственного криогенного ресурса «зелёного» водорода, выгодного для реализации на международном рынке.

Научная и практическая актуальность поставленной цели определяется её соответствием «Стратегии национальной безопасности Российской Федерации», утвержденной Президентом России 02.06.2021, разделам «Экономическая безопасность», п. 16 и п. 25, и «Экологическая безопасность и рациональное природопользование», п. 83; «Концепции развития водородной энергетики в Российской Федерации», утвержденной Правительством России 05.08.2021.

Методы и материалы исследования типичны для обобщающей (обзорной) работы и включают:

- анализ опубликованных работ, в т. ч. базы данных по результатам наблюдений на метеорологических постах и станциях Колымского управления гидрометеослужбы (КУГМС) и Всероссийского НИИ гидрометеорологической информации – Мировой центр данных (ВНИИГМИ-МЦД);

- изучение и анализ опубликованных материалов о результатах исследований по преобразованию ВЭР в электрическую, методов электролиза воды и её деионизации;

- изучение и анализ материалов о геофизиологических, гидрологических, гидрогеологических особенностях региона, составе и ресурсах пресных речных и подземных вод зоны активного водообмена;

- обоснование возможности производства водорода на уровне потребности, определенной в «Концепции развития водородной энергетики в Российской Федерации» до 2050 г.

Объект исследования – природные условия: орография, климат, криолитозона и гидрогеология СВР, т. е. те природные факторы, которые прямо влияют на эффективность производства «зелёного» водорода.

Предмет исследования – криогенные процессы и характеристики природных объектов, оптимальные для генерации данного искусственного криогенного ресурса.

ОПИСАНИЕ ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ

Природные условия региона определяются его полуостровным положением в зоне смыкания Северного Ледовитого и Тихого океанов. Главный водораздел Земли (ГВЗ) делит СВР на Циркумарктическую и Циркумтихоокеанскую области стока (ЦАО и ЦТО) (рис. 1).

В данной статье региональный Колымо-Индиго-Индигирский водораздел рассматривается восточной границей СВР, площадь которого около 1.3 млн км². В административном отношении здесь расположены Магаданская область и Чукотский автономный округ.

Рельеф на большей части площади (до 85 %) горный, основные типы его сформированы в плиоцен-четвертичное время в результате неотектонического воздымания пенепленизированной территории. К главным горным сооружениям геоморфологи относят Верхоянский хребет, горную систему Черского, нагорья Охотско-Чукотской горной страны, а также Корякское нагорье (Глушкова, Смирнов, 2021). По степени денудационного расчленения есть участки, в пределах которых рельеф резко расчленен, альпийский, водоразделы гребневидные, склоны речных долин крутые (более 30°) до обрывистых, распространены ледниковые формы: кары, цирки, трог, ригели и морены в речных долинах. Тектоническими разломами эти участки отделены от сглаженного и/или плосковершинного рельефа. Такие различия в характере рельефа отражают, прежде всего, разную скорость неотектонического воздымания отдельных площадей, отличия пород в их устойчивости к гипергенным и криогенным процессам. Роль последних в денудационных преобразованиях рельефа в криолитозоне имела решающее значение (Романовский, 1993). Академик РАН Н. А. Шило считал, что глубокий врез речных долин (более 1000 м) за геологически короткое время обусловлен участием в денудационных процессах сезонных и многолетних промерзаний-оттаиваний (Шило, 1961).

Реки, дренирующие горные сооружения в пределах ЦАО, принадлежат бассейну Северного

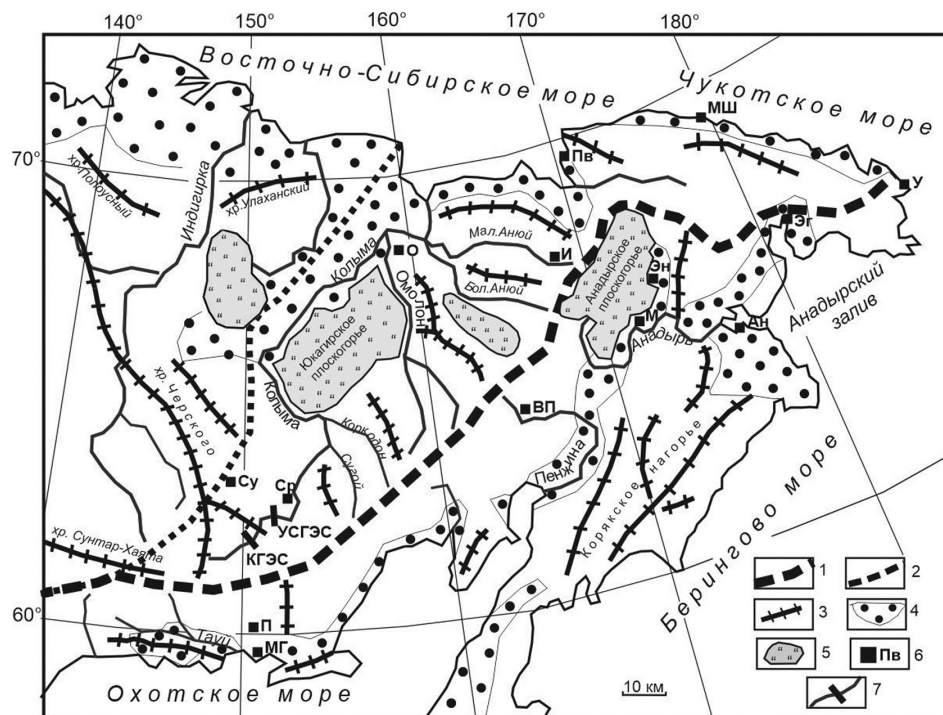


Рис. 1. Орогидрографическая схема СВР (Прикладной..., 1960; Добровольский, Залогин, 1982; Раковская, Давыдова, 2002): 1 – Главный водораздел Земли; 2 – водораздел бассейнов рек Колыма и Индигирка; 3 – наиболее крупные хребты с альпинотипным рельефом; 4 – низменности; 5 – наиболее значительные по площади плоскогорья; 6 – метеостанции, в т. ч. в ЦАО: Пв – Певек, МШ – Мыс Шмидта, У – Уэлен, И – Илирней, Ос – Островное, О – Омолон, Ср – Среднекан, Су – Сусуман; в ЦТО: А – Анадырь, Эн – Энмелен, М – Марково, Эг – Эгвекинот; ВП – Верхне-Пенжино, Ох – Охотск, П – Палатка; 7 – створы действующих ГЭС, в т. ч. КГЭС – Колымская, УСГЭС – Усть-Среднеканская.

Fig. 1. Orohydrographic scheme of the RNE (Applied..., 1960; Dobrovolsky and Zalogin, 1982; Rakovskaya, Davydova, 2002): 1 – Great Divide of the Earth; 2 – watershed of the Kolyma and Indigirka River basins; 3 – largest ridges with alpine relief; 4 – lowlands; 5 – most spacious plateaus; 6 – meteorological stations, including in the Circum-Arctic Region: Pv – Pevek, Msh – Cape Schmidt, U – Uelen, I – Ilirney, Os – Ostrovnoye, O – Omolon, Sr – Srednekan, Su – Susuman; in the Circum-Pacific Region: A – Anadyr, En – Enmelen, M – Markovo, Eg – Egvekinot; VP – Verkhne-Penzhino, Oh – Okhotsk, P – Palatka; 7 – gates of existing hydroelectric power plants, including Kolyma Hydropower Plant (KHPP) and Ust-Srednekan Hydropower Plant (USHPP).

Ледовитого океана. По материалам монографии (Ресурсы..., 1969), главная река Колыма имеет площадь водосбора 647 000 км², длину 2426 км. Наиболее крупные её притоки – р. Омолон, площадь водосбора 113 000 км², и р. Анюй (притоки Большой и Малый Анюй) с площадью водосбора 107 000 км². В горных условиях р. Колыма и её притоки текут в верхнем и среднем течении, в нижнем течении – в низменностях. В пределах ЦТО наиболее крупная р. Анадырь длиной 1150 км, площадь водосбора 191 000 км², а в северном секторе Охотского моря – р. Пенжина с площадью водосбора 76 000 км². Наибольшей густотой речной сети отличаются районы резко расчлененного рельефа с максимальным неотектоническим подъемом.

Питание рек в теплый период года с первой декады мая до конца сентября происходит за счет таяния снега, снежников и наледей, выпадения дождей, стока подземных вод. С наступлением холодного периода (октябрь–апрель) сток

рек существует за счет притока подземных вод из сезонно-талого слоя (СТС), таликов речных долин, из возможных озер. Перемерзание СТС определяет наступление критического водного периода во всех водотоках, которые или промерзают, или пересыхают (Калабин, 1960). Круглогодичный сток существует в водотоках с водосборной площадью не менее 5000 км², или питаемых подземными водами сквозных таликов и непромерзающими озерами. Однако заозеренность горных районов менее 0.01 % их площади (Многолетние..., 1985).

В среднегодовом отношении СВР относится к высоко водообеспеченным регионам. Однако в критический период стока (с февраля по апрель) регион является остродефицитным по запасам пресной воды, модуль стока подземных вод в это время снижается до 0.1 л/с·км² и менее (Боревский и др., 2013).

Климат региона определяется расположением в высоких северных широтах (севернее

59° с. ш.), в зоне сочленения геотермически различных океанов. Выделены пояса арктического и субарктического климата (Алисов, 1956). Арктический пояс восточнее устья Колымы охватывает водосборные площади рек арктических морей. Климат здесь формируется за счет воздушных масс, поступающих из Атлантического океана, осушенных и охлажденных над ледовым покровом арктических морей. На водосборе Чукотского моря проявлено влияние тепловлажно-несущих тихоокеанских циклонов. Эти циклоны формируют особенности климата ЦТО и части площади ЦАО. Основные характеристики приве-

дены в таблице 1 по метеопостам, отмеченным на рис. 1. При составлении этой таблицы использованы данные из официальных справочных источников. Это дает возможность обоснованно оценить многолетние изменения климатических показателей.

Текущее потепление климата (термохрон) началось около 12 тыс. л. н., сменив 100-тысячелетнее похолодание (криохрон). По своим характеристикам пока не достигнуты критические значения, определяющие сокращение площади и мощности криолитозоны, но к концу столетия климатические показатели могут срав-

Таблица 1. Климатические показатели Северо-Востока России: в числителе – за период наблюдений до 2021 г. (Научно-прикладной..., 2022); в знаменателе – за период наблюдений до 1959 г. (Прикладной..., 1960)

Table 1. Climatic indicators of Russia's Far North-East: above the line, those for the observation period up to 2021 (Scientific-Applied..., 2022); below the line, those for the period of observations up to 1959 (Applied..., 1960)

	Посты метеостанций; абс. отметка, м; широта	Среднегодовые показатели за многолетний период			
		Температура воздуха, °С	Скорость ветра, м/с	Количество осадков, мм	Температура поверхности почвы, °С
Пояс арктического климата на морских побережьях в пределах ЦАО					
Пв	Г. Певек, 23 м; 69°55' с.ш.	<u>−9.5</u> −10.4	<u>н. с.*</u> 4.4	<u>221</u> 136	н. с.
Мш	Пос. Мыс Шмидта; 7 м; 68°55' с. ш.	<u>−11.4</u> −12.1	<u>5</u> 6.1	<u>282</u> н. с.	н. с.
У	Пос. Уэлен; 7 м; 66°10' с. ш.	<u>−7.1</u> −8.2	<u>6.1</u> 8.2	<u>386</u> н. с.	н. с.
Пояс субарктического климата в континентальных районах ЦАО					
И	Пос. Илирней, 412 м; 67°20' с. ш.	<u>−13</u> −13.3	<u>1.4</u> 2.9	<u>240</u> 199	<u>−12.8</u> −13.5
О	Пос. Омолон; 260 м; 65°32' с. ш.	<u>−11.9</u> −13.2	<u>2</u> 1.5	<u>271</u> 256	<u>−11.4</u> −12.9
Ос	Пос. Сусуман; 726 м; 62°51' с. ш.	<u>−12.5</u> −13.7	<u>1.6</u> 2.1	<u>288</u> 258	<u>−11.4</u> −12.8.
Ср	Пос. Среднекан; 206 м; 62°25' с. ш.	<u>−10.6</u> −11.9	<u>1.3</u> 1.8	<u>467</u> 420	<u>−10.2</u> −10.6
Пояс субарктического климата на морских побережьях ЦТО					
Эг	Пос. Эгвекинот; 28 м; 66°15' с. ш.	<u>−5.6</u> −7.1	<u>4.7</u> 5.2	<u>551</u> 502	<u>−5.2</u> −7
А	Г. Анадырь; 62 м; 64°47' с. ш.	<u>−7.1</u> −7.7	<u>6.5</u> 7.7	<u>366</u> 312	<u>−6.1</u> −6.9
Мг	Пос. Охотск; 25 м; 59°33' с. ш.	<u>−4.4</u> −5.3	<u>3.7</u> 3.9	<u>520</u> 358	<u>−3.3</u> −5.1
Пояс субарктического климата в континентальных районах ЦТО					
Эн	Пос. Энмываам; 74 м; 66°53' с. ш.	<u>−8.9</u> −9.9	<u>1.9</u> 2.1	<u>302</u> 256	<u>−8.9</u> н. с.
М	Пос. Марково; 26 м; 64°41' с. ш.	<u>−8.3</u> −9.1	<u>2.2</u> 2.3	<u>408</u> 334	<u>−8.3</u> −9.2
ВП	Пос. В. Пенжино; 355 м; 64°13' с. ш.	<u>−9.9</u> −10.3	<u>1.8</u> 1.9	<u>303</u> 313	<u>−9.7</u> н. с.
П	Пос. Палатка; 341 м; 60°06' с. ш.	<u>н. с.</u> −6.6	<u>н. с.</u> 2.6	<u>н. с.</u> 383	<u>н. с.</u> н. с.

Примечание: * н. с. – нет сведений в доступных источниках.

няться с предшествующим казанцевским термохроном, во время которого среднегодовые температуры воздуха превышали современные на 4–5 °С (Гаврилов и др., 2000). Эти многолетние климатические изменения в четвертичное время вызывали значимые преобразования прерывистости и мощности криолитозоны, колебания уровня Мирового океана, что отражалось на активности водообменных процессов.

Геокриологические особенности региона определяются сплошным повсеместным распространением криолитозоны (Фотиев, 2013). Мощность толщи многолетнемерзлых пород (ММП) до 500–550 м, т. е. больше глубины развития трещин выветривания. Только в днищах речных долин мощность ММП сокращается до 50–100 м, иногда отсутствует. Зона гипергенной трещиноватости (выветривания), активированная процессами промерзания-оттаивания, приобретает черты зоны криогенной трещиноватости с повышенной водообильностью.

Южнее 60° с. ш. в узкой прибрежно-морской зоне шириной до 50 км криолитозона имеет прерывистый характер с мощностью на водоразделах до 100–120 м. Криогенная трещиноватость распространена не только в сквозных таликах, но и в подмерзлотной зоне на горных склонах и водоразделах.

После разрушения снежного покрова в июне–сентябре образуется сезонно-талый слой (СТС), часто мощность его около 1.5 м, на затундрованных площадях до 0.5 м, а в накоплениях крупнообломочных пород без заполнителя до 4–5 м.

Повсеместное распространение многолетнемерзлых пород привело к широкому распространению альтипланиации, т. е. процессов выравнивания горного рельефа в результате совместного действия морозного выветривания, нивации, крипа и других криогенных процессов. Можно полагать, что широкое распространение сглаженного низкогогорья в бассейне р. Колыма, в т. ч. формирование Юкагирского, Анадырского и других плоскогорий (см. рис. 1), связано не только с сохранностью палеоген-неогеновых пенепленизированных равнин и наличием пластоподобных лавовых покровов, но и с широким развитием процессов альтипланиации. Следовательно, сглаженные низкогогорья и плоскогорья, толща многолетнемерзлых пород, комплекс климатических показателей (отрицательные температуры, ветер, солнечное излучение) правомерно считать естественными криогенными ресурсами, которые человек может использовать для решения своих задач.

Гидрогеологические особенности изучаемого региона связаны со строением и геологической историей региона (Гидрогеология..., 1972; Шепелев и др., 1984). Преимущественным развити-

ем здесь пользуются гидрогеологические массивы и адмассивы, обводненные в зонах разломов и в пластово-трещинных зонах надвигов. Зона региональной гипергенной трещиноватости на большей части СВР проморожена. Поэтому подмерзлотные воды указанных структур формируются в условиях затрудненного и весьма затрудненного водообмена. Минерализация их превышает 0.5 г/дм³, содержание хлор-иона более 10 мг/дм³ (Гидрогеология..., 1970, 1972), водопроницаемость менее 9 м²/сут.

Практическое внимание привлекает структура активного (свободного) водообмена, наложенная на промороженные гидрогеологические массивы, адмассивы, межгорные артезианские бассейны. Эта криогенная структура генетически связана с поверхностными водотоками. В её составе наибольшую площадь занимает горизонт сезонно водоносных рыхлых образований и трещиноватых пород на горных склонах. Подземные воды данного горизонта разгружаются в водоток, в пойменные и/или подрусловые талики, которые являются вторым объектом криогенной структуры свободного водообмена. Наибольшая длительность водообменных процессов на склонах не превышает 5–6 дней, в таликах 2–3 мес. при водопроницаемости водоносных образований до 100–150 м²/сут. Эта активность является основной причиной формирования ультрапресных вод с общей минерализацией менее 80 мг/дм³ при содержании хлор-иона менее 5 мг/дм³, в отдельных случаях при полном его отсутствии (Гидрогеология..., 1970, 1972). Следовательно, ультрапресные воды с низкими содержаниями хлор-иона или его отсутствием являются распространенным естественным криогенным ресурсом.

Исследование природных особенностей региона позволило обосновать одно из направлений использования естественных КР, которым является производство «зелёного» водорода.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБСУЖДЕНИЕ

С позиции оценки создания в регионе «безуглеродной» энергетики для получения водорода методом электролиза воды необходимо сочетание четырех природных факторов:

1. наличие доступных надежных природных возобновляемых энергетических ресурсов (ВЭР);

2. устойчивое снабжение основным сырьем для получения водорода – пресной природной воды, электролиз которой происходит без выделения экологически опасного хлора;

3. благоприятные криогенные, геологические условия для создания аккумуляторов генерируемого водорода и его кратковременного (сезонного) и длительного хранения;

4. благоприятные инженерно-геологические, криогенные и геоэкологические предпосылки размещения устройств для преобразования природной восполняемой энергии в электрическую и производства водорода.

Первый фактор опосредует энергетическую мощность климатических ресурсов: солнечного излучения и скорости ветра. Данные таблицы № 1 свидетельствуют о том, что в континентальных районах скорости ветра повсеместно меньше 3 м/с, поэтому ветровые ВЭР неперспективны для генерации электроэнергии (Осокин и др., 2019). Условия, благоприятные для создания электрогенерирующих станций – ветровых электростанций (ВЭС), имеются на морских побережьях. Ранее этот факт был отмечен в работе (Сokolовский, 1970). Укажем и на работу М. В. Шевченко, который для генерации электроэнергии предложил использовать ресурсы ветра не только побережий дальневосточных морей, но и их литорали (Шевченко, 2006). Данное предложение возможно для реализации, но только в акватории морей юга Дальнего Востока, поскольку моря у побережий СВР 280–300 дней в году покрыты сплошными дрейфующими ледовыми полями. Защиты стационарных сооружений от таких льдов нет. С потеплением сплошность ледового покрова уменьшается, но в ближайшие десятилетия ситуация с использованием ветровых ресурсов акваторий морей останется неблагоприятной.

Происходящее потепление климата сказывается и в уменьшении скорости ветра до 20–30 % на побережьях арктических морей и на 10–15 % в зоне субарктического климата (см. табл. 1). Предполагаем, что на СВР это уменьше-

ние связано с ростом температуры воздуха, соответственно и поверхности почвы. Увеличивается и температура воды в приповерхностном слое окружающих морей (Шестаков, Грунин, 2024). Тем самым уменьшается температурная разница региона и окружающих океанов, влияющая на скорость циклонов. В любом случае на основе данных таблицы 1 можно судить, что повсеместно наблюдается тенденция понижения среднегодовой скорости ветра. Энергетическая значимость этого понижения не изучена, но среднегодовые значения на морских побережьях региона превышают 3 м/с – минимальный порог использования ветрового ВЭР, находясь в пределах 4–8 м/с, в среднем 6 м/с.

Солнечное излучение на площадки, перпендикулярные потоку лучей, наиболее перспективно для работ солнечных электростанций (СЭС). Количественные значения данного климатического показателя в регионе получены на единичных репрезентативных метеостанциях (таблица 2).

Материалы многолетних наблюдений (> 30 л.) показали, что распределение величины прямой солнечной радиации (S) в октябре–марте подчиняется правилу уменьшения её от южных широт к северным. В апреле–сентябре как при ясной погоде (0–2 балла), так и при облачной (3–7 баллов) на СВР среднемесячные значения этого параметра выше показаний поста, расположенного на 23° южнее. Это связано с уменьшением в тёплый период года длительности сияния Солнца, толщины оптической атмосферы при движении с севера на юг, ростом содержания водяного пара и аэрозольных частиц в атмосфере.

Высокая запылённость воздуха полуаридных и аридных областей Земли и низкая в северных

Таблица 2. Солнечная радиация на репрезентативных метеостанциях при условиях средней облачности в 3–7 баллов (числитель) и ясной в 0–2 балла (знаменатель) (Научно-прикладной..., 2022)

Table 2. Solar radiation at representative weather stations under conditions of average cloud cover of 3–7 points (above the line) and clear 0–2 points (below the line) (Scientific-Applied..., 2022)

См. рис. 1	Метеостанция; абс. отметка, м; координаты	Годовая сумма солнечной радиации – МДж/м ²	Солнечная радиация по сезонам года			
			тёплый сезон (апрель– сентябрь)		холодный сезон (октябрь– март)	
			МДж/м ²	% годовой суммы	МДж/м ²	% годовой суммы
О	Омолон; 260; 65°32' с. ш.	<u>3986</u> 9824	<u>3262</u> 7619	<u>82</u> 77.6	<u>724</u> 2205	<u>18</u> 22.4
Ср	Среднекан; 206; 62°25' с. ш.	<u>3788</u> 9577	<u>3008</u> 7189	<u>79.4</u> 75	<u>780</u> 2388	<u>20.6</u> 25
М	Марково; 26; 64°13' с. ш.	<u>3757</u> 9513	<u>3030</u> 7305	<u>80.6</u> 76.8	<u>758</u> 2208	<u>19.4</u> 23.2
Ос	Островное; 98; 68°06' с. ш.	<u>3804</u> 9433	<u>3260</u> 7746	<u>85.7</u> 82.1	<u>544</u> 1687	<u>14.3</u> 17.9
Нет на рис.	Краснодар, Круг*; 25–32; 45°06' с. ш.	<u>3896</u> 8769	<u>2824</u> 5322	<u>72.5</u> 60.7	<u>1072</u> 3447	<u>27.5</u> 39.3

* Приведены для сравнительных оценок.

хорошо известны. В среднем массовая концентрация аэрозолей в полярных районах $0.1\text{--}7\text{ мкг/м}^3$, а в аридных областях Евразии $25\text{--}250\text{ мкг/м}^3$ (Исмаилов, 2019). Прозрачность атмосферы в горах СВР связана с отсутствием природных источников пыли из-за промерзания приповерхностных отложений на склонах, в речных долинах и в межгорных впадинах, распространения тундр с постоянно влажной поверхностью, малыми (в сравнении с регионом) площадями техногенных производителей аэрозолей, в т. ч. пожаров.

Горный рельеф, определяющий дренированность склонов, сравнительно низкие среднесуточные температуры воздуха и поверхности почвы сказываются на малом поступлении влаги в атмосферу. По данным метеостанции «Островное» ($68^\circ 08'$ с. ш.), парциальное давление пара воды (в миллибарах), отражающее абсолютное содержание влаги в атмосфере в период апрель–июль–сентябрь, соответственно составляет $4.3\text{--}10.7\text{--}2.5$, а среднегодовое – 3.7 . На метеопосту «Краснодар, Круглик» ($45^\circ 06'$) эти показатели соответственно равны $9.1\text{--}18.4\text{--}10.6$, среднегодовое – 10.8 (Научно-прикладной..., 2022).

Малым содержанием аэрозолей и частиц воды в атмосфере горных районов КрСВР в летнее время и запыленностью атмосферы южных пустынь можно объяснить парадоксальные превышения среднемесячной прямой солнечной инсоляции – 1623 МДж/м^2 в июле на метеопосту «Островное» при ясном значении облачности по отношению к Сахаре на $34\text{--}32^\circ$ с. ш. – 900 МДж/м^2 . На северных метеостанциях (табл. 2) больше и среднегодовые показатели радиации, которые в Сахаре составляют $8400\text{--}9200\text{ МДж/м}^2$ (Документ 3...). Разница в том, что в южных пустынях солнечная инсоляция поступает в течение года равномерно, а в горах КрСВР наиболее энергетически значимое время – в апреле–сентябре. Следовательно, среднегодовая мощность СЭС в районах СВР будет не меньше аналогичных устройств в странах – возможных конкурентах. Например, в верховьях р. Омолон солнечная электростанция имеет удельную мощность 0.5 МВт/га (Глотов, 2023), аналогичный показатель крупнейшей СЭС в Калифорнии 0.28 МВт/га (Солнечная...). Поэтому есть основание для заключения, что выработка электроэнергии и «зелёного» водорода на СВР за апрель–сентябрь будет не меньше аналогичных показателей в странах-конкурентах.

В целом климатические условия СВР в горных районах благоприятны для создания центров «зелёной» энергетики на морских побережьях. В континентальных районах с этой целью перспективно использовать электроэнергию СЭС, которые по своим показателям могут превосходить аналогичные устройства в теплых полуаридных и аридных странах.

Второй фактор связан с наличием сырья – воды для электролиза. Вопрос о качестве используемой при электролизе воды не относится к числу обсуждаемых, т. к. считается, что можно применять любую воду, включая морскую. Используют пять основных способов деионизации: дистилляцию, вымораживание, обратный осмос, электродиализ, ионный обмен. Но любой из этих методов требует затрат труда, электроэнергии, специального оборудования и помещения. Кроме того, получаемая указанными методами, кроме дистилляции, пресная вода не избавляется от хлор-иона. Его ионный радиус 0.181 нм , а диаметр молекулы воды 0.28 нм , поэтому хлор-ион проходит через все ионопроницаемые мембраны и при электролизе выделяется на аноде в виде газа – хлора, экологическая опасность которого известна. Наиболее приемлемая для электролиза вода образуется в процессе дистилляции, при расходе электроэнергии $3.55\text{ кВт}\cdot\text{час/м}^3$ дистиллята (Мосин, 2012). Наиболее дешёвая дистиллированная вода производится на тепловых станциях. Стоимость её в России до 3000 руб/т . В других странах больше (Волков, 2022), при этом в большей части стран, в т. ч. в возможных конкурентах – производителях «зелёного» водорода, уже сейчас пресная вода является дефицитным товаром. Теоретически на производство 1 т водорода нужно затратить 9 т (м^3) воды стоимостью не менее $27\,000\text{ руб}$.

Следовательно, стоимость воды для электролиза всегда будет существенным фактором, определяющим себестоимость «зелёного» водорода.

Обойтись без деионизации можно, только используя для электролиза природную маломинерализованную воду, которой является атмосферная влага, прежде всего, вода от таяния снега. Её можно аккумулировать в водохранилищах, строительство и содержание которых потребует дополнительных средств. Другой источник маломинерализованных вод – реки региона. На малую минерализацию речной воды, не превышающую $30\text{--}40\text{ мг/дм}^3$, обратили внимание исследователи более 60 л. назад. Характерным признаком таких ультрапресных вод является низкое содержание иона хлора до полного его отсутствия. В обобщающей работе (Ресурсы..., 1960. С. 269) подчеркнуто, что хлоридного иона «...в воде в период половодья не отмечено во всех изученных реках». Исключение составляют малые реки на морских побережьях, содержащие хлор-ион более 10 мг/дм^3 , причем эти значения вызваны штормовым выбросом микрокапель морской воды. Так, после шторма в октябре 1993 г. хлор-ион мы фиксировали в концентрации до 36 мг/дм^3 в воде ручьев, удаленных от побережья Тауйской губы Охотского моря на 60 км . Обогащение природных вод хлор-ионом на морских побе-

режях постоянно происходит при ежесуточных морских приливах. Данные о химическом составе воды в отдельных представительных водотоках по состоянию на 1980–90-е гг. приведены в таблице 3.

Формированию ультрапресных вод способствует повсеместное распространение криолитозоны, которая на большей части региона имеет сплошной характер. В силу этого вода атмосферных осадков проникает только до подошвы сезонного оттаивания, глубина которого в среднем составляет 1.5 м. При разрушении снежного покрова СТС оттаивает не более чем на 10–15 см, поэтому вся вода при таянии снега поступает в водотоки. Малая длительность водообмена при отсутствии растворимых пород благоприятна для сохранения метеогенными водами малой минерализации и отсутствия (или очень низкого содержания) хлор-иона. Разумеется, в зонах гидротермальной минерализации, насыщенных сульфидами, процессы более сложные, но они локальны и редки. На большей части площади природные условия благоприятны для формирования ультрапресных речных вод с минерализацией не более 50 мг/дм³, которые без предварительной дистилляции можно использовать для производства водорода. Их общие ресурсы мы оценили с учетом экологически безопасного отбора речной воды в пределах не более 10 % реального стока и только для горной территории региона, но без учета ресурсов малых рек на североохотоморском побережье, где ежегодно по-

сле штормовой погоды выпадают дожди, обогащенные хлоридами. Расчетные данные о водных ресурсах приведены в таблице 4.

Расчетное экологически допустимое изъятие воды для электролиза составляет $16.341 \cdot 10^9$ м³. С учетом возможных отходов и потерь газа для расчета увеличим количество воды, расходуемой при электролизе на производство 1 т водорода, до 15 м³. При этих допущениях общая годовая генерация составит 1.1 млрд т водорода, что многократно выше мировой потребности в водороде на 2050 г.

Третий фактор крупнотоннажного производства водорода – необходимость создания хранилищ продукта электролиза. Сложность данной проблемы усугубляется тем, что водород наиболее миграционно активный газ, он горюч и взрывоопасен. В настоящее время обычно хранится в металлических контейнерах сложных конструкций. В больших количествах закачивается в искусственные подземные ёмкости в соленосных толщах, которых нет на СВР. Исследуется проблема хранения водорода в смеси с метаном в подземных хранилищах (Абукова, Абрамова, 2021). В изучаемом регионе таких объектов нет. Но обращает на себя внимание возможная малая диффузионная проницаемость водорода через толщу мерзлых пород. Допускаем, что диффузию водорода в мерзлых породах затрудняет гидратообразование, ныне изучаемый процесс (Чувилин и др., 2019). Косвенным доказательством их водородоупорных свойств являются

Таблица 3. Состав воды при разных режимах стока в отдельных водотоках СВР (Многолетние..., 1985; Глотова, 2002)

Table 3. Water composition under different flow regimes in individual watercourses of RNE (Long-term..., 1985; Glotova, 2002)

№ п/п	Водоток; водосбор, км ² ; год, режим стока в мае–сентябре, м ³ /с	Геологические особенности водосбора	Химический состав воды	
			Формула состава, pH	Cl, мг/дм ³
1	Р. Кулу; 10300; 1980; половодье, 955	Куларо-Нерский террейн; терригенные осадки (Т-Р)	$M0.01 \frac{HCO_3 57 SO_4 43}{Ca 100}$; pH 6.2	0
2	Там же; 1980; летне-осенний паводок; 592	Верховья в пределах Охотско-Чукотского вулканогенного пояса То же	$M0.02 \frac{HCO_3 61 SO_4 39}{Ca 61 Na 25}$; pH 6.6	1
3	Там же; летне-осенняя межень; 65,8		$M0.02 \frac{HCO_3 60 SO_4 33}{Ca 67 Na 20}$; pH 6.5	1
4	Р. Сугой, 5.2 км ниже устья руч. Омчикчан; 5880; половодье; 640		$M0.016 \frac{HCO_3 72 SO_4 19}{Ca 56 Na 42}$; pH 6.2	0
5	Там же; летне-осенний паводок; 388	Преимущественно лавовые покровы Охотско-Чукотского вулканогенного пояса	$M0.02 \frac{HCO_3 64 SO_4 36}{Ca 60 Na 34}$; pH 6.8	0
6	Там же; летне-осенняя межень; 59.4		$M0.03 \frac{HCO_3 65 SO_4 35}{Ca 58 Na 22}$; pH 6.8	0
7	Р. Амгуэма; 26400; летне-осенняя межень; 311	Чукотский террейн; верховья; Охотско-Чукотский вулканогенный пояс	$M0.02 \frac{HCO_3 60 SO_4 38}{Ca 66 Na 24}$; pH 6.2	0
8	Там же; летне-осенний паводок; 1530		$M0.015 \frac{HCO_3 72 SO_4 28}{Ca 70 Na 26}$; pH 6.2	0

Таблица 4. Ресурсы ультрапресных речных вод в горных районах КрСВР (Многолетние..., 1985)

Table 4. Resources of ultra-fresh river waters in the mountainous regions of RNE (Long-term..., 1985)

№ п/п	Районы водосборов горных водотоков	Водотоки в пределах районов; площадь водосбора, тыс. км ²	Годовой объем стока, млн м ³ (n·10 ⁶)	Объем экологически безопасного изъятия стока, млн м ³ (n·10 ⁶)
1	Средне-Колымский	Колыма, пос. Среднеколымск; 361000	70400	7040
2	Нижне-Колымский	Бол. Анюй; 49600	11500	1150
		Мал. Анюй; 30000	5570	557
3	Восточно-Чукотский	Погынден; 12000	1710	171
		Паляваам; 6810	1370	137
4	Западно-Чукотский	Амгуэма; 26700	3720	372
		Анадырь; 106000	31200	3120
5	Североохотоморский	Пенжина; 76000	21634	2163/4
		Тауй; 25100	11400	1140
		Гижига; 11700	4910	491
Всего		704910	163414	16341.4

газовые скопления, вскрываемые под подошвой многолетнемерзлых пород при бурении нефтегазопроисловых скважин в Анадырском нефтегазовом бассейне, картировочных скважин в Чаунской впадине. Широко известное обильное выделение самовоспламенившегося газа вскрыто в октябре 1958 г. скважинами в интервале 295–365 м в зоне трещиноватых кимберлитов трубки «Удачная». Газ содержит метан 23.1 % об. и водород > 70 % об. (Фомичев, 2008). Интервал вскрытия соответствует глубине залегания многолетнемерзлых пород (Алексеева, Алексеев, 2019). Надо отметить, что до 2021 г. водород не относился к полезным ископаемым, поэтому в пробах газа он редко определялся. Указанные и ряд других фактов дают основание для предположения, что льдистые породы водородоупорны, но проблема нуждается в изучении.

Более надежно установлена связь водорода с магматическими породами толеитовой серии – базальтами, дацитами, которые служат своеобразной крышкой для залежей. Поэтому мы предлагаем изучить возможное использование многолетнемерзлых базальтовых пластов для устройства в них подземных хранилищ водорода. В целом условия создания аккумуляторов для надежного хранения водорода ещё не изучены, но предпосылки их успешного завершения есть. Вопрос о транспортировании выработанного водорода в настоящее время активно изучается (Лурье, 2022).

Четвёртый фактор сводится к наличию благоприятных инженерно-геологических и экологических условий для сооружения ВЭС и СЭС на выположенных и плоских водоразделах. Это Юкагирское и Анадырское плоскогорья, Колымское нагорье и др. (Глотов, Абукова, 2024). Для каждого из них характерно распространение плато, сложенных базальтами, дацитами, андезитами. Широко представлены сглаженные низкого-

рья. На пологих горных склонах, выполненных терригенными породами, до высоты 500–600 м произрастает древесно-кустарниковая растительность. Выше развиты горные тундры.

Обычно на склонах и водоразделах развиты элювиальные и элювиально-делювиальные валунно-щебнистые образования, подстилаемые трещиноватыми коренными породами (Инженерная..., 1977). Мощность их до 2 м, локально содержат жилы и скопления льда, поэтому участки будущих ВЭС или СЭС требуют предварительного геокриологического изучения. Выположенные водоразделы удобны для устройства железобетонного фундамента стальных или железобетонных башен ветроэнергетических установок (ВЭУ). На них больше ветреность, чем в речных долинах. Для СЭС выположенные водоразделы и верхние части их склонов южной экспозиции благоприятны тем, что солнечная освещенность более длительная и интенсивная, чем в долинах или у подножий, меньше загрязненность атмосферы. На каждые 100 м высоты прямая солнечная радиация увеличивается на 0.007–0.14 Вт/м² (Документ 3...). В экологическом отношении водоразделы наименее освоены людьми, здесь реже лесные и тундровые пожары, надежнее противопожарная защита. Следует подчеркнуть, что выположенные формы рельефа, в образовании которых участвуют криогенные процессы, являются своеобразным естественным КР, благоприятным для строительства установок ВЭС или СЭС.

Реальные возможности проявления четвёртого фактора контролируют площадь размещения для устройств генерации электроэнергии, которая определяется пространственными масштабами выположенных водоразделов на скальном основании. По нашим подсчетам, территория, перспективная для размещения ВЭС и СЭС, составляет примерно 25 % площади региона, что соответствует примерно 325 тыс. км² (32.5 млн га).

Разумеется, не на всей этой территории можно размещать панели СЭС. Для приближенного расчета примем, что эти объекты займут 10 % указанной площади, т. е. 3.25 млн га. По опыту работы малых СЭС в Якутии и Магаданской области известно, что при удельной мощности 0.5 МВт/га 2 га обеспечивают мощность электростанции 1 МВт, что близко к показателям российских СЭС, установленная мощность которых в 2022 г. составила 2253 МВт. Общая выработка электроэнергии с учетом их КПД и коэффициента использования на 01.01.2022 равна $2113 \cdot 10^6$ кВт·ч (Возобновляемая..., 2022). Соответственно, на перспективных площадях СВР можно разместить СЭС общей мощностью 1.625 млн МВт, которые выработают за 6 месяцев (180 суток) около $1524 \cdot 10^9$ кВт·ч/год электроэнергии. При современном электролизе воды на выработку 1 т водорода расходуют, в среднем, $40 \cdot 10^3$ кВт·ч электроэнергии (Григорьев и др., 2008; Волков, 2022). За счет выработки СЭС во внутриконтинентальных районах региона можно получать ежегодно 38 млн т водорода, затратив 571.5 млн м³ ультрапресной речной воды или 18.12 м³/с, что соответствует среднегодовому стоку горного водотока с водосборной площадью около 2000 км², например, р. Среднекан. В «Концепции...» (2021) предусмотрено к 2050 г. поставлять на мировой рынок 15 млн т водорода (оптимистично 50 млн т). Процессы становления и развития криолитозоны в горных районах СВР, географические и климатические условия, сложившиеся здесь в голоцене, позволяют решить задачу, поставленную Правительством России, уже в настоящее время с использованием современных технических средств. В предшествующей работе (Гловтов, 2023) мы показали возможность получения около 1 млн т водорода, используя СЭС и воду р. Сугой в районе пос. Омсукчан. Очень перспективен для создания центра производства водорода и район Ольского плато площадью около 400 км², сложенного верхнемеловыми базальтами мощностью более 200 м. Оно имеет плоскую или слабо наклоненную к северу под углом 5–10° поверхность. Размещению здесь СЭС благоприятствуют абсолютная высота (1300–1552 м), южная экспозиция уклона поверхности, господствующие тундровые и лесотундровые ландшафты. Сырьем для производства водорода являются воды верховьев реки Ола и её притоков. В гидрологическом отношении район плато не изучен, но по данным зимнего обследования, выполненного Н. Г. Слаковой в апреле 1979 г., многие водотоки сохраняют круглогодичный поверхностный сток. Наиболее крупная из них р. Ола в верховьях со стоком в конце зимней межени до 130 л/с (Государственная..., 1988), позволяющая получать минимально до 240 т/сут водорода. Необходимая электроэнергия

будет вырабатывать СЭС мощностью около 12 МВт, при площади электрогенерирующих панелей около 24 га. Эта минимальная площадь, обусловленная минимально возможным забором воды на технологические операции. Ольское плато интересно и составляющим её базальтовым покровом, промороженным до глубин более 200 м, что позволяет предположить перспективность устройства в нём хранилищ водорода. Эти обстоятельства должны ускорить процесс изучения условий аккумуляции и хранения водорода.

При оценке реальной возможности использования ветровых ресурсов мы учитывали опыт строительства Кольской ВЭС, описанный в электронных средствах массовой информации. Мощность ВЭС, включающей 57 ВЭУ на площади 257 га, шириной 2140 м, сложенной регионально метаморфизованными палеозойскими осадочными породами, составляет 201 МВт. Реальная годовая выработка ВЭС – 750 млн. кВт·час/год. В нашем регионе подобные инженерно-геологические условия сложились на морских побережьях общей длиной в 4000 км и шириной не менее 120 м. Большая часть этой протяженности занята низменностями, подверженными термоэрозии и размыву наступающим морем. Гористые берега на значительных расстояниях сильно расчленены и неперспективны для сооружения ВЭС мощностью более 10 МВт. Только примерно 1/3 длины берегов (около 1300 км) пригодна для сооружения ветроэнергетических станций мощностью более 100 МВт. Приняв за основу данные о Кольской ВЭС, можно подсчитать, что на берегах морей СВР, благоприятных для устройства ВЭС, можно разместить 620 ВЭС суммарной мощностью около $12.7 \cdot 10^4$ МВт, которые на современном оборудовании производят $472 \cdot 10^9$ кВт·ч/год электроэнергии. Эта электроэнергия может быть направлена на обеспечение социально-экономических и промышленных потребностей, обслуживание объектов Северного морского пути, производство дополнительных объемов «зелёного» водорода.

ВЫВОДЫ

Таким образом, в горных районах Крайнего Северо-Востока России «зелёный» водород является разновидностью искусственного криогенного ресурса, производство которого связано с использованием комплекса естественных криогенных ресурсов.

1. Наличие восполняемых энергетических ресурсов ветра на морских побережьях и солнечного излучения во внутриконтинентальных районах. Происходящие климатические изменения сокращают ветровые ресурсы, но существующая среднегодовая скорость 4–8 м/с перспективна для производства «зелёной» электроэнергии. На ве-

личине солнечной прямой радиации влияние потепления климата не замечено. Обращает внимание, что эта величина в период апреля–сентября на территории СВР значительно превышает данный показатель в теплых районах России и в аридных зонах Евразии и Африки. Значит, в теплый период года на СВР можно генерировать водород в количестве не меньше, чем в странах – возможных конкурентах России на будущих международных рынках энергоносителей, за год без дополнительных затрат средств на деионизированную воду.

2. Холодный климат, распространение сплошной криолитозоны, магматических и терригенных пород, накопление снежного покрова в течение 7 месяцев способствуют созданию благоприятных условий для формирования природного криогенного ресурса – бесхлорной ультрапресной воды. Это метеогенная вода, мало изменяющая свой состав в сезонно-талом слое на горных склонах и в таликах речных долин в силу активных водообменных процессов.

Общепринято считать, что экологически безопасное безвозвратное изъятие воды не должно превышать 10 % реального стока. По нашим прикидочным расчетам, в регионе для генерации воды можно добывать ежегодно $16342.4 \cdot 10^6 \text{ м}^3$. Запасы ультрапресной речной воды КрСВР позволяют произвести $1634.24 \cdot 10^6 \text{ т}$ водорода, в 3 раза больше возможной мировой потребности в 2050 г. В «Концепции развития водородной энергетики в Российской Федерации» поставлена задача производства в России к 2050 г. 15 млн т водорода в год (оптимистично 50 млн т). Уже в настоящее время современными средствами выработки электричества и электролиза воды можно решить эту задачу, используя экологически малоопасные СЭС.

3. Условия, определяющие возможность надежного хранения водорода в недрах, изучены слабо, но есть косвенные признаки геологического и геокриологического характера, показывающие возможность создания надежных хранилищ генерируемого «зелёного» водорода. Исследования этой проблемы нужно считать особо важными.

4. Энергетически наиболее благоприятные условия для размещения объектов «зелёной» энергетики сложились на выположенных водоразделах с маломощным элювиально-делювиальным слоем. Такие участки надежны для решения проблем экологической и противопожарной безопасности. Но они нуждаются в более глубоких инженерно-геологических, климатических, геокриологических и геоэкологических изучениях.

Необходимо отметить, что общие геокриологические, климатические и географические усло-

вия Восточной Сибири позволяют предполагать распространение на её территории горных районов, перспективных для формирования такого криоресурса, как «зелёный» водород. Это следует изучать уже сейчас.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность Л. П. Глотовой за помощь в работе и в подготовке статьи к публикации, рецензентам за вдумчивые объективные рекомендации, редакции данного журнала за отличную работу по подготовке рукописи статьи к изданию.

Работа выполнена за счет средств госбюджетного финансирования Северо-Восточного комплексного научно-исследовательского института им. Н. А. Шило Дальневосточного отделения Российской академии наук по теме «Природная среда Арктики и Субарктики в кайнозое» и Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт проблем нефти и газа Российской академии наук по теме FMME-2025-0010 «Геологическое обоснование оптимальных условий природной и индуцированной внутрипластовой генерации водорода и его подземного хранения в истощенных месторождениях УВ и соляных структурах».

ЛИТЕРАТУРА

- Абукова Л. А., Абрамова О. П. Прогноз гидрогеохимических эффектов в глинистых водоупорах при подземном хранении водорода с метаном // Георесурсы. 2021. № 1. С. 118–126. DOI: 10.18599/grs.2021/1/13.
- Абукова Л. А., Абукова Т. Н., Назина С. И., Попов Д. П. Хранение водорода с метаном в подземных резервуарах: прогноз сопутствующих процессов // SOCAR Proceedings. Special Issue. 2023. No. 2. Р. 29–41.
- Алексеев В. Р. Криогенные ресурсы и судьба цивилизации // Наука и техника в Якутии. 2011. № 1 (20). С. 85–90.
- Алексеева Л. П., Алексеев С. В. Геохимия подземных льдов, соленых вод и рассолов Западной Якутии. Новосибирск: Гео, 2019. 214 с.
- Алисов Б. П. Климат СССР. Москва: МГУ, 1956. 127 с.
- Боревский Б. В., Гараева Т. В., Зубанова Т. Н., Куренной В. В. Карта ресурсного потенциала пресных подземных вод. Масштаб 1 : 5 000 000 / Гл. ред. Б. В. Боровский. Москва: ГИДЭК, 2013.
- Булыгина О. Н., Коришунова Н. М., Разуваев В. Н. Изменения режима ветра на территории России в последние десятилетия // Труды Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова. 2013. Вып. 568. С. 156–172.
- Возобновляемая энергетика в России и в мире. Москва: РЭА Минэнерго России, 2022. 105 с.
- Волков Э. П. Оценка конкурентного способа алюмоводной технологии получения водорода // Известия РАН. Энергетика. 2022. № 6. С. 3–9. DOI: 10.31857/S0002531022060073.
- Гаврилов А. В., Тумской В. Е., Романовский Н. Н. Реконструкция динамики среднегодовой температуры

пород на приморских низменностях Якутии и арктическом шельфе за последние 420 тыс. лет // Криосфера Земли. 2000. Т. IV. № 4. С. 3–14.

Гидрогеология СССР. Т. 20. Якутская АССР / Ред. А. И. Ефимов, И. К. Зайцев. Москва: Недра, 1970. 353 с.

Гидрогеология СССР. Т. 26. Северо-Восток СССР / Ред. О. Н. Толстухин. Москва: Недра, 1972. 297 с.

Готов В. Е. Перспективы Крайнего Северо-Востока России на производство «зелёного» водорода с использованием климатических источников возобновляемой энергии // Вестник СВНЦ ДВО РАН. 2023. № 4. С. 30–41. DOI: 10.34078/1814-0998-4-30-41.

Готов В. Е., Абукова Л. А. Мерзлотно-гидрогеологические аспекты становления и развития водородной энергетики Северо-Востока России // Подземная гидросфера: материалы Всероссийского совещания по подземным водам Востока России (XXIV Совещание по подземным водам Востока Сибири и Дальнего Востока) с международным участием, г. Екатеринбург, 21–28 июня 2024 г. Екатеринбург: Институт горного дела (ИГД) УрО РАН, 2024. С. 203–208.

Готова Л. П. Современные изменения качества природных вод в долинах горных рек Верхней Колымы // Факторы формирования общего стока малых горных рек в Субарктике (по материалам Колымской воднобалансовой станции) / Отв. ред. В. Е. Готов, Н. В. Ухов. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 2002. С. 59–80.

Государственная гидрогеологическая карта СССР, масштаб 1 : 200 000. Серия Колымская. Объяснительная записка. Составил Н. Г. Славка. Ред. Р. С. Конова.

Григорьев С. А., Порембский В. И., Фатеев В. М., Самсонов Р. О., Козлов С. И. Получение водорода электролизом воды: современное состояние, проблемы и перспективы // Транспорт на альтернативном топливе. 2008. № 3. С. 62–69.

Документ 3. Общая характеристика солнечной радиации. URL: Nauki_o_zemle. ledway.ru>resources/file/1842 (дата обращения 15.12.2024).

Исмаилов Ф. Атмосферный аэрозоль. [Б. м.]: LAP LAMBERT Academic Publishing RU, 2019. 455 с. DOI: 10.36719/2019/288.

Калабин А. И. Вечная мерзлота и гидрогеология Северо-Востока СССР. Труды ВНИИ-1. Магадан: ВНИИ-1, 1960, 470 с.

Концепция развития водородной энергетики в Российской Федерации (утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 05.08.2021 № 2162-р). Москва: Кодекс, 2021.

Лурье М. В. Транспортировка водорода по газопроводам методом последовательной перекачки // Территория «НЕФТЕГАЗ». 2021. № 3–4. С. 86–92.

Мельников В. П. К созданию цельного образа криосферы // Криосфера Земли. 2014. Т. XVIII. № 4. С. 3–14.

Мельников В. П., Брушков А. В., Федоров Р. Ю. К развитию холистического образа криосферы // Арктика: экология и экономика. 2021. Т. 11. № 4. С. 519–528.

Мельников В. П., Геннадик В. Б., Брушков А. В. Аспекты криософии: разнообразие в природе // Криосфера Земли. 2013. Т. 18. № 2. С. 3–11.

Миронов Е. А. Моделирование и управление процессами производства водорода на основе электролиза // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2023. Т. 31. № 2 (78). С. 70–84. DOI: 10.14498/tech.2023.2.6.

Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Т. 1. РСФСР. Вып. 17. Бассейны Колымы и рек Магаданской области. Ленинград: Гидрометеиздат, 1985. 430 с.

Научно-прикладной справочник «Климат России». 2029. URL: aisori-m.meteo.ru/climsprn/. Дата обращения 05.03.2024.

Осокин В. Л., Семенов Д. А., Дуленов Д. Е., Сбитнов Е. А. Нетрадиционные и возобновляемые источники электрической энергии. Княгино: Нижегородский инж.-эконом. университет, 2019. 128 с.

Перспективы водородной экономики. 20.01.2021. URL: https://adu.ru/tek_russia/issue/2021/11/836 (дата обращения 05.12.2024).

Прикладной климатический справочник Северо-Востока СССР / Под ред. Н. К. Клюкина. Магадан: КОГИЗ, 1960. 426 с.

Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 19. Северо-Восток / Под ред. В. В. Куприянова. Ленинград: Гидрометеиздат, 1969. 282 с.

Соколовский Д. А. Оценка и использование естественных ресурсов // Север Дальнего Востока / Под ред. Н. А. Шило. Москва: Наука, 1970. С. 378–396.

Солнечная электростанция «Айвонпа». URL: ru.wikipedia.org/wiki/СТЭС_Айвонпа (дата обращения 17.12.2024).

Чувилин Е. М., Давлешина Д. А., Лупчак М. В. Гидратообразование в мерзлых и оттаивающих метанонасыщенных породах // Криосфера Земли. 2019. Т. XXIII. № 2. С. 50–61. DOI: 10.21782/KZ1560-7496-201-2(50-6).

Шевченко М. В. Современные ветроэлектростанции и особенности их конструкций // Вестник Камчатского ГТУ. 2006. № 5. С. 59–64.

Шепелев В. В., Толстухин О. Н., Пигузова В. М. Мерзлотно-гидрогеологические условия Восточной Сибири. Новосибирск: Наука, 1984. 190 с.

Шестаков А. В., Грунин С. И. Морской рост андырской кеты в условиях глобального потепления климата // Биологические проблемы Севера: материалы международной научной конференции, посвященной 300-летию РАН (г. Магадан, 7–11.10.2024). Москва: Знание-М, 2024. С. 293–296.

Шило Н. А. Четвертичные отложения Яно-Колымского золотоносного пояса, условия и этапы их формирования. Магадан: ВНИИ-1, 1961. 136 с.

Поступила в редакцию 15.06.2025.

Поступила после доработки 26.06.2025.

“GREEN” HYDROGEN AS NEW TYPE OF CRYOGENIC RESOURCE IN THE MOUNTAINOUS REGIONS OF RUSSIA’S NORTH-EAST

V. E. Glotov¹, L. A. Abukova²

¹North-East Interdisciplinary Scientific Research Institute n. a. N. A. Shilo, FEB RAS, Magadan

²Oil and Gas Research Institute, RAS, Moscow

The article substantiates the prospects for developing a new type of artificial cryogenic resource, “green” hydrogen obtained by using natural cryogenic resources. The raw material for it is ultra-fresh, often chlorine-free waters of mountain streams, the formation of which is predetermined by feeding with atmospheric precipitation, spread of continuous cryolithozone, absence of water-soluble rocks, active water exchange and its low power. For water electrolysis, it is feasible to use the electricity from solar power plants (SPP) in continental areas and/or wind power plants (WPP) on the sea coasts. In the continental conditions of the Russia’s North-East of (RNE), clear weather prevails in April through September, the average annual wind speed is under 3 m/s. The annual amount of direct solar radiation in clear weather reaches 9433–9824 MJ/m². It is important that 82–85 % of radiation occurs in April–September. Therefore, working for six months, the solar power plants in the region would generate electricity in an amount equal to that from the annual work of solar power plants in warm climate countries. On the sea coasts, due to increased cloudiness, the work of solar power plants is not productive. The prevailing average annual wind speed exceeding 4 m/s is optimal for the operation of wind power plants. The article provides a rationale for the reality of organizing the most commercially profitable production of “green” hydrogen in the conditions of the RNE and emphasizes the need for detailed scientific research into its underground storage.

Keywords: Russia’s North-East, cryogenic resource, “green” hydrogen, ultra-fresh water for electrolysis, wind power plants, solar power plants.

REFERENCES

- Abukova, L. A., Abramova, O. P., 2021. Forecast of Hydrogeochemical Effects in Clay Water Seals from the Underground Storage of Hydrogen with Methane, *Georesursy*. 1, 118–126. DOI: 10.18599/grs.2021/1/13 [In Russian].
- Abukova, L. A., Abukova, T. N., Nazina, S. I., Popov, D. P., 2023. Storage of Hydrogen with Methane in Underground Reservoirs: Forecast for Related Processes, *SOCAR Proceedings. Special Issue*. 2, 29–41 [In Russian].
- Aiwonpa Solar Power Plant. URL: ru.wikipedia.org/wiki/CTЭC_Айвонпа (accessed 17.12.2024) [In Russian].
- Aleksyeyev, V. R., 2011. Cryogenic Resources and the Fate of Civilization, *Science and Technology in Yakutia*. 1 (20), 85–90 [In Russian].
- Alekseyeva, L. P., Alekseyev, S. V., 2019. Geochemistry of Underground Ice, Salt Waters, and Brines in Western Yakutia. Novosibirsk, Geo [In Russian].
- Alisov, B. P., 1956. Climate of the USSR. Moscow, Moscow State University [In Russian].
- Applied climatic reference book of the North-East of the USSR. Ed. N. K. Klyukin. Magadan, KOGIZ, 1960 [In Russian].
- Borevsky, B. V., Garayeva, T. V., Zubanova, T. N., Kurennoy, V. V., 2013. Map of the Resource Potential of Fresh Underground Waters. Scale 1 : 5,000,000. Ed. B. V. Borevsky. Moscow, GIDEK [In Russian].
- Bulygina, O. N., Korshunova, N. M., Razuvaev, V. N., 2013. Recent Decades’ Wind Regime Changes in Russia’s Territory, *Proceedings of the Main Geophysical Observatory n. a. A. I. Voyeykov*. 568, 156–172 [In Russian].
- Chuvilin, E. M., Davleshina, D. A., Lupchak, M. V., 2019. Hydrate Formation in Frozen and Thawing Methane-Saturated Rocks, *Cryosphere of the Earth*. XIII (2), 50–61. DOI:10.21782/KZ1560-7496-201-2(50-6) [In Russian].
- Concept of Hydrogen Energy Development in the Russian Federation (Approved by the Decree of the Russian Federation Government of 05.08.2021 No. 2162-r), 2021. Moscow, Codex [In Russian].
- Document 3. General Characteristics of Solar Radiation. URL: [Nauki_o_zemle.ledway.ru>resources/file/1842](https://nauki_o_zemle.ledway.ru/resources/file/1842) (accessed 15.12.2024) [In Russian].
- Gavrilov, A. V., Tumskoy, V. E., Romanovsky, N. N., 2000. Reconstructing the Dynamics of the Average Annu-

al Rock Temperature in Yakutia's Coastal Lowlands and in the Arctic Shelf over the Past 420K Years, *Cryosphere of the Earth*. IV (4), 3–14 [In Russian].

Glotov, V. E., 2023. Russia's Far North-East Prospects for "Green" Hydrogen Production Using Climatic Sources of Renewable Energy, *Bulletin of the North-East Science Center*. 4, 30–41. DOI:10.34078/1814-0998-4-30-41 [In Russian].

Glotov, V. E., Abukova, L. A., 2024. Permafrost-Hydrogeological Aspects of the Formation and Development of Hydrogen Energy in Russia's North-East, *Underground Hydrosphere: Proceedings of the All-Russia Meeting on Groundwater in Russia's East (24th Meeting on the East Siberian and Far Eastern Groundwaters) with International Participation*. Yekaterinburg, June 21–28, 2024. Yekaterinburg, Institute of Mining, Ural Branch of RAS, 203–238 [In Russian].

Glotova, L. P., 2002. Modern Changes in the Quality of Natural Waters in the Upper Kolyma Mountain River Valleys, *Factors of Small Mountain Rivers Total Flow Formation in the Subarctic (Based on the Materials of the Kolyma Water Balance Station)*. Eds. V. E. Glotov, N. V. Ukhov. Magadan, NEISRI FEB RAS, 59–80 [In Russian].

Grigoryev, S. A., Porembsky, V. I., Fateyev, V. M., Samsonov, R. O., Kozlov, S. I., 2008. Production of Hydrogen by Electrolysis of Water: Current State, Problems, and Prospects, *Transport na Alternativnom Toplivo*. 3, 62–69 [In Russian].

Hydrogeology of the USSR, 1970. Vol. 20. Yakut ASSR. Eds. A. I. Efimov, I. K. Zaitsev. Moscow, Nedra [In Russian].

Hydrogeology of the USSR, 1972. Vol. 26. North-East of the USSR. Ed. O. N. Tolstikhin. Moscow, Nedra [In Russian].

Ismailov, F., 2019. Atmospheric Aerosol. LAP LAMBERT Academic Publishing RU. DOI: 10.36719/2019/288 [In Russian].

Kalabin, A. I., 1960. Permafrost and Hydrogeology in the USSR's North-East. *Trudy VNII-I*. Magadan, VNII-1 [In Russian].

Long-Term Data on the Regime and Resources of Land Surface Waters, 1985. Vol. 1. RSFSR. Iss. 17. Basins of the Kolyma and Magadan Oblast Rivers. Leningrad, Gidrometeoizdat [In Russian].

Lurye, M. V., 2021. Transportation of Hydrogen through Gas Pipelines by Sequential Pumping, *Territoriya "NEFTEGAZ."* 3–4, 86–92 [In Russian].

Melnikov, V. P., 2014. Towards the Creation of the Cryosphere Integral Image. *Earth's Cryosphere*. XVIII (4), 3–14 [In Russian].

Melnikov, V. P., Brushkov, A. V., Fyodorov, R. Yu., 2021. Towards the Development of the Cryosphere Holis-

tic Image, *Arctic: Ecology and Economy*. 11 (4), 519–528 [In Russian].

Melnikov, V. P., Gennadnik, V. B., Brushkov, A. V., 2013. Aspects of the Cryosphere: Diversity in Nature, *Earth's Cryoscopy*. 18 (2), 3–11 [In Russian].

Mironov, E. A., 2023. Modelling and Control of Hydrogen Production Processes Based on Electrolysis, *Bulletin of Samara State Technical University. Series: Technical Sciences*. 31 (2–78), 70–84. DOI: 10.14498/tech.2023.2.6 [In Russian].

Osokin, V. L., Semyonov, D. A., Dulepov, D. E., Sbitnov, E. A., 2019. Non-conventional and Renewable Sources of Electric Energy. Knyagino, Nizhny Novgorod University Engineering and Economics [In Russian].

Prospects of the Hydrogen Economy. 20.01.2021. URL: https://adu.ru/tek_russia/issue/2021/11/836 (accessed 05.12.2024) [In Russian].

Renewable Energy in Russia and Worldwide, 2022. Moscow, Russian Energy Agency, Ministry of Energy of the Russian Federation [In Russian].

Scientific and applied reference book «Climate of Russia». 2029. URL: aisori-m.meteo.ru/climspn/. Access date 05.03.2024.

Shepelev, V. V., Tolstikhin, O. N., Piguzova, V. M., 1984. Permafrost and Hydrogeological Conditions in East Siberia. Novosibirsk, Nauka [In Russian].

Shestakov, A. V., Grunin, S. I., 2024. Marine Growth of the Anadyr Chum Salmon under the Global Climate Warming, *Biological Problems of the North: Proceedings of the International Scientific Conference Dedicated to the 300th Anniversary of the Russian Academy of Sciences, Magadan, 7–11.10.2024*. Moscow, Znaniye-M, 293–296 [In Russian].

Shevchenko, M. V., 2006. Modern Wind Power Plants and the Features of Their Structures, *Bulletin of the Kamchatka State Technical University*. 5, 59–64 [In Russian].

Shilo, N. A., 1961. Quaternary Deposits of the Yana-Kolyma Gold-Bearing Belt, Conditions and Stages of Their Formation. Magadan, VNII-1 [In Russian].

Sokolovsky, D. A., 1970. Natural Resources Assessment and Use, *North of the Far East*. Ed. N. A. Shilo. Moscow, Nauka, 378–396 [In Russian].

State Hydrogeological Map of the USSR, Scale 1 : 200,000. Kolyma Series. Explanatory Note. Compiled by N. G. Slakva. Ed. R. S. Kononova [In Russian].

Surface Water Resources of the USSR, 1969. Vol. 19. North-East. Ed. V. V. Kupriyanov. Leningrad, Gidrometeoizdat [In Russian].

Volkov, E. P., 2022. Evaluation of the Competitiveness of Aluminum-Water Technology for Hydrogen Production, *Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Energetics*. 6, 3–9. DOI: 10.31857/S0002531022060073 [In Russian].